

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, № 3, 2022.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 49, No.3, 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.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 49, № 3, 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.

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, проректор, зам. директора Института функциональной ядерной электроники

Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, РФ.

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

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

Кузюзов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического

университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ.

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

Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, научный руководитель НИИ «Микроэлектроники и нанотехнологий»

Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная рубрика «Строительство и архитектура»

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

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

Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

Группы научных специальностей

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

05.04.13. Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты (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)

05.13.12. Системы автоматизации проектирования (по отраслям) (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, № 3 Махачкала, 2022. – 164с.

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
Э. Казалиева, А.Р. Шахмаева. Улучшение тепловых свойств прибора в процессе формирования контакта с коллекторной областью кремниевого транзистора	6
С.Г. Магомедова, О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов, Т.Э., Саркаров, Д.А. Магомедов. Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии	14
А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин. Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике	24
Информационные технологии и телекоммуникации	32
М.П. Базилевский, Д.В. Карбушева. Программа оценивания с помощью метода наименьших квадратов неэлементарных линейных регрессий с двумя переменными	32
В.А.Воеводин, И.В.Виноградов, Д.И.Волков. Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до воздействия противника и восстановления работоспособности	39
А.Р. Газизов. Аппаратно-программные методы защиты ресурсов информационной системы персональных данных от несанкционированного доступа путем «сниффинг-атак»	52
М.А. Ганжур, А.И. Брюховецкий. Системы сетевой безопасности	61
С.В. Гужов, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп. Разработка математического аппарата по оптимизации АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы	68
И.А. Лоскутов, С.А. Резниченко. Угрозы информационной безопасности госкорпораций Российской Федерации	74
Н.Г. Мамедов. Моделирование оптимальной системы управления цепями поставок в транспортных системах	82
Т.В. Мещерякова, Е.А. Рогозин, А.О. Ефимов, В.Р. Романова, С.А. Коноваленко. Методический подход к количественной оценке рисков реализации угроз несанкционированного доступа к информационному ресурсу автоматизированных систем органов внутренних дел.....	91
А.А. Хвостов, В.И. Ряжских, А.А. Шевцов, В.В.Ткач. Математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки как предначальная стадия создания САПР сушилок нового поколения	104
Строительство и архитектура	116
Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова. Устойчивость многопролётных стержней	116
А.М. Казиев, З.Р. Лихов, А.Я. Джанкулаев, И.Ю. Кумышев, Г.А. Шигалугов. Сочетание динамических и кинематических векторных возмущений балок	123
М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров. Мобильный комплекс для производства керамзита для северных дорог	133
Т.К. Курбатова, Н.А. Рактович, Р.А. Петров. Проблематика формирования комфортного освещения пешеходных зон по ул. Кубанская в г. Астрахань	140
С.Г. Шеина, Д.К.-С. Батаев, М.М. Малороев, П.Д. Батаева. Материалы и технологии для восстановления объектов башенного типа	146
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Особенности работы балочных большепролетных конструкций	152
Требования к оформлению статей	161

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 . 3 , 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.), Aassoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakow, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications» Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E.Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A.Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanazakov, 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), 05.04.13.Hydraulic machines and hydropneumatic units (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), 05.13.12.Design automation systems (By Branches)(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.3 Makhachkala, 2022–164p. 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
E. Kazalieva, A.R. Shakhmaeva. Improving the thermal properties of the device in the process of forming a contact with the collector region of a silicon transistor	6
S.G. Magomedova, O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov, T.E. Sarkarov, D.A. Magomedov. Experimental studies of thermoelectric system for treatment periodontal disease by local hypothermia	14
A.N. Makeev, Y.A. Kiryukhin Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering	24
Information Technology and Telecommunications	32
M.P. Bazilevskiy, D.V. Karbusheva. The program for estimation non-elementary linear regressions with two variables using ordinary least squares	32
V.A. Voevodin, I.V. Vinogradov, D.I. Volkov. About the informatization object functioning stability assessment in conditions of computer attacks at exponential distribution law of time before the enemy's impact ..	39
A.R. Gazizov. Hardware, software and organizational means of protecting the resources of the personal data information system from unauthorized access by means of "Sniffing attacks	52
M.A. Ganzhur, A.I. Bryukhovetsky. Network security systems	61
S.V. Guzhov, E.V. Krylova, D.V. Torop. Elaboration of a mathematical apparatus for optimizing the automated control system of a heat supply system on the example of a building of a Higher school	68
I.A. Loskutov, S.A. Reznichenko. Threats to information security of state corporations of the Russian Federation	74
N.H. Mamedov. Modeling an optimal supply chain management system in transport systems	82
T.V. Meshcheryakova, E.A. Rogozin, A.O. Efimov, V.R. Romanova, S.A. Konovalenko. Methodical approach to quantitative assessment of the risks of the implementation of threats unauthorized access to an information resource automated systems of internal affairs bodies	91
A.A. Hvostov, V.I. Ryazhskikh, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach. Mathematical support of the drying process as a pre – stage of the new generation CAD dryers design	104
Building and Architecture	116
L.A. Baragunova, M.M. Shogenova. Stability of multispans rods	116
A.M. Kaziev, Z.R. Likhov, A.Ya. Dzhankulaev, I.Yu. Kumyshev, G.A. Shigalugov. Combination of dynamic and kinematic vector perturbations of beams	123
M.N. Kokoev, V.T. Fedorov. Mobile Complex for the Production of Expanded Clay for the Northern Roads	133
T.K. Kurbatova, N.A. Raktovich, R.A. Petrov. Problems of formation of comfortable lighting of pedestrian zones on Kubanskaya Str. in Astrakhan	140
S.G. Sheina, D.K.-S. Bataev, M.M. Maloroev, P.D. Bataeva. Materials and technologies for the restoration of tower-type objects	146
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Peculiarities of operation of large-span beam structures ..	152
Formatting requirements for papers	161

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.315.592

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-6-13

Оригинальная статья /Original Paper

Улучшение тепловых свойств прибора в процессе формирования контакта
с коллекторной областью кремниевого транзистора

Э. Казалиева, А.Р. Шахмаева

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

Резюме. Цель. Целью исследования является улучшение тепловых свойств прибора за счет надежности контакта кристалла полупроводникового транзистора к корпусу и воспроизводимости технологического процесса. **Метод.** Применен способ получения многослойной металлизации обратной стороны кристалла и выбраны наиболее оптимальные технологические режимы его формирования. Проведена проверка параметров надежности присоединения кристалла к корпусу транзистора. **Результат.** Получена послойная металлизация, которая обеспечивает получение прочного контакта с коллекторной областью транзистора и надежную посадку кристалла на основание корпуса. Контроль технологических операций показал 100% распределение припоя по поверхности кристалла, отсутствие пор в припое, улучшение выходных характеристик прибора и повышение процента выходных годных транзисторов. **Вывод.** Для создания надежного контакта и отвода тепла от коллекторного перехода силовых полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин необходимо сформировать металлизацию за один технологический цикл, состоящую из четырех слоев металлов (Cr-Ni-Sn-Ag). Техническим результатом исследований является повышения качества посадки за счет получения равномерного распределения слоя металлов Cr-Ni-Sn-Ag в едином технологическом цикле.

Ключевые слова: металлизация, оптимизация, припой, полупроводниковый транзистор, кристалл, напыление, контакт, коллектор, надежность, корпус

Для цитирования: Э. Казалиева, А.Р. Шахмаева. Улучшение тепловых свойств прибора в процессе формирования контакта с коллекторной областью кремниевого транзистора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(3):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-6-13

Improving the thermal properties of the device in the process of forming
a contact with the collector region of a silicon transistor

E. Kazaliev, A.R. Shakhmaeva

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

Abstract. Objective. The objective of the study is to increase the reliability of the contact of the semiconductor transistor crystal to the body and the reproducibility of the technological process. **Method.** A method for obtaining multilayer metallization of the reverse side of the crystal has been developed and the most optimal technological modes of its formation have been selected. The parameters of the reliability of the connection of the crystal to the body of the transistor were checked. **Results.** Layer-by-layer metallization has been obtained, which provides a strong contact to the collector region of the transistor and a reliable fit of the crystal to the base of the case. The control of technological operations showed 100% distribution of solder over the surface of the crystal, the absence of pores in the solder, the improvement in the output characteristics of the device and the increase in the percentage of output usable transistors. **Conclusion.** An analysis of the experimental results showed that in order to create a reliable contact and remove heat from the collector junction of power semiconduc-

tor transistors on the reverse side of the plates, it is necessary to form a metallization in one technological cycle, consisting of four layers of metals (Cr-Ni-Sn-Ag). The technical result of the research is to improve the quality of fit by obtaining a uniform distribution of the layer of Cr-Ni-Sn-Ag metals in a single technological cycle.

Keywords: metallization, optimization, solder, semiconductor transistor, crystal, deposition, contact, collector, reliability, package

For citation: E. Kazalieva, A.R. Shakhmaeva. Improving the thermal properties of the device in the process of forming a contact with the collector region of a silicon transistor. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 6-13. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-6-13

Введение. В технологии производства электротехники широко используются многослойные тонкопленочные системы со слоями микронных и субмикронных толщин, полученные вакуумным, магнетронным или электролитическим осаждением. Среди них никель - золото- или серебросодержащие системы можно выделить в особую многочисленную группу, так как антикоррозийные свойства драгметаллов и их высокая электропроводность обуславливают широкое применение этих металлов в качестве слоя, выполняющего функции проводника. При этом слой никеля используется в качестве диффузионного барьера между адгезионным слоем и драгметаллом.

Стабильность свойств таких слоев в полной мере не изучена. Исследования стабильности системы Cr-Ni-Cu-Au с толщинами соответственно – 0,04-7,0-1,0-3,0 (мкм), полученная электролитическим осаждением, показали, что никель не является эффективным барьером для диффузии меди в слой золота и при повышенных температурах (более 600 К) система остается стабильной лишь в течение нескольких минут [1, 2, 8-9, 13].

В производстве полупроводниковых приборов с повышением требований к точности и надежности приборов ужесточаются требования к контактам. Без знания функциональных свойств покрытий и их зависимости от различных факторов, от условий их осаждения трудно прогнозировать надежность контакта.

Важным этапом в технологическом процессе полупроводниковых приборов является контроль параметров тонких металлических пленок – скорости напыления, толщины, ее равномерности и поверхностного сопротивления.

При нанесении тонких пленок очень важно соблюдать электронно-вакуумную гигиену. Загрязнения в виде примесных химически активных газов, попадающих на поверхность обрабатываемых подложек, могут существенно изменять структуру и электрофизические свойства наносимых слоев. Оседание мельчайших частиц пыли может привести к необратимому браку – обрывам и замыканиям межсоединений. Поэтому оборудование для нанесения тонких пленок устанавливают в чистых комнатах.

Наиболее практически существенная сторона взаимодействия пленки с материалом подложки – это адгезия. Именно, адгезия определяет возможность применения тех или иных материалов в пленочной структуре, и при отсутствии надежной адгезии пленка может отслаиваться при дальнейшем прохождении структур по технологическому циклу либо при эксплуатации [3,6,10,17].

Постановка задачи. На базе научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств при Дагестанском государственном техническом университете были проведены экспериментальные работы по посадке мощных транзисторов с различной технологией обработки и напыления обратной стороны пластин.

Анализ статистических данных показал зависимость брака транзисторных структур по электрическим параметрам от технологии обработки и напыления обратной стороны, а также от технологии посадки кристалла на основание корпуса ТО-218.

Анализ транзисторов, вышедших из строя в результате вторичного пробоя, показал, что он появляется из-за концентрации тока в пределах малых областей активной площади прибора, возникает проблема равномерного токораспределения по структуре и отвода выделяющего тепло в транзисторах.

Задачей исследований является разработка оптимальной технологии формирования слоя Cr-Ni-Sn-Ag и посадки кристалла на основание корпуса, обеспечивающих надежную работу полупроводникового прибора [4,18-20].

Методы исследования. Исследован способ соединения полупроводникового кристалла с кристаллодержателем, сущность которого заключается в напылении на обратную сторону пластин слоя металлов Cr-Ni-Sn-Ag. Для дальнейшего контакта между поверхностями кристалла и кристаллодержателя размещают припойную прокладку оловянно-свинцовую, нагревают детали до формирования паяного соединения.

Данный метод обеспечивает качество паяного соединения и термостабилизацию полупроводниковых приборов, увеличивая надежность работы полупроводниковых приборов.

Обсуждение результатов. Рассмотрены способы формирования многослойной металлизации обратной стороны кристалла и разработана оптимальная технология четырехслойной металлизации обратной стороны кремниевых пластин, обеспечивающая высокую надежность работы полупроводникового прибора [11-12].

Одним из параметров, контролируемых при получении контактов, является адгезия. Высокой адгезией к полупроводниковым материалам обладают переходные металлы. К ним относятся хром, титан, молибден, железо. Они обладают высокой адгезией. Адгезия еще увеличивается при напылении на подогретую подложку.

Однако материал напыляемой пленки не должен диффундировать внутрь полупроводника как дополнительная примесь. Выше перечисленные переходные металлы применяются для создания надежной металлизации, при этом они еще имеют высокое удельное сопротивление. Каждый выбранный материал может выполнить функции: защитные, барьерные, припойные, адгезионные и т.д.

В процессе производства полупроводниковых приборов после металлизации обычно проводят посадку кристалла, в случае если металлизация сформулирована даже из примесей нескольких металлов, включая благородные, коррозия паяного соединения может развиваться быстрее и разрушает контакт даже без воздействия агрессивных сред [15-16].

Поэтому барьерным слоем выбирают никель. По подслою никеля обычно применяют покрытие золота и серебра. В некоторых случаях многие покрытия быстро теряют паяемость при неблагоприятных условиях хранения и загрязненности. К атмосферным воздействиям устойчивы покрытия из олова, сплава золото-никель. Однако, покрытие из золота экономически невыгодно [14, 21-22].

На границе припой - золото на приборе могут появляться зоны хрупкого покрытия, разрушающегося при эксплуатации приборов.

Покрyтия серебром могут растворяться в припое с образованием Ag_3Sn . В настоящее время считается, что добавка в припой серебра способствует повышению прочности паяных соединений.

Для получения прочного, надежного монтажа полупроводникового кристалла необходимо создать на пластине адгезивного, барьерного, защитного, хорошо взаимодействующего с припоем слоя.

В проведенных экспериментальных работах исследования технологических режимов напыления металлов на обратную сторону пластин привели к определенным числовым значениям толщин каждого слоя более оптимальным, с точки зрения качества монтажа кристалла [1, 5].

Одним из первых слоев послойной металлизации обратной стороны пластин нами выбран хром, необходимый для получения прочной механической адгезии с кремнием. Толщина

пленки хрома может составлять 650 ± 50 Å. Исследования показали, что допустимая толщина пленки хрома должна быть менее 300 Å, иначе возможна неравномерность толщины пленки на различных участках. Напротив, наращивание пленки более 700 Å ухудшает электрические и теплопроводные характеристики кремниевых структур.

Вторым слоем послойной металлизации выбран слой никеля, пленки которой используются для покрытия обратной стороны пластин, характеризующиеся высоким уровнем механических напряжений.

При получении хорошей адгезии наносимой пленки необходимо выполнение требований по высокой чистоте обрабатываемых поверхностей пластин относительно углеводородных загрязнений на границах раздела кремний – хром, пленка хрома – пленка никеля. А для выполнения условий хорошей смачиваемости на границе пленка никеля – пленка олова, необходима высокая чистота этой границы. Эти условия являются наиболее критичными для четырехслойной металлизации.

Толщина пленки никеля составляет 5500 ± 500 Å. Напыление никеля происходит при низком вакууме порядка 10^{-5} Па, так как никель хорошо окисляется при обычном давлении, после окисления его восстановить невозможно.

Третьим слоем выбрано олово, толщина слоя которого находится в пределах 700 ± 250 Å. Напыление олова необходимо для исключения окисления пленки никеля при проникновении кислорода через пленку серебра. Олово и серебро после посадки кристалла расплавляются, и припой будет контактировать с никелем.

Четвертым слоем выбрано серебро, с толщиной 4500 ± 500 Å.

Полученное сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение прочного омического контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание, которое приводит к уменьшению сопротивления омического перехода, что увеличивает процент выхода годных приборов.

Итак, для создания надежного контакта и отвода тепла от коллекторного перехода мощных транзисторов на обратной стороне пластин необходимо сформировать металлизацию за один технологический цикл, состоящую из четырех слоев.

Толщины пленок металлов должны соответствовать следующим значениям: первый слой хром с толщиной 650 ± 50 Å, второй слой никель с толщиной 5500 ± 500 Å, третий слой олово с толщиной 700 ± 250 Å, четвертый слой серебро с толщиной 4500 ± 500 Å.

Измерение толщины пленки металла проводился на профилометре марки Alpha-Step.

Основными контролируемыми параметрами при проведении экспериментов на определение оптимальных технологических режимов на получение заданных толщин являются: мощность катода, скорость движения полета, давление вакуума в камере.

Толщина напыляемой пленки зависит от задаваемых значений мощности и скорости движения полета оборудования.

Эксперимент проводили на установке «LEYBOLD AG Z-600». Время предварительной очистки пластин в блоке плазмотравления устанавливаем на 1 мин.

Расход аргона $-185 - 220$ см³/ч, давление вакуума в камере 5×10^{-3} мбар.

На установке были установлены соответствующие катоды, рассчитанные согласно техническому описанию на следующие мощности: из хрома – 2 кВт, из никеля – 10 кВт, из олова – 2 кВт, из серебра – 4 кВт.

Нагрузка катода на полную мощность нежелательна из причины долговечности оборудования, поэтому значение мощности ограничиваем до 50 % для катодов из хрома, никеля, серебра и до 85 % для катода из никеля, в связи с большой величиной толщины пленки никеля.

Определяем зависимость толщины напыляемой пленки от мощности катода и скорости движения полета для каждого металла (рис. 1- 4).

Для получения качественного напыления при минимальных затратах времени нужно выбрать такой интервал значений, чтобы значение мощности не превышало бы 50% от максимально возможной из соображений долговечности оборудования.

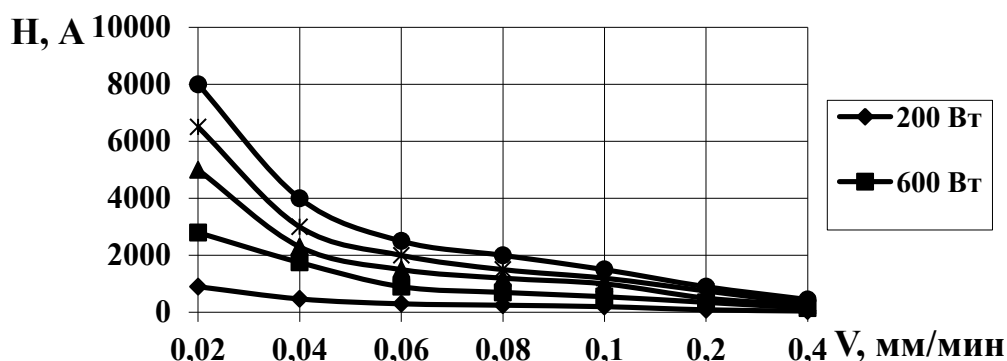


Рис. 1. Зависимость толщины пленки хрома от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig. 1. Dependence of the chromium film thickness on the flight speed at different cathode power

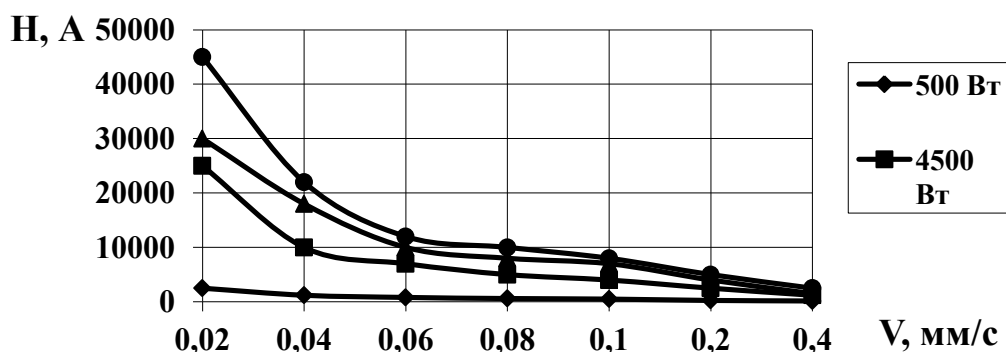


Рис. 2. Зависимость толщины пленки никеля от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig. 2. Dependence of the nickel film thickness on the flight speed at different cathode power

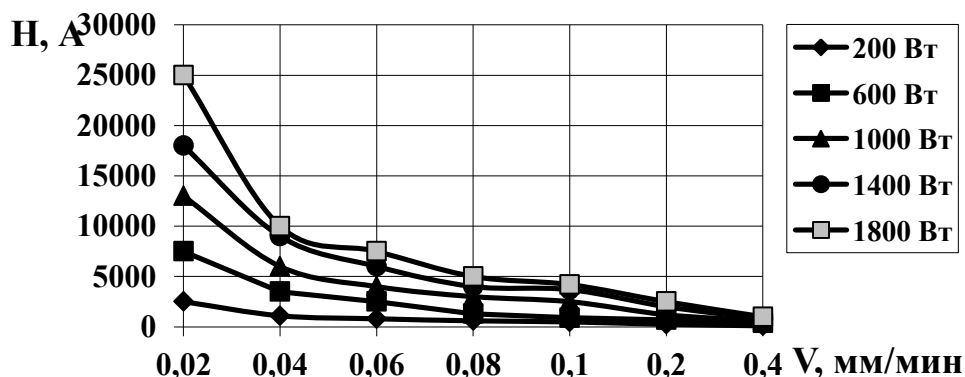


Рис. 3. Зависимость толщины пленки олова от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig. 3. Dependence of the tin film thickness on the flight speed at different cathode power

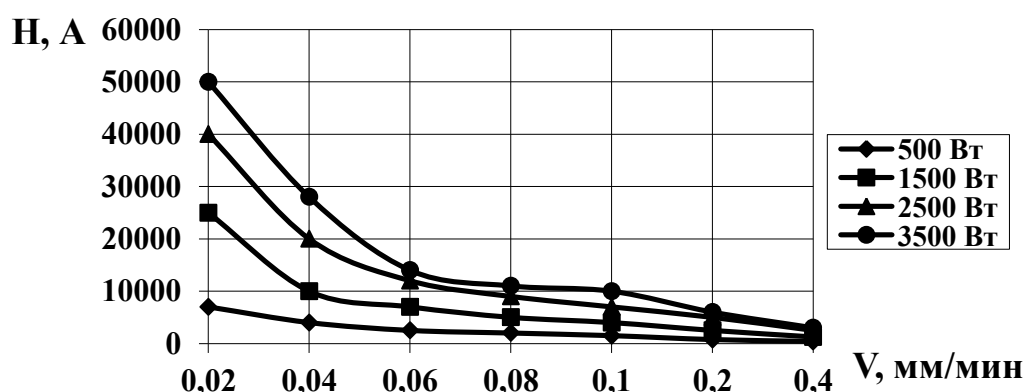


Рис. 4. Зависимость толщины пленки серебра от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig. 4. Dependence of the silver film thickness on the flight speed at different cathode power

В табл. 1 представлены оптимальные варианты напыления четырех металлов хром-никель-олово-серебро в едином технологическом цикле для формирования контакта к коллекторной области при изготовлении мощных транзисторов.

Таблица 1. Оптимальные варианты напыления металлов (Cr-Ni-Sn-Ag)

Table 1. Optimal options for metal deposition (Cr-Ni-Sn-Ag)

Слой Layer	Толщина (Å) Thickness	Максимальная мощность катодов (кВт) Maximum cathode power		Скорость движения полета (мм/мин) Speed movements flight
		Задаваемая, Вт Asked	% от макс. as % of max.	
Хром Chromium	650±50	600	30	0,1
Никель Nickel	5500±500	4500	45	0,08
Олово Tin	700±250	600	30	0,2
Серебро Silver	4500±500	1500	37,5	0,1

Вывод. Исходя из полученных данных, можно сформулировать следующий вывод: толщина пленки металла зависит от задаваемых значений мощности катода и скорости движения полета. Чем больше мощность катода и меньше скорость движения полета, тем толщина пленки возрастает и, наоборот, чем меньше мощность катода и больше скорость движения полета, тем толщина пленки металла уменьшается.

Результаты экспериментальных работ в ходе исследования показали, что для создания надежного омического контакта и отвода тепла от коллекторного перехода силовых полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин необходимо сформировать металлизацию за один технологический цикл, состоящую из четырех слоев металлов. Техническим результатом исследований является повышения качества посадки за счет получения равномерного распределения слоя Cr-Ni-Sn-Ag в едином технологическом цикле.

Библиографический список:

1. Аносов В.С., Гомзиков Д.В., Ичетовкин М.И., Сейдман Л.А., Тычкин Р.И. Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20. № 1. С. 51-59.
2. Ануфриев Л.П., Емельянов В.А., Кушнер Л.К. и др. // Повышение качества сборки и монтажа интегральных схем // Электронная промышленность. 1990. № 5. С. 11-12.
3. Аронов В.Л., Федотов Я.А. // Испытание и исследование полупроводниковых приборов // Учеб. пособие для специальностей полупроводниковой техники вузов. М.: Высш. шк., 1975. С. 325.
4. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Бордюжа О.Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства. - Минск: Изд-во "Интеграл", 1997. С.390.

5. Громов Д.Г., Мочалов А.И.// Материалы и процессы формирования систем металлизации кремниевых интегральных схем// Уч. пособие. М.: МИЭТ, 2006. С. 180.
6. Зенин В.В., Колычев А.И., Мешеряков М.В., Спиридонов Б.А.// Никелевые покрытия траверсов корпусов для монтажа изделий электронной техники// Физическое металловедение: Сб. науч. тр. Липецк: Изд-во ЛЭГИ, 2000. С. 111-117.
7. Зенин В.В., Сегал Ю.Е., Бокарев Д.И.// Пайка кристаллов в изделиях силовой электроники // Интеллектуальные информационные системы: Тез. докл. науч. техн. конф., 23-25 июня 1999 г. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. С. 221-222.
8. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Транзисторные структуры силовой электроники. СПб. Политехника, 2011. С. 125.
9. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р.//Экспериментальное исследование и оптимизация технологического процесса формирования контакта к коллекторной области кремниевых транзисторов// Базовые процессы формирования активных областей структуры мощных кремниевых транзисторов. СПб.: Политехника, 2009. С. 11.
10. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Юсуфов Ш.А., Казалиева Э. //Метод формирования контактного слоя титан-германий для термостабилизации транзисторов// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4): 49-56. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56/
11. Казалиева Э.// Металлизация обратной стороны кремниевой пластины// Сб. трудов по материалам IV Международного конкурса научно-исследовательских работ. Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки. Уфа, "НИИЦ Вестник науки". 2021. С. 35-38.
12. Казалиева Э.// Посадка кристаллов транзистора на основание корпуса// Сб. трудов по материалам XXIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ-2022». Москва: МГУ, 2022.
13. Климачев И.И., Литвинова Т.В., Сидоренко С.И. Исследование стабильности системы Cr-Cu-Ni-Au, со слоями, полуженными электролитическим осаждением. Микроэлектроника. 1994, Т.23. Вып.2. С. 91-95.
14. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988.
15. Патент РФ № 2375787. Способ посадки кремниевых кристалла на основание корпуса/ Т.А. Исмаилов, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева. Оpubл.10.12.2009. Бил. №34.
16. Патент РФ № 2442243. Транзистор на основе полупроводникового соединения / Ерофеев Е.В., Кагадей В.А., Анищенко Е.В., Арыков В.С., Ишуткин С.В., Носаева К.С. №2 010144198. Заявл. 28.10.2010. Оpubл. 10.02.2012.
17. Сегал Ю.Е., Зенин В.В., Фоменко Ю.Л.// Покрyтия контактных поверхностей кристаллов и корпусов ИЭТ // Петербургский журнал электроники. 2000. № 1. С. 45-51.
18. Сенько С.Ф., Белоус А.И., Плебанович В.И.// Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов. Патент на изобретение RU 2333568 C1, 10.09.2008. Заявка №200614979/28 от 04.12.2006.
19. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1987. С. 464.
20. Шахмаева А.Р. Оптимизация технологии посадки кристалла кремниевых транзистора на основание корпуса // Проектирование и технология электронных средств, 2006. №4. С. 26-27.
21. Ivanova, Yu. A., Ivanou, D.K., Fedotov A.K. et al. Electrochemical deposition of Ni and Cu onto monocrystalline n-Si(100) wafers and into nanopores in Si/SiO₂ template // J. Mater. Sci. 2007. V. 42. P. 9163.
22. Pat. 3785892 US. Method of forming metallization backing for silicon wafer / Terry L.E., Wilson R.W. – 1972.

References:

1. Anosov V.S., Gomzikov D.V., Ichetovkin M.I., Seydman L.A., Tychkin R.I. Issledovaniye protsessov izgotovleniya kremniyevykh kristallov tranzistorov v ikh korpuse. [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki] *News of higher educational institutions. Materials of electronic engineering*. 2017; 20(1): 51-59. (In Russ)
2. Anufriyev L.P., Yemel'yanov V.A., Kushner L.K. i dr. Povysheniye kachestva sborki integral'nykh skhem [Elektronnaya promyshlennost'] *Electronics industry* 1990; 5: 11-12. (In Russ)
3. Aronov B.Yu., Fedotov Ya.A. Testing and research of semiconductor devices. Proc. allowance for the specialties of semiconductor technology of universities. M.: Higher. School 1975; 325. (In Russ)
4. Gorlov M.I., Anufriyev L.P., Bordyuzha O.L. ensuring and improving the reliability of semiconductor and integrated circuits in the process of serial production. Minsk: *Integral Publishing House* 1997; 390.
5. Gromov D.G., Mochalov A.I. Materials and processes of formation of metallization systems for silicon integrated circuits. *Uch. allowance. M.: MIET* 2006; 180. (In Russ)
6. Zenin V.V., Kolychev A.I., Mesheryakov M.V., Spiridonov B.A. Nickel coatings of traverses of housings for mounting electronic products. *Physical metallurgy: Sat. scientific tr. Lipetsk: Izd-vo LEGI* 2000; 111-117. (In Russ)
7. Zenin V.V., Segal Yu.E., Bokarev D.I. Soldering of crystals in power electronics products // Intelligent information systems: Abstracts. report scientific tech. Conf., June 23-25, 1999. Voronezh: *VGTU Publishing House* 1999; 221-222. (In Russ)
8. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R. Transistor structures of power electronics. *St. Petersburg Polytechnic* 2011; 125. (In Russ)
9. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R. Experimental study and optimization of the technological process of forming a contact to the collector region of silicon transistors. Basic processes for the formation of active regions of the structure of high-power silicon transistors. *SPb.: Politehnika* 2009; 11. (In Russ)
10. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Yusufov Sh.A., Kazalieva E. //Method of forming a titanium-germanium contact layer for thermal stabilization of transistors. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science*. 2020; 47(4):49-56. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56 (In Russ)
11. Kazalieva E. Metallization of the reverse side of the silicon wafer// Sat. works based on the materials of the IV International competition of scientific research works. Fundamental and applied aspects of the development of modern science. Ufa, "SIC Bulletin of Science" 2021;35-38. (In Russ)

12. Kazalieva E. Planting transistor crystals on the base of the case. Sat. works based on the materials of the XXIX International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "LOMONOSOV-2022". Moscow: Moscow State University, 2022. (In Russ)
13. Klimachev I.I., Litvinova T.V., Sidorenko S.I. Study of the stability of the Cr-Cu-Ni-Au system, with layers obtained by electrolytic deposition. *Microelectronics*. 1994; 23(2): 91-95. (In Russ)
14. Lashko S.V., Lashko N.F. Soldering of metals. 4th ed., revised. and additional M.: Mashinostroenie, 1988. (In Russ)
15. Patent of the Russian Federation No. 2375787. Method of planting a silicon crystal on the base of the housing / T.A. Ismailov, B.A. Shangereeva, A.R. Shakhmaev. Published on 10.12.2009. Bill. No. 34. (In Russ)
16. RF patent No. 2442243. Transistor based on a semiconductor compound / Erofeev E.V., Kagadey V.A., Anishchenko E.V., Arykov B.C., Ishutkin S.V., Nosaeva K.S. No. 2 010144198. Appl. 10/28/2010. Published 02/10/2012. (In Russ)
17. Segal Yu.E., Zenin VV, Fomenko Yu.L. Coatings of contact surfaces of crystals and IET cases. *Petersburg Journal of Electronics*. 2000; 1: 45-51. (In Russ)
18. Senko S.F., Belous A.I., Plebanovich V.I.A method of manufacturing a metallization system for silicon semiconductor devices. Patent for invention RU 2333568 C1, 10.09.2008. Application No. 200614979/28 dated 12/04/2006. (In Russ)
19. Chernyaev V.N. Technology for the production of integrated circuits and microprocessors: Textbook for universities. 2nd ed., revised. and additional M.: *Radio and communication*. 1987; 464. (In Russ)
20. Shakhmaeva A.R. Optimization of the technology of planting a silicon transistor crystal on the base of the case. *Design and technology of electronic means*. 2006; 4: 26-27. (In Russ)
21. Ivanova, Yu. A., Ivanou, D.K., Fedotov A.K. et al. Electrochemical deposition of Ni and Cu onto monocrystalline n-Si(100) wafers and into nanopores in Si/SiO₂ template *J. Mater. sci*. 2007; 42:9163.
22. Pat. 3785892 US. Method of forming metallization backing for silicon wafer. *Terry L.E., Wilson R.W.* 1972.

Сведения об авторах:

Казалиева Эльмира, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; kazanova.em@mail.ru.

Шахмаева Айшат Расуловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; fpk12@mail.ru.

Information about the authors:

Elmira Kazalieva, Post-graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; kazanova.em@mail.ru.

Aishat R. Shakhmaeva, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; fpk12@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.08.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 10.09.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 10.09.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-14-23

Оригинальная статья /Original Paper

**Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для лечения
заболеваний пародонта методом локальной гипотермии**

С.Г.Магомедова¹, О.В.Евдулов¹, Р.А.-М.Магомадов², Т.Э.Саркаров¹, Д.А.Магомедов¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Грозненский государственный нефтяной технический университет

им. М.Д. Миллионщикова,

²364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, д. 100, Россия

Резюме. Цель. Целью научной работы является экспериментальное исследование термоэлектрической системы (ТЭС) для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии. **Метод.** Описан экспериментальный стенд и методика проведения измерений опытных образцов термоэлектрической системы для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии. Экспериментальный стенд выполнен на основе измерительного оборудования лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». В первом варианте ТЭС два термоэлектрических модуля (ТЭМ) непосредственно сопрягаются с имитатором области пародонта через силиконовую прослойку, а во втором - тепловой контакт термомодуля с ним производится через специальную высокотеплопроводную насадку. **Результат.** Получены графики зависимости изменения во времени температуры контрольных точек опытных образцов ТЭС для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии при различных токах питания ТЭМ. Контрольными точками являлись холодные и горячие спаи ТЭМ, имитатор области пародонта, теплоотводы от горячих спаев термомодулей. **Вывод.** В результате измерений установлено, что добиться требуемого уровня понижения температуры области пародонта возможно при использовании стандартных ТЭМ фирмы ООО «Криотерм» (г. Санкт-Петербург) типа ТВ-17-1.4-1.15 и DRIFT-1,2. Продолжительность выхода образцов на режим в первом случае составляет 230 с., а во втором - 320 с. Ухудшение динамических характеристик второго варианта устройства связано с наличием высокотеплопроводной насадки. В результате натурных испытаний показано, что применение для отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ принудительного воздушного и жидкостного охлаждения является достаточным для соблюдения требуемых температурных режимов гипотермии.

Ключевые слова: пародонт, гипотермия, термоэлектрическая система, термоэлектрический модуль, экспериментальный стенд, методика измерений, температура, натурные испытания

Для цитирования: С.Г. Магомедова, О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов, Т.Э., Саркаров, Д.А. Магомедов. Экспериментальные исследования термоэлектрической системы для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(3):14-23. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-14-23

**Experimental studies of thermoelectric system for treatment periodontal disease
by local hypothermia**

S.G.Magomedova¹, O.V.Evdulov¹, R.A.-M.Magomadov², T.E.Sarkarov¹, D.A.Magomedov¹

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

²M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

²100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 2364051, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the article is an experimental study of a thermoelectric system (TES) for the treatment of periodontal diseases by the method of local hypothermia. **Method.** An experimental stand and a technique for measuring prototypes of TEC for the treatment of periodontal diseases by the method of local hypothermia are described. The experimental stand is made on the basis of the measuring equipment of the laboratory of semiconductor thermoelectric devices and devices of the FSBEI HE "Dagestan State Technical University". In the first version of the TES, two thermoelectric modules (TEMs) are directly mated with the simulator of the periodontal area through a silicone layer, and in the second, thermal contact between the thermomodule and it is made through a special highly thermally conductive nozzle. **Result.** Graphs of the time dependence of the temperature change of the control points of the experimental samples of thermal power plants for the treatment of periodontal diseases by the method of local hypothermia at various TEM supply currents were obtained. The control points were the cold and hot junctions of the TEM, periodontal simulator, heat sinks from the hot junctions of thermal modules. **Conclusion.** As a result of the measurements, it was found that it is possible to achieve the required level of decrease in the temperature of the periodontal area using standard TEMs of the Kryotherm LLC (St. Petersburg) type TV-17-1.4-1.15 and DRIFT-1.2. In this case, the duration of the output of the samples to the regime in the first case is 230 s, and in the second - 320 s. The deterioration of the dynamic characteristics of the second version of the device is associated with the presence of a highly thermally conductive nozzle. As a result of full-scale tests, it was shown that the use of forced air and liquid cooling to remove heat from TEM hot junctions is sufficient to comply with the required temperature regimes of hypothermia.

Key words: periodontium, hypothermia, thermoelectric system, thermoelectric module, experimental stand, measurement technique, temperature, natural tests.

For citation: S.G. Magomedova, O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov, T.E. Sarkarov, D.A. Magomedov. Experimental studies of thermoelectric system for treatment periodontal disease by local hypothermia. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 14-23. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-14-23

Введение. В настоящее время в стоматологической практике при лечении заболеваний пародонта и всей полости рта все большее распространение получают методы локального замораживания пораженных зон вплоть до 240 К [1-4]. Это обусловлено их высокой эффективностью при лечении таких заболеваний как стоматит, гингивит, пародонтит, лимфаденит, периодонтит, пульпит, трофические язвы полости рта, многоформная экссудативная эритема и др. Положительный эффект достигается противовоспалительным, противоотечным и анестезирующим действием локальной гипотермии, снижением проницаемости сосудистых стенок и стимулированием процессов регенерации тканей, а также восстановлением микроциркуляции крови [5-7].

Для проведения процедур, связанных с локальной гипотермией в стоматологии используются специальные криосистемы, работающие на основе жидкого азота и других хладагентов, а также компрессорные холодильники [8-10]. Их недостатками являются необходимость обязательного наличия криоагента, находящегося в специальном хранилище; значительные габаритные размеры; невозможность использования различных температурных режимов при проведении воздействия.

Постановка задачи. В этих условиях, несмотря на то, что применение локальной гипотермии в стоматологии имеет широкие возможности благодаря перечисленным преимуществам, на сегодняшний день техническая реализация такого воздействия остается на недостаточном уровне. Поэтому представляет интерес разработка новой аппаратуры для реализации лечебных процедур, связанных с локальным охлаждением области пародонта. В качестве таких технических средств перспективным является использование термоэлектрических приборов и устройств, позволяющих с высокой эффективностью осуществлять локальное замораживание [11, 12]. Приборы данного типа отличаются высокой надежностью работы, малыми габаритными

ми размерами и высокой экологичностью, практически неограниченным ресурсом эксплуатации [13-16].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование термоэлектрической системы (ТЭС) для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии.

Методы исследования. Для экспериментального исследования ТЭС, используемой при локальной гипотермии области пародонта, разработан измерительный стенд, структурная схема которого показана на рис.1.

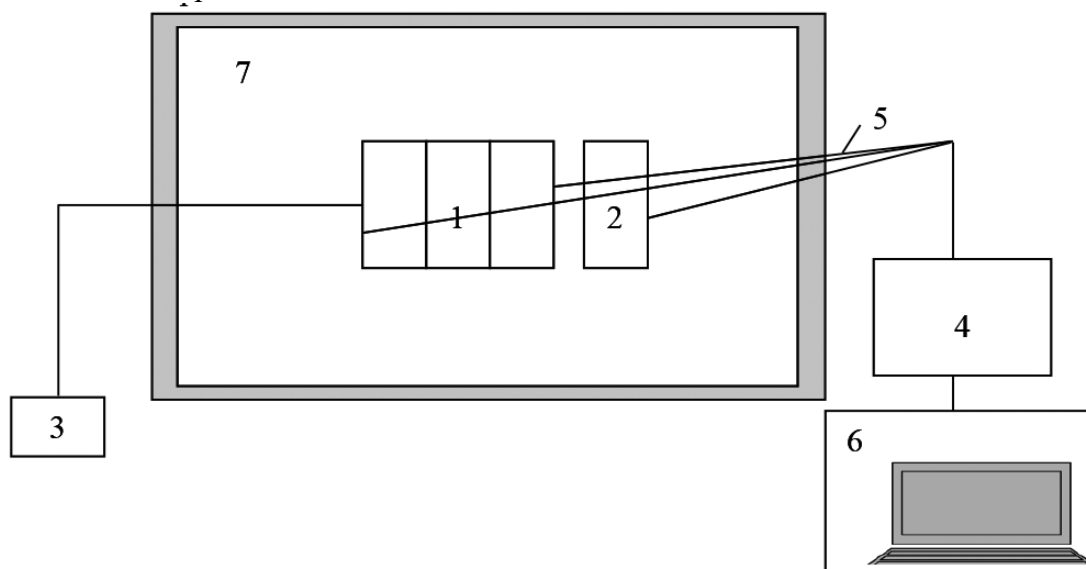


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда для проведения натурных испытаний ТЭС, осуществляющей локальную гипотермию области пародонта

Fig. 1. Structural diagram of the experimental stand for field testing of TPP, which performs local hypothermia of the periodontal area

В состав стенда входят опытный образец ТЭС 1, имитатор области пародонта 2, регулируемый источник постоянного электрического тока 3 для питания ТЭС электрической энергией, измерительная аппаратура, включающая в себя многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/МЗ 4, термопары 5, ПЭВМ 6. Исследования проводились в климатической камере 7 с возможностью регулирования значений температуры и влажности внутри ее рабочего объема.

При проведении экспериментальных исследований ТЭС рассматриваются ее два конструктивных варианта, в первом из которых ТЭС непосредственно сопрягается с имитатором области пародонта через силиконовую прослойку, а во втором тепловой контакт термомодуля с ним производится через специальную высокотеплопроводную насадку.

В первом конструктивном варианте в качестве источника холода применялись два ТЭС типа ТВ-17-1.4-1.15, во втором - ТЭС типа DRIFT-1,2 (производитель обоих типов ТЭС ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург).

Для отвода теплоты от горячих спаев ТЭС ТВ-17-1.4-1.15 использовалась система принудительного воздушного охлаждения, а для термомодуля DRIFT-1,2 - система принудительного жидкостного охлаждения.

Структура обеих конструкций ТЭС показана на рис.2, где 1 - ТЭС, 2 - тепловыравнивающая пластина, 3 - силиконовая прослойка, 4 - система принудительного воздушного охлаждения, 5 - система принудительного жидкостного охлаждения, 6 - высокотеплопроводная насадка.

Нахождение обеих теплоотводящих систем при эксплуатации прибора предполагается вне полости рта. Размеры контакта поверхности имитатора области пародонта и ТЭС составляют 30 на 15 мм, толщина высокотеплопроводной насадки, изготовленной из меди в виде усеченной пирамиды - 25 мм, толщина тепловыравнивающей пластины из меди - 1 мм, толщина силиконовой прослойки - 2 мм, параметры обоих типов ТЭС приведены в [17].

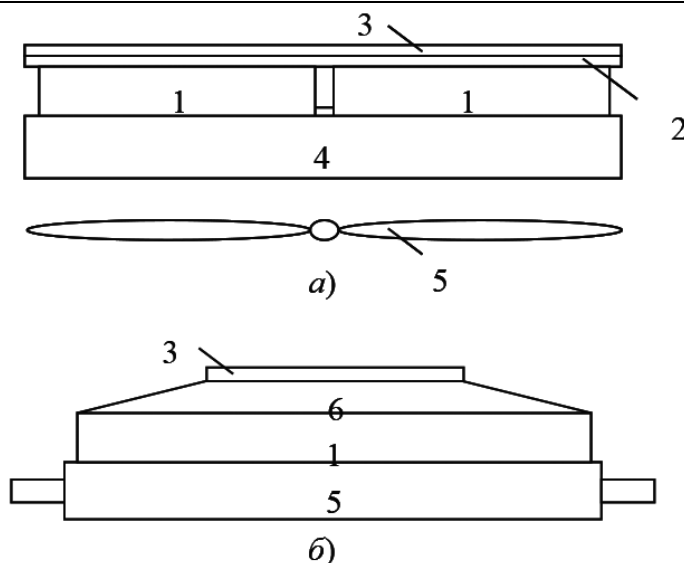


Рис. 2. Конструкция опытных образцов ТЭС для локальной гипотермии области пародонта: а - при использовании двух ТЭМ типа ТВ-17-1.4-1.15; б - при использовании ТЭМ типа DRIFT-1, 2
Fig. 2. Design of TES prototypes for local hypothermia of the periodontal area a - when using two TEMs of the TV-17-1.4-1.15 type; b - when using TEM type DRIFT-1, 2

В качестве имитатора области пародонта использовалась модель с интактными зубами GF-E02 (производитель - компания GF Dental, Италия) [18]. При этом тепловое воздействие осуществлялось на ее переднюю поверхность.

В качестве источника постоянного электрического тока использовался генератор электрической энергии Instek PSН-3630 (производитель - компания GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD., Тайвань) мощностью 1100 Вт и выходным током питания 30 А. Значение силы тока питания и напряжения фиксировались встроенными в генератор амперметром и вольтметром.

Для измерения температуры применен многоканальный измеритель температуры ИРТМ 2402/М3Ех-2 (производитель - компания НПП «Элемер», Россия). Количество каналов подключения - 24, точность измерения температуры - не более 0,5 К. Выход измерителя температуры подключался к ПЭВМ, где с помощью соответствующего интерфейса отслеживалось изменение температуры в контрольных точках во времени. Непосредственно определение температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами, подключаемыми ко входу прибора ИРТМ 2402/М3Ех-2.

В качестве контрольных точек рассматривались поверхности холодных и горячих спаев ТЭМ, имитатора области пародонта, высокотеплопроводной насадки, систем воздушного и жидкостного теплоотвода. Также контролировалась температура внутри климатической камеры, значение которой обеспечивалось на уровне 309,6 К.

Перед проведением эксперимента осуществлялась проверка надежности тепловых и электрических контактов. Опыты проводились сериями по четыре эксперимента при равнозначных условиях в соответствии с методикой измерений, описанной в [19].

Обсуждение результатов. На основе измерительного стенда для проведения экспериментальных исследований опытного образца ТЭС для локальной гипотермии области пародонта, описанного в предыдущем параграфе, был проведен ряд опытов, на основе которых можно определить рабочие параметры системы, а также соответствие разработанной математической модели практике. К задачам, решаемым в процессе эксперимента, относилось измерение температуры в контрольных точках исследуемой ТЭС и имитатора области пародонта во времени при различных токах питания ТЭМ. Также осуществлялось сравнение полученных результатов с данными расчета путем вычисления разности полученных величин и определения характеристик, отражающих точность эксперимента.

В качестве определяющих условий при проведении эксперимента задавались следующие параметры: максимальный уровень снижения температуры поверхности имитатора области пародонта - 240 К, температура внешней среды -309,6 К, точность поддержания температуры - 0,5 К, температура воды в жидкостной системе отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ - 298 К. На рис.3 представлены графики изменения во времени температуры поверхности имитатора области пародонта, контактирующей с ТЭС для первого конструктивного варианта системы при токах питания ТЭМ 6, 7 и 7,9 А.

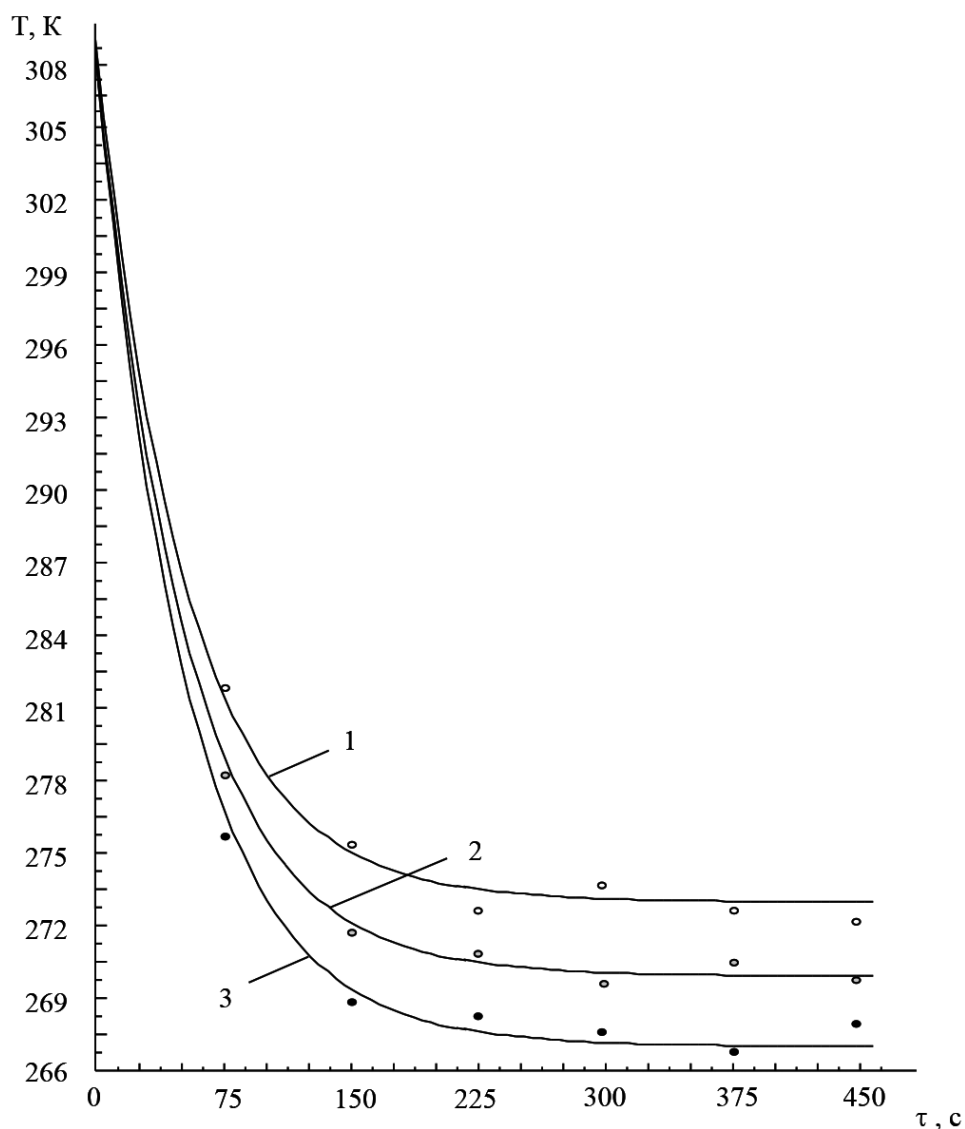


Рис. 3. Изменение температуры поверхности имитатора области пародонта во времени для различных значений $I_{ТЭМ}$ (первая конструкция) 1- $I_{ТЭМ}=6$ А, 2- $I_{ТЭМ}=7$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=7,9$ А
Fig. 3. Change in the surface temperature of the periodontal area simulator in time for different values of $I_{ТЭМ}$ (first design) 1- $I_{ТЭМ}=6$ А, 2- $I_{ТЭМ}=7$ А, 3- $I_{ТЭМ}=7.9$ А

На рис.4 аналогичные зависимости для второго конструктивного варианта системы для токов питания ТЭМ 5,5, 6,5, 7,5 А. В соответствии с представленными данными при таких величинах тока питания термомодулей температура поверхности имитатора области пародонта снижается в первом случае до 267 К, 270 К и 273 К, во втором - до 242 К, 247,5 К и 251 К. При этом, длительность выхода поверхности имитатора области пародонта на стационарный режим работы для первого конструктивного варианта ТЭС соответствует полученным ранее результатам математического моделирования и составляет примерно 230 с.

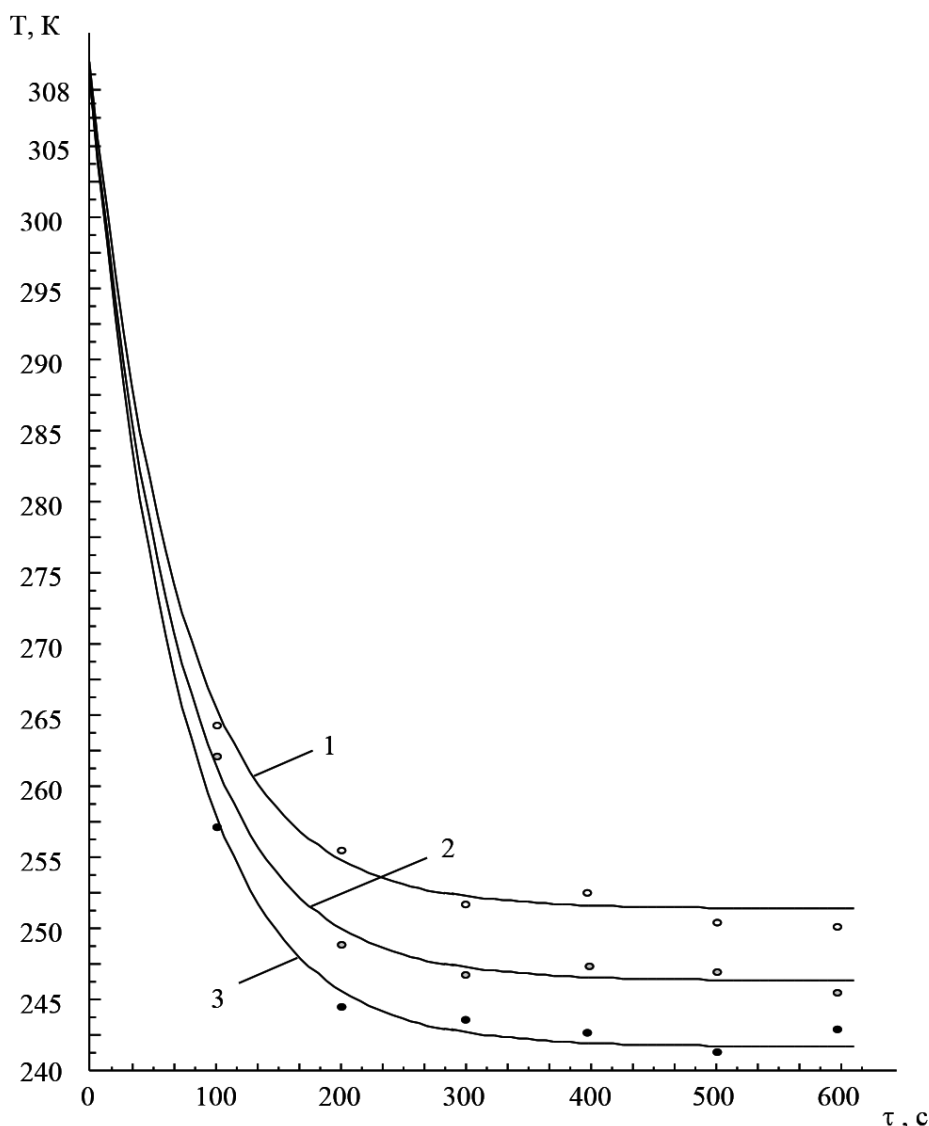


Рис. 4. Изменение температуры поверхности имитатора области пародонта во времени для различных значений $I_{ТЭМ}$ (вторая конструкция): 1- $I_{ТЭМ}=5,5$ А, 2- $I_{ТЭМ}=6,5$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=7,5$ А
Fig.4. Change in the surface temperature of the periodontal area simulator in time for different values of I_{TEM} (second design): 1- $I_{TEM}=5.5$ A, 2- $I_{TEM}=6.5$ A, 3- $I_{TEM}=7.5$ A

Для второй конструкции ТЭС на продолжительность выхода прибора на рабочий режим оказывает существенное влияние наличие медной насадки, которая имеет относительно большие габаритные размеры по сравнению со всей системой. В данном случае время выхода на стационарный режим поверхности имитатора области пародонта составляет порядка 320 с. Снизить это время возможно путем подбора соответствующей конструкции насадки, которую можно, например, изготавливать не в виде цельнометаллической усеченной пирамиды, а в виде некоторого оребренного стержня, полый конструкции, имеющей внутреннюю и внешнюю оребренные поверхности, сотовую структуру и т. п. Также в качестве высокотеплопроводной насадки может выступать тепловая труба, имеющая минимальные тепловые потери по своей длине [20].

В качестве общих мер по уменьшению длительности выхода прибора на режим могут быть использованы следующие мероприятия: использование мощных ТЭМ, обладающих повышенными инерционными параметрами; предварительное питание электрической энергией ТЭМ до начала проведения процедур с целью использования ТЭС уже работающей в своем оптимальном режиме; применение форсированного режима работы термомодулей, например,

начиная с режима максимальной холодопроизводительности и продолжая режимом максимального холодильного коэффициента; использование каскадных ТЭМ относительно высокой мощности. Для оценки распределения температуры по структуре ТЭС, а также определения теплового сопротивления между холодной поверхностью устройства и имитатором области пародонта проведено ее измерение на холодных и горячих сторонах системы, имитаторе биологического объекта. На рис.5 (первый конструктивный вариант ТЭС) и рис.6 (второй конструктивный вариант ТЭС) представлены графики изменения во времени этих величин при токах питания соответственно 7,9 и 7,5 А.

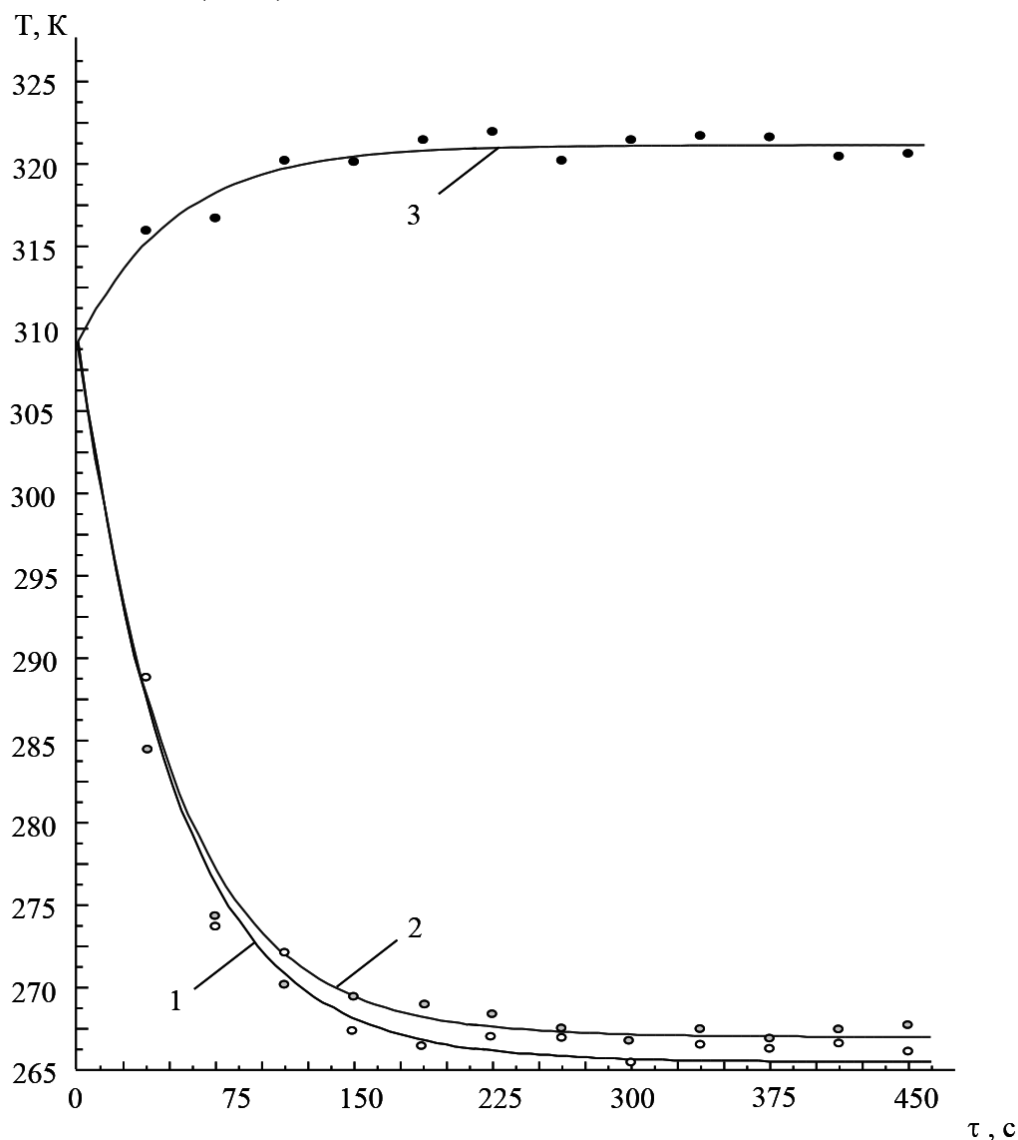


Рис. 5. Изменение температуры в различных точках системы ТЭС (первая конструкция) - имитатор области пародонта во времени для $I_{ТЭМ}=7,9$ А 1 - холодная поверхность ТЭС, 2 - имитатор области пародонта, 3 - горячая поверхность ТЭС

Fig. 5. Temperature change at various points of the TES system (first design) - simulator of the periodontal area in time for $I_{ТЭМ} = 7.9$ A 1 - cold surface of the TES, 2 - simulator of the periodontal area, 3 - hot surface of the TES

Исходя из результатов измерений следует, что перепад температур между холодными поверхностями ТЭС и имитатором биологического объекта составляет порядка 1,5 К. Такая разница температур связана с наличием силиконовой прослойки между поверхностями контакта устройства и имитатора области пародонта, а также внешними теплопритоками.

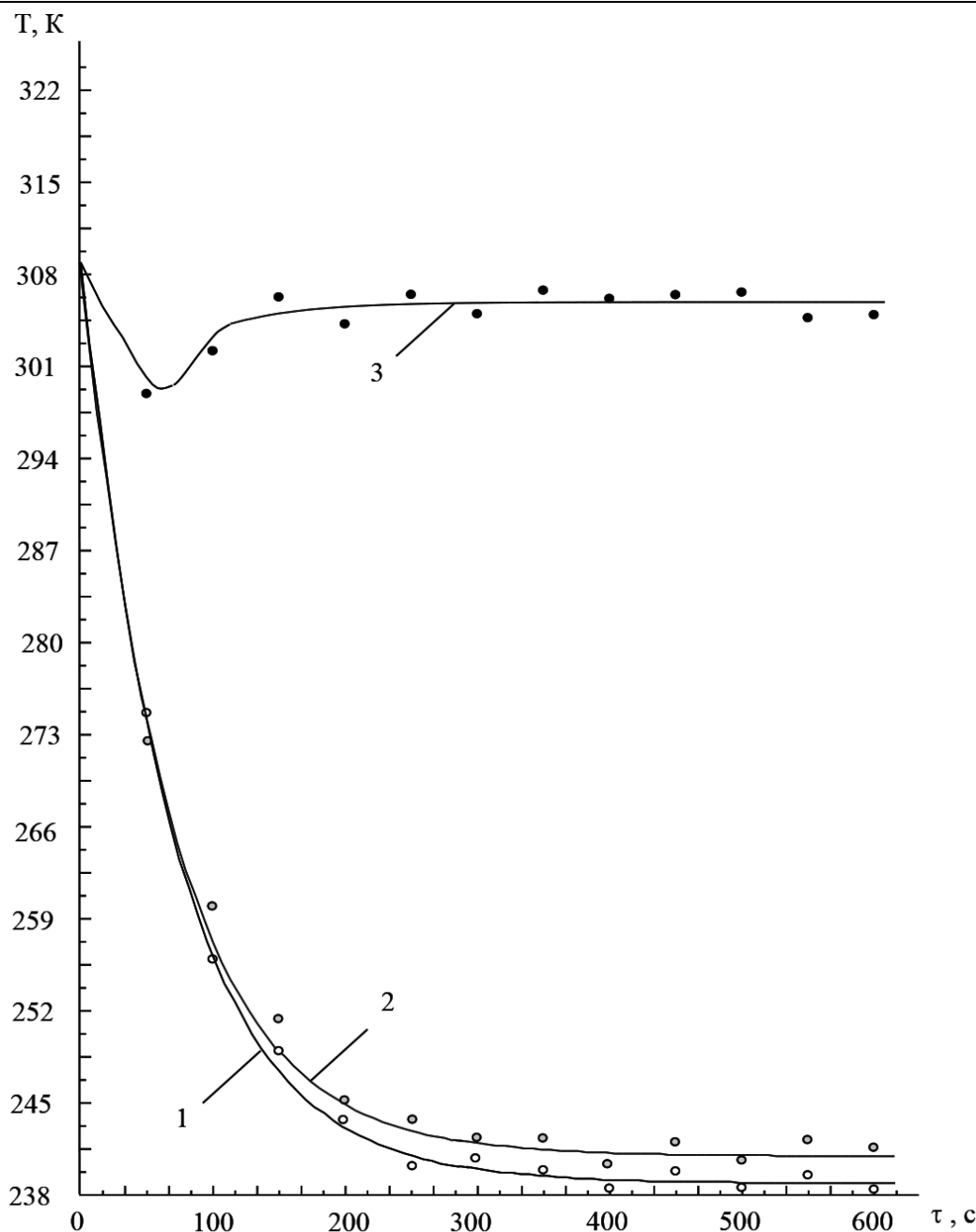


Рис. 6. Изменение температуры в различных точках системы ТЭС (вторая конструкция) - имитатор области пародонта во времени для $I_{ТЭМ}=7,5$ А 1 - холодная поверхность ТЭС, 2 - имитатор области пародонта, 3 - горячая поверхность ТЭС

Fig. 6. Temperature change at various points of the TES system (second design) - periodontal area simulator in time for $I_{ТЭМ} = 7.5$ A 1 - cold TPP surface, 2 - periodontal simulator, 3 - hot TPP surface

Представляет интерес ход температуры горячих спаев ТЭМ (соответствует их горячим поверхностям) в зависимости от конструкции системы. В первом случае воздушная система теплосъема находилась внутри климатической камеры, поэтому наблюдалось плавное увеличение температуры горячих спаев термомодулей до выхода в стационарный режим. Во втором случае применялась жидкостная система теплосъема при температуре воды 298 К. В данном случае температура горячих спаев ТЭМ сначала уменьшалась в течение примерно 60 с, а затем, также как и в первом случае, плавно увеличивалась до стационарного значения. Из результатов измерений следует, что значение температуры горячих спаев ТЭМ находится в приемлемых пределах вплоть до максимальной величины токов питания как для воздушной, так и для жид-

костной системы охлаждения, и не превышает 321 К. Данное обстоятельство определяет достаточно эффективный теплосъем в рассматриваемых условиях с горячих спаев ТЭМ и дает основание полагать о надежной работе разработанной системы.

Помимо оценки температурных потерь при сопряжении ТЭС и поверхности области пародонта через силиконовую пленку в результате проведения эксперимента также определялись потери теплоты по высокотеплопроводной насадке, используемой во втором конструктивном варианте прибора. Отслежено изменение во времени температуры по центральной оси насадки через каждые 6 мм при токе питания ТЭМ 7,5 А. Согласно измеренным данным температура, начиная от холодных спаев ТЭМ, в насадке увеличивается приблизительно на 0,6 К на каждые 6 мм. Таким образом, потери по ней в общем составляют примерно 2,5 К. Меры для снижения теплового сопротивления насадки описаны выше и заключаются в уменьшении габаритных размеров и повышении теплопроводности ее структуры теми или иными методами и приспособлениями.

Вывод. Разработаны и экспериментально исследованы 2 конструктивных варианта опытного образца ТЭС для лечения заболеваний пародонта методом локальной гипотермии, дающих возможность осуществлять его замораживание вплоть до уровня температур 240 К с высокой точностью регулировки температурных уровней.

В результате измерений установлено, что добиться требуемого уровня понижения температуры области пародонта возможно при использовании стандартных ТЭМ. При этом продолжительность выхода образцов на режим в первом случае составляет 230 с., а во втором - 320 с. Ухудшение динамических характеристик второго варианта устройства связано с наличием высокотеплопроводной насадки. В результате натурных испытаний показано, что применение для отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ принудительного воздушного и жидкостного охлаждения является достаточным для соблюдения требуемых температурных режимов гипотермии.

Библиографический список:

1. Данилина, Е.В. Локальная гипотермия в комплексном лечении заболеваний пародонта у беременных женщин с железодефицитной анемией / Е.В. Данилина, В.Ф. Михальченко, А.Г. Петрухин // Здоровье и образование в XXI веке. - 2012. - Т. 14, №7. - С.141-142.
2. Рабинович, С.А. Эффективность применения криотерапии при комплексном стоматологическом лечении / С.А. Рабинович, В.Ф. Прикул, Е.И. Шлыкова // Стоматология. - 2013. - № 4. - С. 78-81.
3. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
4. Papapanou, P.N. The prevalence of periodontitis in the US: forget what you were told / P.N. Papapanou // Journal of dental research. - 2012. - Vol.91. - P. 907-908.
5. Kassebaum, N.J. Global burden of severe periodontitis in 1990-2010: a systematic review and meta-regression / N.J. Kassebaum, [et al.] // Journal of dental research. - 2014. - Vol.93. - P. 1045-1053.
6. Тирская, О.М. Физиотерапевтическое лечение заболеваний пародонта / О.М. Тирская, В.Д. Молоков, А.В. Виноградова. - Иркутск: ИГМУ, 2015. - 34 с.
7. Боголюбов, В.М. Техника и методики физиотерапевтических процедур / В.М. Боголюбов, [и др.]. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
8. 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.
9. Цыганов, Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты / Д.И. Цыганов. - М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. - 304 с.
10. Будрик, В.В. Основы криотерапии, криохирургии и криоконсервации / В.В. Будрик. - М: Лика, 2014. - 190 с.
11. Евдулов, О.В. Моделирование теплофизических процессов при умеренном криовоздействии на зону пародонта с использованием термоэлектрической охлаждающей системы / О.В. Евдулов, С.Г. Магомедова, Э.А. Джабраилова // Эндодонтия Today. - 2020. - №18 (2). - С. 81-86.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

16. Евдулов, О.В. Термoeлектрическая 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.
17. <http://kryotherm.spb.ru> (дата доступа 12.09.2022).
18. <https://www.gfdental.it> (дата доступа 12.09.2022).
19. Атрошенко Ю.К., Е.В. Иванова. Теплотехнические измерения и приборы. Томск: ТПУ, 2014. 151 с.
20. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.

References:

1. Danilina E.V. Local hypothermia in the complex treatment of periodontal diseases in pregnant women with iron deficiency anemia / E.V. Danilina, V.F. Mikhilchenko, A.G. Petrukhin // Health and education in the XXI century. 2012; 14(7):141-142. (In Russ)
2. Rabinovich, S.A. The effectiveness of cryotherapy in complex dental treatment / S.A. Rabinovich, V.F. Prikuls, E.I. Shlykova. *Dentistry*. 2013; 4: 78-81. (In Russ)
3. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual *New York: Springer*, 2015; 441.
4. Papapanou P.N. The prevalence of periodontitis in the US: forget what you were told. *Journal of dental research*. 2012; 91: 907-908.
5. Kassebaum, N.J. Global burden of severe periodontitis in 1990-2010: a systematic review and meta regression / N.J. Kassebaum, [et al.] *Journal of dental research*. 2014; 93: 1045-1053.
6. Tirskaia, O.M. Physiotherapeutic treatment of periodontal diseases / O.M. Tirskaia, V.D. Molokov, A.V. Vinogradova. - *Irkutsk: IGMU*, 2015; 34. (In Russ)
7. Bogolyubov V.M. Technique and methods of physiotherapeutic procedures [i. etc.]. *M.: Binom*, 2017; 464. (In Russ)
8. Baranov A.Yu., A.V. Vasilenok, E.V. Sokolova, S.D. Chubova, A.M. Ziyavidinov Choice of an alternative cryoagent to cover the heat load in the installation for general cryo-therapeutic exposure. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2022; 1:76-82. (In Russ)
9. Tsyganov, D.I. Cryomedicine: processes and devices / D.I. Tsyganov. *M.: SCIENCE PRESS*, 2011; 304. (In Russ)
10. Budrik, V.V. Fundamentals of cryotherapy, cryosurgery and cryopreservation. - *M: Lika*, 2014;190. (In Russ)
11. Evdulov O.V., S. G. Magomedova, E.A. Dzhabrailova. Modeling of thermophysical processes with moderate cryoinfluence on the periodontal zone using a thermoelectric cooling system. *Endodontics Today*. 2020;18 (2): 81-86. (In Russ)
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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)
16. 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 Daghestan State Technical University. Technical Science* 2019; 46(1): 32-41. (In Russ)
17. <http://kryotherm.spb.ru> (accessed 09/12/2022).
18. <https://www.gfdental.it> (accessed 12.09.2022).
19. Atroshenko Yu.K., E.V. Ivanova. Thermotechnical measurements and devices. *Tomsk: TPU*, 2014; 151 (In Russ)
20. Theory of heat and mass transfer / Under. ed. A.I. Leontiev. *M.: MSTU im. N.E. Bauman*, 2018; 464. (In Russ)

Сведения об авторах:

Магомедова Сарат Гусеновна. соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; saratmag05@yandex.ru.

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

Магомадов Рустам Абу-Муслимович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электропривода; rustmag_80@mail.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.

Information about authors:

Sarat G. Magomedova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; saratmag05@yandex.ru.

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

Rustam A.-M. Magomadov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Electrical Engineering and Electric Drive; rustmag_80@mail.ru.

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

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 15.08.2022.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 29.08.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.1.016.001.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31

Обзорная статья / Review article

Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике

А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование вопроса использования наножидкостей в качестве теплоносителей для повышения эффективности отвода тепла в энергетических установках. Для решения поставленной задачи были проанализированы материалы отечественных и зарубежных научных статей, конференций и диссертаций касательно тематики наножидкостей. Многочисленные научные публикации, в том числе цитируемые в международных базах данных Web of Science и Scopus, свидетельствуют о том, что тематика наножидкостей находится в фокусе внимания современной науки. Однако, несмотря на достаточно длительный период исследования флюидов, не все вопросы данной тематики достаточно хорошо освещены и систематизированы, что открывает большие возможности для дальнейших исследований в этом направлении. **Метод.** При достижении поставленной цели рассмотрены области возможного применения флюидов, механизм их синтеза, особенности их эксплуатации, обозначены достоинства как жидкого теплоносителя, а также выявлены недостатки, препятствующие их широкому применению. Особое внимание уделено таким вопросам как: синтез стандартизированных наножидкостей; обеспечение их стабильных свойств; использование поверхностно-активных веществ; увеличение перепада давления внутри теплообменных аппаратов при эксплуатации теплоносителя. **Результат.** Для устранения основного недостатка в виде агломерации наночастиц в базовой жидкости предложено использовать колебательную циркуляцию теплоносителя, которая также позволит дополнительно интенсифицировать теплообмен от принудительной турбулизации флюида. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы теплообменных аппаратов с жидким теплоносителем и систем на их основе, а также для снижения массогабаритных параметров таких устройств.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, наножидкость, нанопорошок, базовая жидкость, теплоемкость, теплопроводность, нестабильность наножидкостей, агломерация наночастиц, импульсная циркуляция теплоносителя

Для цитирования: А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин. Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):24-31. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31

Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering

A.N. Makeev, Y.A. Kiryukhin

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to study the use of nanofluids as heat carriers to increase the efficiency of heat removal in energy facilities. To solve this problem, materials of domestic and foreign scientific articles, conferences and dissertations on the subject of nanofluids were analyzed. Numerous scientific publications, including those cited in the international databases Web of Science and Scopus, indicate that the topic of nanofluids is in the focus of modern science. However, despite a rather long period of fluid research, not all issues of this topic are sufficiently well covered

and systematized, which opens up great opportunities for further research in this direction. **Method.** When achieving this goal, the areas of possible application of fluids, the mechanism of their synthesis, the features of their operation are considered, the advantages as a liquid coolant are indicated, and the disadvantages that prevent their widespread use are identified. Particular attention is paid to such issues as: synthesis of standardized nanofluids; ensuring their stable properties; the use of surfactants; increasing the pressure drop inside heat exchangers during operation of this coolant. **Result.** To eliminate the main drawback in the form of agglomeration of nanoparticles in the base fluid, it is proposed to use the oscillatory circulation of the coolant, which will also further intensify heat exchange from forced turbulence of the fluid. **Conclusion.** The results obtained can be used to improve the efficiency of heat and mass transfer devices with liquid coolant and systems based on them, as well as to reduce the weight and size parameters of such devices.

Keywords: heat transfer intensification, nanofluid, nanopowder, base fluid, heat capacity, thermal conductivity, nanofluid instability, nanoparticle agglomeration, coolant pulsed circulation.

For citation: A.N. Makeev, Y.A. Kiryukhin Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 24-31. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-24-31

Введение. Наножидкость - это жидкий теплоноситель, содержащий твердые частицы химически устойчивых металлов и/или оксидов, углеродные нанотрубки и т.п. размером от 1 до 100 нм, диспергированные в базовой жидкости, и характеризующийся улучшенными теплофизическими свойствами [1, 14].

В качестве базовой жидкости обычно выступают дистиллированная вода, спирты, этиленгликоль, машинное масло и т.п. В качестве суспензии для наножидкостей чаще всего используют: алюминий, железо, серебро, титан, цинк, кремний, магний, углеродные нанотрубки, графен, алмаз. Частицы могут быть представлены как в виде чистого элемента (Fe, Al, Ag), так и в виде оксидов одного или нескольких элементов (CuO , Al_2O_3 , NiFe_2O_4), сплавов (Ag-Cu, Cu-Zn), карбидов и нитридов металлов (SiC , TiN).

Выбор того или иного химического соединения, обуславливается определенной задачей, для которой создается флюид. Увеличение теплопроводности наножидкостей связывается с различными факторами. Прежде всего, это броуновское движение, которое является основным механизмом, определяющим тепловое поведение дисперсии наночастиц. Другая причина заключается в том, что молекулы жидкости, окружающие наночастицы, образуют слоистые структуры по принципу теплового моста между жидкостью и наночастицами [1-9].

В работе [10] приводится обобщение результатов различных исследований по изучению коэффициента теплопроводности и коэффициента вязкости для различных наножидкостей относительно свойств базовой жидкости. Там же отмечается, что максимальное улучшение теплопроводности на 36% относительно базовой жидкости достигается при использовании многослойных углеродных трубок (MWCNT) в дистиллированной воде. При использовании гибридной наножидкости на основе частиц Cu-TiO_2 , диспергированных в деионизированной воде, удалось увеличить теплопроводность базовой жидкости на 68%.

Стоит отметить, что, несмотря на довольно большое количество работ в этом направлении, общепринятой конечной модели описания теплопроводности наножидкостей на сегодняшний момент пока не существует. Однако отправной точкой многих исследователей является модель Максвелла, представляющая классическое описание для теплопроводности суспензий, которая была разработана в 1881 году. Она учитывает две фазы наножидкости и дает удовлетворительные результаты, когда добавленные в базовую жидкость частицы неподвижны, имеют сферическую форму и объемную концентрацию до 25%. В 1935 году Бруггеман предложил уточненную модель, которая может быть применена к суспензиям любой концентрации, а в 1962 году Гамильтон и Кроссер модифицировали модель Максвелла для систем, содержащих несферические частицы [11-15].

Уравнения, основанные на данных моделях, много раз модифицировались с целью повышения точности их решения, однако такие факторы, как конвекция, вызванная электрофорезом, естественная конвекция, вызванная частицами, термофорез и другие явления, все еще не рассматриваются и препятствуют действительной оценке теплопроводности наножидкостей [1].

Постановка задачи. Интенсификация процессов теплообмена - одна из важнейших задач современной энергетики [5]. С ростом научно-технического уровня оперируемая мощность энергосиловых установок повышается, а массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов, входящих в их состав, увеличиваются. Поэтому в перспективе необходимости использования высоких удельных мощностей возникает комплексная задача интенсивного отвода теплоты от этих установок при уменьшении их геометрических размеров и массы. Одним из возможных путей решения данной проблемы может стать использование наножидкостей в качестве теплоносителя, который характеризуется относительно высоким коэффициентом теплопроводности.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи были проанализированы материалы отечественных и зарубежных научных статей, конференций и диссертаций по тематике наножидкостей. Информация из русскоязычных статей была получена благодаря научным библиотекам eLIBRARY и КиберЛеника. Для доступа к научным публикациям, цитируемым в международных базах данных Web of Science и Scopus, использована система управления библиографической информацией Mendeley. Написание самой научной публикации выполнено с применением библиографического менеджера Zotero. Результаты научных исследований, представленные авторами указанных публикаций, систематизированы и использованы для получения собственных выводов и прогнозов по использованию наножидкостей с учетом собственных разработок.

Обсуждение результатов. Различают два способа получения наножидкостей - одностадийный и двухстадийный. В первом случае, наночастицы непосредственно производятся и распределяются в базовой жидкости в течение одного технологического цикла при помощи химических методов и методов испарения в жидкости [15]. Во втором случае сначала получают наночастицы, затем добавляют их в базовую жидкость, а затем полученную таким образом смесь подвергают разным методам диспергирования.

Наилучшим считается одностадийный метод, поскольку в этом случае возможно получение и растворение более мелких наночастиц, а вероятность их агломерации в таких флюидах достаточно мала. Однако двухстадийный метод представляет наибольший практический интерес, так как транспортировка сухого нанопорошка к месту непосредственного использования наножидкости значительно проще и дешевле, чем готовой наножидкости. Для двухстадийного метода обычно используют частицы на основе оксидов металлов, так как наножидкости на их основе получаются более устойчивыми к агломерации [16].

Возможно использование сразу нескольких компонентов суспензии, взвешенных в базовой жидкости - это продвинутая категория наножидкостей. Основной подход к их использованию заключается в получении преимуществ над однокомпонентными наножидкостями за счет увеличения теплопередачи. Так в работе [10] зафиксировано максимальное повышение теплопередачи на 68% при использовании частиц Cu-TiO₂ в деионизированной воде.

Численное исследование гибридной наножидкости на основе Al₂O₃-Cu и воды в условиях ламинарного течения в прямой трубе [9] показало улучшение теплопроводности на 4,73% по сравнению с наножидкостью с использованием только Al₂O₃ при той же объемной концентрации наночастиц в базовой жидкости.

Диспергирование. Как было сказано выше, особенность получения наножидкостей предполагает равномерное распределение наночастиц в объеме базовой жидкости. Для этой цели чаще всего используют обработку ультразвуком, когда перемешивание наночастиц осуществляется воздействием на них волн определенной частоты, которое приводит к диспергиро-

ванию взвешенных частиц [15]. Создаваемые ультразвуковым воздействием быстро меняющиеся напряжения сжатия и растяжения в жидкости создают разрывающие усилия и обеспечивают кавитацию, которая способствует активному диспергированию частиц в объеме базовой жидкости.

Такими образом, диспергирование наночастиц в базовой жидкости возможно только при определенной интенсивности генерируемых ультразвуком колебаний, которая в каждом случае индивидуальна и зависит как от кавитационной прочности самой базовой жидкости, так и от сил взаимодействия между отдельными частицами твердой фазы.

Согласно [17] оптимальная интенсивность воздействия для разных базовых жидкостей может принимать значения от 1,73 до 34,4 Вт/см² (табл.1).

Таблица 1. Значения оптимальных интенсивностей воздействия для различных сред, используемых на практике

Table 1. Values of optimal exposure intensities for various media used in practice

Наименование жидкости Liquid name	Начальная вязкость, Па·с Initial viscosity	Оптимальная интенсивность, Вт/см ² Optimal intensity
Вода Water	0,00082	1,73
Оливковое масло Olive oil	0,085	4,51
Моторное масло ПМС-400 Engine oil PMS-400	0,4	19,25
Глицерин Glycerol	0,6	34,4
Эпоксидная смола ЭД-5 Epoxy resin ED-5	3	19,95...24,77
Трехфункциональный олигоэфирциклокарбонат на основе окиси пропилена Trifunctional oligoethercyclocar- bonate based on propylene oxide	4	11,92...23,4
Водоугольная суспензия (массовая концентрация 20%) Water-coal suspension (wt. owl concentration 20%)	0,1	13,74...18,74

Для диспергирования также используют метод магнитной мешалки. Принцип такого метода основан на воздействии вращающегося магнитного поля на ведомый элемент, погруженный в емкость с жидкостью и наночастицами.

Стабилизация. Долгосрочная стабильность дисперсии наночастиц является одним из элементарных требований к применению наножидкостей, поскольку от нее напрямую зависит долгосрочность теплофизических характеристик (сохранение высокой теплопроводности) и предотвращение роста вязкости и образования застойных зон в рабочем оборудовании.

Дело в том, что наночастицы практически всегда образуют агломерации из-за существенного эффекта Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий. Как правило, решением данной проблемы является приложение внешней силы к кластеризованным коллоидным наночастицам,

модификация их поверхности добавлением поверхностно-активных веществ и изменение pH среды наножидкостей.

В случае добавления поверхностно-активных веществ получающиеся химические соединения концентрируются на поверхности раздела фаз, вызывая снижение сил поверхностного натяжения. Кроме того, они способствуют изменению теплофизических свойств. Например, согласно [8] наножидкость с добавлением 0,5% графитовых нанотрубок обеспечивала увеличение теплопроводности на 3,8%, в то время как при той же объемной концентрации наночастиц с добавлением поверхностно-активных веществ в виде гуммиарабики обеспечивало увеличение теплопроводности на 25,7% относительно базовой жидкости. В исследовании [6] было рассмотрено добавление лаурилсульфата натрия в качестве стабилизатора, что также привело к увеличению теплофизических свойств гибридной наножидкости на основе алюминия и серебра на 16%.

Для устранения такого негативного эффекта как агломерация наночастиц авторами научной статьи [7] предлагается использовать вибрацию поверхности теплопередачи. В подтверждение приводятся результаты экспериментальных исследований, согласно которым наножидкость на основе углеродных трубок демонстрирует увеличение коэффициента теплопередачи в двухтрубном теплообменнике на 100% при уровне электродинамической вибрации 9 м/с^2 .

Особо следует подчеркнуть, что использование вибраций и колебаний поверхности теплообмена или же самого теплоносителя, содержащего наночастицы, может быть использовано для дополнительной интенсификации теплообмена [18].

Исследования в области применения наножидкостей в теплообменниках в последние годы были очень активными, и большинство научных публикаций указывают на то, что такие флюиды могут повышать эффективность теплоэнергетических систем на их основе. Наножидкости обладают улучшенными теплофизическими свойствами (прежде всего, теплопроводность и теплоемкость) и могут являться альтернативным решением проблемы снижения габаритных размеров теплообменных аппаратов при увеличении их тепловых мощностей.

В научной статье [13] приводятся сведения о применении наножидкости на основе графитовых нанотрубок в кожухотрубных, пластинчатых и двухтрубных теплообменниках для улучшения характеристик теплообмена. Авторами научной статьи подчеркивается, что использование такой наножидкости в сопоставлении с наножидкостями на основе металлов дает наилучшие результаты, поскольку они обладают более высокой теплопроводностью.

В работе [11] представлены результаты исследования характеристик наножидкости на основе частиц Al_2O_3 и MgO , диспергированных в воде, и применяемой в качестве теплоносителя в теплообменнике типа «труба в трубе». Суть научной работы заключалась в том, что на внутреннюю трубу теплообменника накладывались обмотки различных типов: сходящихся (C), расходящихся (D) и сходящихся-расходящихся (C-D). Результаты показали, что число Нуссельта наножидкости с использованием проволоки D-типа, C-D-типа и C-типа улучшилось на 84, 47 и 57%, соответственно, в то время как соответствующие значения коэффициента трения составили 71, 68 и 46%, по сравнению с этим же теплоносителем в этом же теплообменнике, но без вставок на внутренней трубе.

Метод улучшения конвективной теплоотдачи наножидкости при стремлении к уменьшению перепада давления в компьютерной модели теплообменника типа «труба в трубе» рассмотрен в работе [3]. Флюид подвергался воздействию внешнего магнитного поля, вызывающего закручивание потока теплоносителя при его движении вдоль теплообменника. Результаты такого моделирования показали, что применение вращающегося магнитного поля позволило увеличить теплопередачу на 320%. Такой эффект объясняется тем, что создаваемый вихревой поток разрушает тепловой пограничный слой и, следовательно, улучшает перемешивание потока внутри теплообменного аппарата.

В последнее время также проводятся исследования эффективности применения наножидкостей в циклах ГТУ, в том числе и с промежуточным охлаждением [2]. В указанной научной работе показано, что наножидкость на основе графитовых нанотрубок увеличивает эффективность работы промежуточного теплоносителя на 1-2 % в диапазоне температур от 40 до 50 градусов соответственно. Авторами научной статьи также сообщается, что в условиях использования наножидкости в цикле ГТУ в качестве промежуточного теплоносителя, на процесс теплообмена влияет не только конструкция самого промежуточного охладителя и состав рабочей жидкости, но и температура газа на входе в этот охладитель. При ее повышении эффективность наножидкости также увеличивается.

Несмотря на свои улучшенные теплофизические свойства, наножидкости имеют и ряд недостатков, которые явно следуют из рассмотренных выше особенностей их получения и эксплуатации.

Первой проблемой является синтез стандартизированных по своим свойствам флюидов. Наночастицы в исходном состоянии часто характеризуются отклонением размеров в довольно большом диапазоне и не только у разных производителей, но и в различных партиях одного поставщика.

Другой проблемой является стабильность наножидкостей. Свойства их легко меняются и сильно зависят от внешнего воздействия. Кроме этого, агломерация самих наночастиц пагубно влияет на промышленное оборудование, так как их осаждение ведет к образованию застойных зон, сужению и закупориванию проходного сечения для циркуляции теплоносителя.

Вопрос о правильном выборе и оптимальной концентрации поверхностно-активных веществ, применяемых для стабилизации, также стоит очень остро, - с одной стороны добавки улучшают теплопроводность при одних температурах, а с другой стороны - способствуют образованию пены при отклонении от номинального диапазона температур, которая ведет к противоположному эффекту. Кроме того, необходимо проводить исследования коррозионного поведения поверхностно-активных веществ и наночастиц при поддержании надлежащего значения pH. В настоящее время этот вопрос обозначен многими исследователями и остается открытым [12].

Также, проведено мало экспериментальных работ по исследованию поведения наножидкостей при высоких температурах (выше 100 °C). Большинство доступных исследований в этой области применения являются теоретическими исследованиями, основанными на численном моделировании и прогнозах. При этом авторы ссылаются на сложность приготовления и обеспечения стабильной работы при таких условиях [4].

Использование таких флюидов как наножидкость в качестве рабочей жидкости теплообменников серьезно увеличивает перепад давления внутри них, главным образом из-за более высокой вязкости. Следовательно, говоря об эффективности использования таких флюидов, нужно также учитывать и мощность, потребляемую насосами для обеспечения их циркуляции. В этой связи ставится задача на нахождение оптимума «вязкость флюида - эффективность его работы в конкретной энергетической системе».

В зависимости от стоимости исходного сырья и метода получения наножидкостей, стоимость готового к применению флюида может достигать величины, которая сопоставима с затратами на эксплуатацию теплообменного оборудования на основе традиционных теплоносителей. Следовательно, количественные затраты на различные категории наножидкостей и требуемое для их создания оборудование в различных областях теплоэнергетики требуют дальнейших исследований и обоснования практического применения.

Вывод. Несмотря на отмеченные недостатки применение наножидкости - перспективная работа на стыке нанотехнологий и теплоэнергетики. Многочисленное количество научных работ в этом сегменте свидетельствует о том, что тематика наножидкостей находится в фокусе внимания современной науки. Учитывая последнее обстоятельство, важным моментом в перспективе масштабного применения наножидкостей может стать их использование в системах с

колебательной циркуляцией теплоносителя [19]. В таких системах циркуляция теплоносителя обеспечивается в импульсном или пульсирующем режиме, что, в условиях эксплуатации наножидкости позволит:

1. Снизить вероятность агломерации и осаждения наночастиц;
2. Отказаться от применения стабилизаторов-присадок, эффект влияния которых на теплопроводность жидкости вносит некоторую неопределенность в их применение;
3. Поддерживать стабильные свойства наножидкости в условиях постоянного активного перемешивания теплоносителя от использования эффекта прогнозируемого гидроудара;
4. Интенсифицировать теплообмен не только от применения самой наножидкости, но и от использования колебательной циркуляции теплоносителя.

Указанные преимущества, полученные в рамках теоретического анализа многочисленных научных публикаций, несомненно, требуют проведения дальнейших экспериментальных исследований в этом направлении, результаты которых будут изложены в последующих работах. В настоящий момент пока лишь стоит отметить, что на имя ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» подана заявка на изобретение №2022104706 от 22.02.2022 «Система солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения», где представлена техническая возможность эксплуатации наножидкости в режиме колебательной циркуляции [20].

Библиографический список:

1. Ali N., Teixeira J. A., Addali A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 6978130.
2. Almurtaji S. [и др.]. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Nanofluids on Marine Gas Turbine Intercooler Performance *Nanomaterials*. 2021; 11: 2300.
3. Bezaatpour M., Goharkhah M. Convective heat transfer enhancement in a double pipe mini heat exchanger by magnetic field induced swirling flow. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 167: 114801.
4. Chavez Panduro E. A. [и др.]. A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211: 118346.
5. Gugulothu R. [и др.]. A Review on Enhancement of Heat Transfer Techniques. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4: 1051–1056.
6. Hormozi F., ZareNezhad B., Allahyar H. R. An experimental investigation on the effects of surfactants on the thermal performance of hybrid nanofluids in helical coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 78: 271–276.
7. Hosseini A., Meghdadi Isfahani A. H., Shirani E. Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coefficient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 90: 275–285.
8. Leong K. Y. The effect of surfactant on stability and thermal conductivity of carbon nanotube based nanofluids. *Thermal Science*. 2016; 20: 429–436.
9. Moghadassi A., Ghomi E., Parvizian F. A numerical study of water based Al₂O₃ and Al₂O₃–Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 92: 50–57.
10. Safiei W. [и др.]. Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020;74: 66–84.
11. Singh S. K., Sarkar J. Improving hydrothermal performance of hybrid nanofluid in double tube heat exchanger using tapered wire coil turbulator. *Advanced Powder Technology*. 2020;5 (31): 2092–2100.
12. Urmi W. [и др.]. Preparation Methods and Challenges of Hybrid Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 78:56–66.
13. Yu S.-P. [и др.]. Enhanced Heat Transfer Performance of the Tube Heat Exchangers Using Carbon-Based Nanofluids *Applied Sciences*. 2021;17 (11).
14. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика. - 2016. - Т. 19. - № 1. - С. 75-83.
15. Морозова, М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей: диссертация ... кандидата Физико-математических наук: 01.04.14 / Морозова Марина Анатольевна; [Место защиты: ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук], 2019.
16. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 1-15.
17. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.17.08 / Голых Роман Николаевич. – Бийск, 2014.
18. Галицкий Б. М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б. М. Галицкий, Ю. А. Рыжов, Е. В. Якуш. – М. : Машиностроение, 1977. – 256 с.
19. Макеев, А. Н. Импульсная система теплоснабжения общественного здания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Макеев. — Пенза, 2010. — 20 с.

20. Система солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения: заявка на выдачу патента на изобретение №2022104706 Рос. Федерация / ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» / заявл. 22.02.2022.

References:

1. Ali N., Teixeira J. A., Addali A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 6978130.
2. Almurtaji S. [и др.]. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Nanofluids on Marine Gas Turbine Intercooler Performance *Nanomaterials*. 2021; 11: 2300.
3. Bezaatpour M., Goharkhah M. Convective heat transfer enhancement in a double pipe mini heat exchanger by magnetic field induced swirling flow. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 167: 114801.
4. Chavez Panduro E. A. [и др.]. A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211: 118346.
5. Gugulothu R. [и др.]. A Review on Enhancement of Heat Transfer Techniques. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4: 1051–1056.
6. Hormozi F., ZareNezhad B., Allahyar H. R. An experimental investigation on the effects of surfactants on the thermal performance of hybrid nanofluids in helical coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 78: 271–276.
7. Hosseini A., Meghdadi Isfahani A. H., Shirani E. Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coefficient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 90: 275–285.
8. Leong K. Y. The effect of surfactant on stability and thermal conductivity of carbon nanotube based nanofluids. *Thermal Science*. 2016; 20: 429–436.
9. Moghadassi A., Ghomi E., Parvizi F. A numerical study of water based Al₂O₃ and Al₂O₃-Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 92: 50–57.
10. Safiei W. [и др.]. Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 74: 66–84.
11. Singh S. K., Sarkar J. Improving hydrothermal performance of hybrid nanofluid in double tube heat exchanger using tapered wire coil turbulator. *Advanced Powder Technology*. 2020; 5 (31): 2092–2100.
12. Urmi W. [и др.]. Preparation Methods and Challenges of Hybrid Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 78:56–66.
13. Yu S.-P. [и др.]. Enhanced Heat Transfer Performance of the Tube Heat Exchangers Using Carbon-Based Nanofluids *Applied Sciences*. 2021;17 (11).
14. Rudyak V. Ya., Minakov A.V., Krasnolutsky S. L. Physics and mechanics of heat transfer processes in nanofluid flows. *Physical mesomechanics*. 2016; 19(1): 75-83. (In Russ)
15. Morozova, M.A. Thermal conductivity and viscosity of nanofluids: dissertation ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.14 / Morozova Marina Anatolyevna; [Place of protection: S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences], 2019. (In Russ)
16. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. The mechanism of heat transfer in nanofluids: the current state of the problem (review). Part 1. Synthesis and properties of nanofluids. *Thermophysics and aeromechanics*. 2010; 17(1): 1-15. (In Russ)
17. Golykh, R.N. Improving the efficiency of ultrasonic cavitation effects on chemical and technological processes in heterogeneous systems with a carrier high-viscosity or non-Newtonian liquid phase : abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences 05.17.08 / Naked Roman Nikolaevich. – Biysk, 2014. (In Russ)
18. Galitseisky B. M. Thermal and hydrodynamic processes in oscillating flows / B. M. Galitseisky, Yu. A. Ryzhov, E. V. Yakush. *M. : Mashinostroyeniye*, 1977; 256. (In Russ)
19. Makeev, A. N. Pulse heat supply system of a public building: abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences / A. N. Makeev. Penza, 2010; 20. (In Russ)
20. Solar heat supply and hot water supply system: patent application for invention No. 2022104706 Ros. Federation / FGBOU VO "NIU MEI" / application. 22.02.2022. (In Russ)

Сведения об авторах:

Макеев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича, tggi@rambler.ru ORCID 0000-0001-5356-2144

Кирюхин Ярослав Артурович, студент, институт энергоэффективности и водородных технологий; ykiruhin@gmail.com ORCID 0000-0002-0009-5391

Information about authors:

Andrey N. Makeev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering named after M.P. Vukalovich, tggi@rambler.ru ORCID 0000-0001-5356-2144

Yaroslav A. Kiryukhin, Student, Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies; ykiruhin@gmail.com ORCID 0000-0002-0009-5391

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 08.08.2022.

Одобрена после рецензирования/Revised 27.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 27.08.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.862.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-32-38

Оригинальная статья/Original Paper

**Программа оценивания с помощью метода наименьших квадратов неэлементарных
линейных регрессий с двумя переменными**

М.П. Базилевский, Д.В. Карбушева

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка программы приближенного оценивания специфицированных на основе производственной функции Леонтьева регрессионных моделей (неэлементарных регрессий с двумя переменными) и её применение для моделирования уровня безработицы в Иркутской области. **Метод.** Оценивание неэлементарных регрессий осуществляется с помощью метода наименьших квадратов. Для нахождения приближенных оценок использован ранее разработанный алгоритм, предполагающий решение весьма трудоемкой вычислительной задачи. **Результат.** На основе этого алгоритма в среде программирования Delphi была разработана специальная программа. Программа предусматривает работу в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме по заданным критериям определяются оценки параметров модели, сумма квадратов остатков, коэффициент детерминации, критерий Стюдента, Дарбина-Уотсона и для каждой переменной номера срабатываний компонент бинарной операции по выборке. В автоматическом режиме определяются наилучшие оценки неэлементарной регрессии по критериям: суммы квадратов остатков, коэффициента детерминации, Стюдента и Дарбина-Уотсона. При этом строятся графики всех основных характеристик в зависимости от ключевого параметра модели. С помощью разработанной программы построена модель уровня безработицы в Иркутской области. **Вывод.** Построенная с помощью разработанной программы модель оказалась лучше, чем традиционная модель множественной линейной регрессии. Программа является универсальной и может применяться для решения конкретных прикладных задач анализа данных.

Ключевые слова: регрессионная модель, метод наименьших квадратов, производственная функция Леонтьева, неэлементарная линейная регрессия, коэффициент детерминации, безработица

Для цитирования: М.П. Базилевский, Д.В. Карбушева. Программа оценивания с помощью метода наименьших квадратов неэлементарных линейных регрессий с двумя переменными. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):32-38. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-32-38

**The program for estimation non-elementary linear regressions
with two variables using ordinary least squares**

M.P. Bazilevskiy, D.V. Karbusheva

Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevskogo Str., Irkutsk 664074, Russia

Abstract. Objective. The aim of this article is to develop a program for approximate estimation of regression models specified on the basis of the Leontief production function (non-elementary regressions with two variables) and use it for modeling the unemployment rate in the Irkutsk region. **Method.** Estimation of non-elementary regressions is carried out using ordinary least squares method. To find approximate estimates, we used a previously developed algorithm that involves solving a very laborious computational problem. **Result.** Based on this algorithm, a special program was developed in the Delphi programming environment. The program provides for work in manual and automatic

modes. In manual mode, according to the specified criteria, the estimates of the model parameters, the residual sum of squares, the coefficient of determination, the Student's criterion, Durbin-Watson's criterion and, for each variable, the number of the binary operation components triggerings on the sample, are determined. In automatic mode, the best estimates of non-elementary regression are determined according to the criteria: residual sum of squares, coefficient of determination, the Student's criterion and Durbin-Watson's criterion. At the same time, graphs of all the main characteristics are plotted depending on the key parameter of the model. With the help of the developed program, a model of the unemployment rate in the Irkutsk region was construct. **Conclusion.** The model construct using the developed program turned out to be better than the traditional model of multiple linear regression. The program is universal and can be used to solve specific applied problems of data analysis.

Keywords: regression model, ordinary least squares, Leontief production function, non-elementary linear regression, coefficient of determination, unemployment

For citation: M.P. Bazilevskiy, D.V. Karbusheva. The program for estimation non-elementary linear regressions with two variables using ordinary least squares. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 32-38. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-32-38

Введение. В настоящее время в различных областях деятельности – экономике, бизнесе, социологии, медицине и др. – накоплено огромное количество больших массивов статистических данных. Поэтому актуальной научной задачей является эффективная обработка и анализ этих данных с целью извлечения из них неизвестных ранее полезных знаний. Эффективным инструментом анализа данных является регрессионный анализ [1–3]. Его применение приводит к построению регрессионной модели влияния одной или нескольких объясняющих переменных на зависимую переменную. Решению конкретных прикладных задач с помощью регрессионного анализа посвящено множество научных работ (например, [4–8]).

Постановка задачи. Одной из главных проблем, возникающих при построении регрессионной модели, является выбор её структурной спецификации, т.е. математической формы связи между переменными. На сегодняшний день разработан весьма внушительный арсенал таких форм, подробное описание которых можно найти в [9,10]. В экономике особое внимание при этом традиционно уделяется вопросам построения производственных функций (ПФ) [11–13]. К наиболее известным относится ПФ Леонтьева вида

$$y = \min \{a_1 x_1, a_2 x_2\},$$

в которой переменная y зачастую трактуется как объемы выпускаемой продукции, x_1, x_2 – факторы производства, a_1, a_2 – определяемые технологией постоянные величины.

ПФ Леонтьева целесообразно применять тогда, когда объем выпуска продукции в моделируемой системе определяется количеством ресурса, обеспечивающего лишь наименьший возможный выпуск.

Для оценивания неизвестных параметров a_1 и a_2 ПФ Леонтьева составим регрессионную модель:

$$y_i = \min \{a_1 x_{i1}, a_2 x_{i2}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где n – объем выборки; $y_i, i = \overline{1, n}$ – значения объясняемой переменной y ; $x_{i1}, x_{i2}, i = \overline{1, n}$ – значения объясняющих переменных x_1 и x_2 ; a_1, a_2 – неизвестные параметры; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации.

Как отмечено в [9], для непосредственного оценивания параметров модели (1) обычно применяются методы негладкой оптимизации [14], которые, как правило, являются труднореа-

лизуемыми. В [9] исследована проблема оценивания регрессии (1) с помощью метода наименьших модулей, предполагающего решение оптимизационной задачи

$$J_1 = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - \min\{a_1 x_{i1}, a_2 x_{i2}\}| \rightarrow \min.$$

В той же работе [9] установлено, что задача с функцией потерь J_1 сводится к задаче частично-булевого линейного программирования. Для её решения разработано специализированное программное обеспечение, которое находит широкое применение при моделировании реальных социально-экономических процессов и явлений (например, [15,16]).

Если регрессия (1) оценивается с помощью метода наименьших квадратов (МНК), то требуется решать оптимизационную задачу

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \min\{a_1 x_{i1}, a_2 x_{i2}\})^2 \rightarrow \min.$$

В [17] предложен приближенный метод минимизации функции потерь J_2 , который подразумевает решение весьма трудоемкой вычислительной задачи. На сегодняшний день не существует специализированного программного продукта, автоматизирующего процесс её решения. Поэтому целью данной работы является разработка программы приближенного МНК-оценивания специфицированных на основе ПФ Леонтьева регрессионных моделей и её применение для моделирования уровня безработицы в Иркутской области.

Методы исследования. Алгоритм приближенного МНК-оценивания. Усложним модель (1), включив в неё свободный член a_0 :

$$y_i = a_0 + \min\{a_1 x_{i1}, a_2 x_{i2}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Оценка параметра a_0 показывает приближенное значение переменной y , когда $x_1 = x_2 = 0$. Таким образом, модель (2) может быть применена не только тогда, когда переменная y трактуется как выпуск продукции, а переменные x_1 и x_2 как факторы производства (в этом случае параметр a_0 справедливо был равен 0), но и при моделировании абсолютно любых по смыслу переменных.

Будем считать, что в модели (2) переменные $x_1 > 0$, $x_2 > 0$.

Очевидно, что если $a_1 > 0$, а $a_2 < 0$, то в модели (2) для любого наблюдения всегда срабатывает вторая компонента бинарной операции $\min - a_2 x_2$, а если $a_1 < 0$, а $a_2 > 0$, то, наоборот, первая компонента $- a_1 x_1$. В этих случаях оценивание регрессии (2) равносильно оцениванию обычных парных регрессий y от x_2 и y от x_1 . Поэтому будем считать, что $a_1 \cdot a_2 > 0$. Это означает, что модель (2) имеет смысл строить только тогда, когда объясняющие переменные x_1 и x_2 коррелируют с y с одинаковыми знаками.

В модели (2) вынесем параметр a_1 за знак бинарной операции $\min$:

$$y_i = a_0 + a_1 \min\{x_{i1}, \lambda x_{i2}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $\lambda = a_2 / a_1 > 0$.

Модель (3) является частным случаем неэлементарных линейных регрессий (НЛР), подробно рассмотренных в работах [18–20].

НЛР (3) является нелинейной по параметрам. Но если придать параметру λ определенное значение, то она уже становится линейной, поэтому нетрудно получить с помощью МНК оценки параметров a_0 и a_1 .

Возникает вопрос: какое значение нужно придать параметру λ , чтобы сумма квадратов ошибок модели (3) была минимальна? При этом очевидно, что при $\lambda \rightarrow \infty$ в модели (3) всегда срабатывает первая компонента x_1 , поэтому получаем парную регрессию y от x_1 , а при $\lambda \rightarrow 0$ срабатывает вторая компонента λx_2 , поэтому получаем парную регрессию y от x_2 . В [12] доказано, что оптимальная МНК-оценка параметра λ для модели (3) лежит на отрезке

$$\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}], \quad (4)$$

$$\text{где } \lambda_{\min} = \min \left\{ \frac{x_{11}}{x_{12}}, \frac{x_{21}}{x_{22}}, \dots, \frac{x_{n1}}{x_{n2}} \right\}, \quad \lambda_{\max} = \max \left\{ \frac{x_{11}}{x_{12}}, \frac{x_{21}}{x_{22}}, \dots, \frac{x_{n1}}{x_{n2}} \right\}.$$

Тогда для приближенного МНК-оценивания параметров модели (3), можно воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Разбить отрезок (4) точками, в каждой из которых (и на концах отрезка) найти МНК-оценки параметров a_0 и a_1 .
2. Из полученных моделей выбрать ту, для которой сумма квадратов ошибок будет минимальной.

Программа приближенного МНК-оценивания. Описанный алгоритм приближенного МНК-оценивания НЛР был реализован в виде программы с использованием среды программирования Delphi. Программа позволяет оценивать НЛР (3) как с бинарной операцией $\min$, так и с бинарной операцией $\max$.

Интерфейс программы представлен на рис. 1.

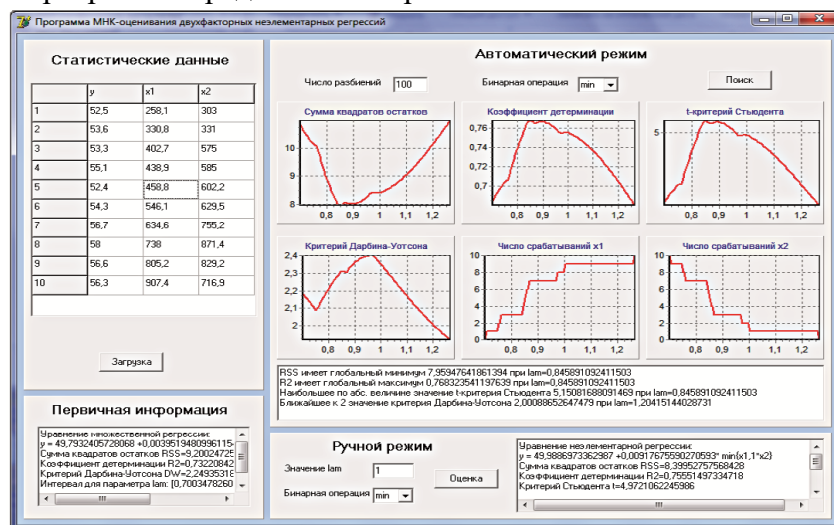


Рис. 1. Интерфейс программы
Fig. 1. Program interface

Для работы с программой сначала нужно выбрать статистические данные (нажав кнопку «Загрузка»), которые должны храниться в текстовой файле с расширением *.txt.

В нём должны содержаться три столбца со значениями переменных, отделенные друг от друга символом табуляции. Первый столбец содержит наблюдения для переменной y . Целые и дробные части чисел отделяются друг от друга символом «,».

После выбора данных в поле «Первичная информация» автоматически выводится следующая информация: уравнение множественной линейной регрессии, сумма квадратов её остатков, коэффициент детерминации R^2 , критерий Дарбина-Уотсона, интервал для параметра λ , найденный по формуле (4). Затем нужно выбрать режим работы: ручной или автоматический. В ручном режиме нужно задать значение параметра λ , выбрать бинарную операцию ($\min$ или $\max$) и нажать кнопку «Оценка». В результате в поле «Ручной режим» выводятся МНК-

оценки параметров a_0 и a_1 , уравнение неэлементарной регрессии, сумма квадратов её остатков, коэффициент детерминации, критерий Стьюдента, Дарбина-Уотсона и для каждой переменной x_1 и x_2 номера срабатываний компонент бинарной операции по выборке. В автоматическом режиме нужно выбрать число разбиений интервала (4), бинарную операцию и нажать кнопку «Поиск».

В результате выводятся графики зависимостей суммы квадратов остатков, коэффициента детерминации, t-критерия Стьюдента, критерия Дарбина-Уотсона, числа срабатываний для x_1 и x_2 от λ . При этом автоматически определяются точки λ с наименьшей суммой квадратов остатков, с наибольшим значением коэффициента детерминации, с наибольшей абсолютной величиной критерия Стьюдента и ближайшим к двум значениям критерия Дарбина-Уотсона.

Обсуждение результатов. Моделирование уровня безработицы в Иркутской области. Вопрос регулирования безработицы в России в целом и в отдельных её субъектах – это одна из важнейших задач государства, поскольку безработица, как социально – экономическое явление, оказывает серьёзное влияние на устойчивое развитие экономики. Для построения регрессионных моделей уровня безработицы в Иркутской области были собраны статистические данные (<https://rosstat.gov.ru/>) за 2000-2020 гг. по следующим переменным:

y – численность безработных, тыс. чел.; x_1 – ВРП, млн. руб.; x_2 – среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников организации, рублей.

На основе этих данных была найдена корреляционная матрица переменных, представленная в табл. 1.

Таблица 1. Корреляционная матрица переменных
Table 1. Correlation matrix of variables

	y	x_1	x_2
y	1	-0,829	-0,841
x_1	-0,829	1	0,989
x_2	-0,841	0,989	1

По табл.1 видно, что объясняющие переменные x_1 и x_2 довольно тесно коррелируют с переменной y , причем, с одинаковым знаком «–», поэтому справедливо попытаться описать зависимость между y и x_1 , x_2 с помощью НЛР. Переменные x_1 и x_2 также тесно коррелируют между собой, поэтому в линейной регрессии будет присутствовать мультиколлинеарность. Оцененная с помощью МНК по исходным данным модель линейной регрессии имеет вид:

$$\tilde{y} = 147,032 + 7,785 \cdot 10^{-6} x_1 - 0,00155 x_2. \quad (5)$$

(0,1756) (-1,084)

В скобках под коэффициентами модели (5) указаны значения t-критерия Стьюдента.

Для модели (5) сумма квадратов остатков $\sum_{i=1}^n e_i^2 = 2007,448$, коэффициент детерминации

$R^2 = 0,70864$, что говорит об её удовлетворительном качестве аппроксимации.

Но из-за мультиколлинеарности исказился коэффициент при переменной x_1 , что приводит к некорректной интерпретации модели (5): для снижения числа безработных y нужно снижать объёмы ВРП x_1 . Кроме того, из-за мультиколлинеарности занижены значения t-критерия Стьюдента, поэтому можно сделать неверный вывод о незначимом влиянии переменных x_1 и x_2 на y . С помощью разработанной программы были оценены НЛР с бинарными операциями min и max (число разбиений отрезка (4) задавалось равным 100):

$$\tilde{y} = 146,58 - 4,633 \cdot 10^{-5} \min\{x_1, 28,31x_2\}, \quad (6)$$

(-6,607)

для которой $\sum_{i=1}^n e_i^2 = 1931,099$, $R^2 = 0,7197$,

$$\tilde{y} = 146,72 - 3,298 \cdot 10^{-5} \max\{x_1, 39,436x_2\}, \quad (7)$$

(-6,421)

для которой $\sum_{i=1}^n e_i^2 = 2011,318$, $R^2 = 0,708$.

Как видно, НЛР (7) с бинарной операцией **max** оказалась несколько хуже линейной регрессии (5) по величине суммы квадратов остатков. При этом в ней всегда срабатывает вторая компонента бинарной операции – $39,436x_2$, из-за чего можно сделать вывод, что модель (7) есть парная линейная регрессия y от x_2 , представленная в иной математической форме. НЛР (6) с бинарной операцией **min** по величине суммы квадратов остатков оказалась лучше линейной регрессии (5) на 76,349 и лучше НЛР (7) на 80,219. При этом из-за полного отсутствия в НЛР (7) мультиколлинеарности не произошло искажения знака коэффициента при регрессоре $\min\{x_1, 28,31x_2\}$. По величине t-критерия Стьюдента этот коэффициент можно признать значимым. Представим НЛР (6) в кусочно-заданном виде:

$$\tilde{y} = \begin{cases} 146,58 - 4,633 \cdot 10^{-5} x_1, & \text{если } \frac{x_1}{x_2} \leq 28,31, \\ 146,58 - 131,16 \cdot 10^{-5} x_2, & \text{если } \frac{x_1}{x_2} > 28,31. \end{cases}$$

Тогда справедлива следующая интерпретация этой модели. Если отношение объемом ВРП x_1 к среднемесячной заработной плате x_2 не превосходит значения 28,31, то на уровень безработицы в Иркутской области влияет ВРП. При этом с ростом ВРП на 10 млрд. руб., уровень безработицы падает в среднем на 463,3 человек. А если отношение объемом ВРП x_1 к среднемесячной заработной плате x_2 больше значения 28,31, то на уровень безработицы в Иркутской области влияет заработная плата. При этом с ростом заработной платы на 1000 рублей, уровень безработицы падает в среднем на 1311,6 человек.

Вывод. В работе приводится описание алгоритма приближенного МНК-оценивания параметров двухфакторных неэлементарных линейных регрессий с бинарными операциями **min** и **max**. Получены следующие результаты.

1. На основе рассмотренного алгоритма разработана программа приближенного МНК-оценивания неэлементарных линейных регрессий с двумя переменными.

2. С помощью разработанной программы построена неэлементарная линейная регрессия уровня безработицы в Иркутской области, лишенная негативного эффекта мультиколлинеарности и оказавшаяся лучше традиционной линейной регрессии.

Библиографический список:

1. Brook R. J. Applied regression analysis and experimental design / R.J. Brook, G.C. Arnold. – CRC Press, 2018.
2. Arkes J. Regression analysis: A practical introduction / J. Arkes. – Routledge, 2019.
3. Pardoe I. Applied regression modeling / I. Pardoe. – John Wiley & Sons, 2020.
4. Boateng E. Y. A review of the logistic regression model with emphasis on medical research / E.Y. Boateng, D.A. Abaye // Journal of data analysis and information processing. – 2019. – Vol. 7. – No. 4. – pp. 190-207.
5. Parbat D. A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India / D. Parbat, M. Chakraborty // Chaos, Solitons & Fractals. – 2020. – Vol. 138. – pp. 109942.
6. Носков С.И. Дискретная модель производства алюминия в Российской Федерации / С.И. Носков // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 2. – С. 80-82.
7. Werth J. Linear Regression Model Development for Analysis of Asymmetric Copper-Bisoxazoline Catalysis / J. Werth, M.S. Sigman // ACS catalysis. – 2021. – Vol. 11. – No. 7. – pp. 3916-3922.
8. Dedetürk B. K. Spam filtering using a logistic regression model trained by an artificial bee colony algorithm / B.K. Dedetürk, B. Akay // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 91. – pp. 106229.

9. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных / С.И. Носков. – Иркутск: Облформпечать, 1996. – 321 с.
10. Носков С.И. Построение регрессионных моделей с использованием аппарата линейно-булевого программирования / С.И. Носков, М.П. Базилевский. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 176 с.
11. Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение / Г.Б. Клейнер. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
12. Клейнер Г.Б. Экономика. Моделирование. Математика. Избранные труды. – М.: ЦЭМИ РАН, 2016. – 856 с.
13. Хацкевич Г.А. Двухфакторные производственные функции с заданной предельной нормой замещения / Г.А. Хацкевич, А.Ф. Проневич, М.В. Чайковский // Экономическая наука сегодня. – 2019. – № 10. – С. 169-181.
14. Шор Н.З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. Киев:Наук думка, 1979. 200 с.
15. Носков С.И. Кусочно-линейные регрессионные модели объемов перевозки пассажиров железнодорожным транспортом / С.И. Носков, А.А. Хоняков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2021. – № 4 (40). – С. 80-89.
16. Носков С.И. Применение функции риска для моделирования экономических систем / С.И. Носков, А.А. Хоняков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 5 (33). – С. 85-92.
17. Базилевский М.П. МНК-оценивание параметров специфицированных на основе функций Леонтьева двухфакторных моделей регрессии / М.П. Базилевский // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 2 (26). С. 66-70.
18. Базилевский М.П. Оценивание линейно-неэлементарных регрессионных моделей с помощью метода наименьших квадратов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. – № 4 (31).
19. Базилевский М.П. Отбор информативных операций при построении линейно-неэлементарных регрессионных моделей / М.П. Базилевский // International Journal of Open Information Technologies. 2021. Т. 9. № 5. С. 30-35.
20. Базилевский М.П. Интерпретация неэлементарных линейных регрессионных моделей / М.П. Базилевский // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2022. – № 1 (13). – С. 5-15.

References:

1. Brook R. J., Arnold G.C. Applied regression analysis and experimental design. CRC Press, 2018.
2. Arkes J. Regression analysis: A practical introduction. Routledge, 2019.
3. Pardoe I. Applied regression modeling. John Wiley & Sons, 2020.
4. Boateng E. Y., Abaye D.A. A review of the logistic regression model with emphasis on medical research. *Journal of data analysis and information processing*. 2019; 7(4): 190-207.
5. Parbat D., Chakraborty M. A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020; 138: 109942.
6. Noskov S.I. Discrete model of aluminum production in the Russian Federation. [Vestnik tekhnologicheskogo universiteta] *Bulletin of the Technological University*. 2022; 25(2): 80-82. (In Russ)
7. Werth J., Sigman M.S. Linear Regression Model Development for Analysis of Asymmetric Copper-Bisoxazoline Catalysis. *ACS catalysis*. 2021; 11(7): 3916-3922.
8. Dedetürk B. K., Akay B. Spam filtering using a logistic regression model trained by an artificial bee colony algorithm. *Applied Soft Computing*. 2020; 91: 106229.
9. Noskov S.I. Technology for modeling objects with unstable operation and uncertainty in data. Irkutsk: Oblinformpechat', 1996. (In Russ)
10. Noskov S.I., Bazilevskiy M.P. Construction of regression models using the apparatus of linear-Boolean programming. Irkutsk: IrGUPS, 2018. (In Russ)
11. Kleyner G.B. Production functions: theory, methods, application. Moscow: Finansy i statistika, 1986. (In Russ)
12. Kleyner G.B. Economy. Modeling. Mathematics. Selected works. Moscow: TsEMI RAN, 2016. (In Russ)
13. Khatskevich G.A., Pronevich A.F., Chaykovskiy M.V. Two-factor production functions with given marginal rate of substitution. *Economics today*. 2019; 10: 169-181. (In Russ)
14. Shor N.Z. Methods for minimizing non-differentiable functions and their applications. Kiev: Nauk. dumka, 1979. (In Russ)
15. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Piecewise linear regression models of passenger transportation volumes by railway. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021; 4(40): 80-89. (In Russ)
16. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Applying the risk function to model economic systems. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2020; 5(33): 85-92. (In Russ)
17. Bazilevskiy M.P. OLS-estimation of two-factor regression models specified on Leontiev functions. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019; 2(26): 66-70. (In Russ)
18. Bazilevskiy M.P. Estimation linear non-elementary regression models using ordinary least squares. *Modeling, optimization and information technology*. 2020; 8(4). (In Russ)
19. Bazilevskiy M.P. Selection of informative operations in the construction of linear non-elementary regression models. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021; 9(5): 30-35. (In Russ)
20. Bazilevskiy M.P. Interpretation of non-elementary linear regression models. *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2022; 1(13): 5-15. (In Russ)

Сведения об авторах:

Базилевский Михаил Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики; mik2178@yandex.ru
Карбушева Диана Витальевна, студент; karbusheva.02@mail.ru

Information about authors:

Mikhail P. Bazilevskiy, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Mathematics; mik2178@yandex.ru
Diana V. Karbusheva, student; karbusheva.02@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию/Received 20.08.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 17.09.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 17.09.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05653

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51

Оригинальная статья /Original Paper

**Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации
в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до
воздействия противника и восстановления работоспособности**

В.А. Воеводин, И.В. Виноградов, Д.И. Волков

Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»,

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка математической модели оценки устойчивости функционирования объекта информатизации (ОИ) в условиях компьютерных атак (КА) при принятии ограничения о том, что случайные величины времени до воздействия противника и времени восстановления работоспособности распределены по экспоненциальному закону. **Метод.** Приложение метода дискретных марковских процессов для решения задачи по оценке устойчивости ОИ, отличающегося от известных подходов тем, что для описания состояния ОИ вводится понятие «невозвратное состояние», в которое система может переходить из-за исчерпания ресурса, выделенного для восстановления его готовности после успешной КА. **Результат.** В результате исследования разработана математическая модель, позволяющая строить функцию устойчивости ОИ с учетом интенсивности потока КА и интенсивности восстановления его работоспособности при учете ограничения на выделенный ресурс. **Вывод.** Применение метода позволяет осуществлять количественную оценку устойчивости функционирования ОИ посредством построения функции живучести ОИ в условиях КА, при которых потоки атак и восстановлений нельзя принять стационарными и эргодическими, а также отсутствует репрезентативная статистика для расчета асимптотических оценок устойчивости. Количественная оценка устойчивости ОИ в условиях КА востребована органами управления информационной безопасностью при принятии решения по обеспечению защиты информации, а также при обосновании требований к системе восстановления работоспособности.

Ключевые слова: объект информатизации, устойчивость функционирования объекта информатизации, компьютерная атака, массированная компьютерная атака, готовность объекта информатизации, частные и агрегированные показатели устойчивости, аудит информационной безопасности

Для цитирования: В.А.Воеводин, И.В.Виноградов, Д.И.Волков. Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до воздействия противника и восстановления работоспособности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 39-51. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51

About the informatization object functioning stability assessment in conditions of computer attacks at exponential distribution law of time before the enemy's impact

V.A. Voevodin, I.V. Vinogradov, D.I. Volkov

National Research University of Electronic Technology,

1 Shokina Square, Moscow, Zelenograd 124498, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a mathematical model for assessing the stability of the functioning of an informatization object (IO) in the conditions of computer attacks (CA), assuming that the laws of distribution of random variables before the enemy's impact and the recovery time are distributed exponentially. **Method.** Application of the method of discrete Markov processes to solve the problem of assessing the stability of IO, which differs from the known approaches in that to describe the state of IO, the concept of "non-returnable state" is introduced, into which the system can move due to the exhaustion of the resource allocated to restore its readiness after a successful CA. **Result.** As a result of the research, a mathematical model has been developed that allows us to build the stability function of the IO taking into account the intensity of the CA flow and

the intensity of restoring its operability, taking into account the limitations on the allocated resource.

Conclusion. The application of the method makes it possible to quantify the stability of the functioning of the IO by constructing the survivability function of the IO for conditions under which the flows of attacks and recoveries cannot be assumed stationary and ergodic, and there is also no representative statistics for calculating asymptotic estimates of stability. A quantitative assessment of the stability of the IO for the conditions of the CA is in demand by information security management bodies when making decisions to ensure the protection of information, as well as when justifying the requirements for the system to restore operability.

Keywords: informatization object, stability of functioning of informatization object, computer attack, massive computer attack, readiness of informatization object, private and aggregated stability indicators, information security audit

For citation: V.A. Voevodin, I.V. Vinogradov, D.I. Volkov. About the informatization object functioning stability assessment in conditions of computer attacks at exponential distribution law of time before the enemy's impact. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 39-51. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-39-51

Введение. Сведения о динамике среды киберпреступлений приведены в [1, 2]. В силу закона [3] обладатель информации, сообразуясь с развитием среды киберпреступлений, обязан принимать меры по защите информации (ЗИ) и недопущению воздействия на технические средства обработки информации, в результате которого нарушается их процесс функционирования объекта информатизации (ОИ).

Под объектом информатизации могут рассматриваться и отдельные элементы, входящие в состав ОИ, которые могут быть объединены в соответствующую систему для исследования устойчивости функционирования системы в целом. Для принятия результативного решения по защите ОИ в условиях компьютерных атак (КА) требуются исходные данные об обстановке, в том числе и об устойчивости функционирования самого объекта защиты, в роли которого выступает сам ОИ или его отдельные подсистемы. Оценка устойчивости ОИ, предназначенного для применения в условиях КА, может быть востребована: органами управления информационной безопасностью (ИБ) при задании требований к устойчивости функционирования отдельных элементов ОИ и ОИ в целом [4, 5]; лицами, управляющими программами аудита ИБ, при формировании критериев аудита, а также при разработке программ и методик аудиторских испытаний [6, 7]; лицами, проводящими оценку рисков информационной безопасности (ИБ) с целью обоснования страховых тарифов [8]; лицами, управляющими рисками ИБ [9] и др.

Исходные данные, необходимые для принятия решения по ЗИ, добываются в результате аудита информационной безопасности. Общие вопросы организации и проведения аудита систем управления информационной безопасностью для штатных условий рассмотрены в национальных стандартах [6, 7], а также в работах [10 - 13]. Однако вопросы оценки устойчивости объекта в условиях КА исследованы недостаточно полно, что не позволяет сформировать научно обоснованные рекомендации по её аудиторской оценке.

Обозначенный предмет исследования представляет практический и теоретический интерес, поскольку методы, разрабатываемые теорией надежности, ориентированы на простые, стационарные и эргодические потоки отказов, что нельзя применить к условиям аномальных воздействий, в том числе и к условиям КА [14]. В условиях КА период работоспособного состояния объекта соизмерим со временем его восстановления, поэтому применение модели пуассоновского потока отказов для оценки устойчивости ОИ приводит к существенным погрешностям. Более того, принципиально отсутствуют условия для сбора репрезентативной статистики, что не позволяет получить достоверные асимптотические оценки устойчивости ОИ в условиях КА. В целях обеспечения достоверности результатов моделирования требуется применение модели альтернирующего процесса, где время восстановления соизмеримо с периодом функционирования объекта и имеет конечную величину, при этом аналитические модели реального процесса функционирования громоздки, трудно интерпретируемы и не нашли практического применения [14].

Стационарный процесс функционирования ОИ в условиях старения его элементов и штатной эксплуатации может прерываться аномальными воздействиями внешней среды, в том числе и целенаправленными, приводящими к его повреждению. К таким воздействиям могут относиться стихийные бедствия, одиночные или массированные КА, которые имеют следующие особенности: значительные повреждения ОИ, приводящие к существенному увеличению

времени восстановления; незначительное время между соседними повторными КА; ограниченное число целенаправленных КА на относительно небольшом промежутке времени; отличие законов распределения случайных величин времени до повреждения и времени восстановления работоспособности от аналогичных законов при штатной эксплуатации; вид и параметры законов распределения на практике чаще неизвестны из-за отсутствия репрезентативной статистики по причине редкости названных событий.

С учетом этих особенностей применение классического подхода, приведенного в [15, 16] для оценки устойчивости исследуемого ОИ и её асимптотических оценок, может привести к существенным ошибкам при принятии решения по обеспечению ИБ в условиях аномальных и целенаправленных воздействий внешней среды.

Постановка задачи. А) Определены исходные данные:

- атрибуты интенсивности КА, $\lambda = \{F(t), n\}$, включающие множество функций распределения $F(t)$ случайных интервалов времени η_i до очередной i -й КА, $F(t) = \{F_i(t)\}$, где $F_i(t)$ – функция распределения случайного η_i интервала времени до i -ой КА, $i = 1, 2, \dots, n$, n – число атак в составе КА;
- характеристики $u = \{T_n, P\}$ надежности и живучести ОИ, включающие наработку между отказами ОИ T_n в нормальных условиях применения и множество вероятностей поражения ОИ в результате КА, $P = \{P_i\}$, где P_i – вероятность поражения ОИ при i -й КА. Подход к определению вероятностей поражения с применением экспертных методов приведён в [17, 18, 19];
- g - варьируемые (изменяемые) характеристики восстанавливаемости ОИ, $g = \{T_b, G(t)\}$, где $T_b = \{\tau_{ri}^H, \tau_{ri}^B\}$ – прогнозируемый интервал времени восстановления (временная избыточность) после i -й КА; $G(t)$ – множество функций распределения случайных интервалов времени восстановления работоспособности (временной избыточности) после i -й КА, $G(t) = \{G_i(t)\}$. Порядок экспертной оценки нижней τ_{ri}^H и верхней τ_{ri}^B границ случайной величины времени восстановления ОИ $T_b = \{\tau_{ri}^H, \tau_{ri}^B\}$ после i -й КА приведен в [17];
- требуемый для восстановления работоспособности ОИ после успешной КА ресурс $R_0 = \{T_0, r_0\}$, где T_0 – допустимое (требуемое) время восстановления работоспособности ОИ, r_0 – требуемый ресурс сил и средств для восстановления работоспособности ОИ;
- выделенный для восстановления работоспособности ОИ ресурс $R = \{T, r\}$, где T – назначенное время для восстановления работоспособности ОИ, r – выделенный ресурс для восстановления работоспособности ОИ.

Б) Требуется разработать аналитическую процедуру и исследовать частные случаи определения наименьшего значения v_m функции устойчивости ОИ на заданном интервале $(0, T]$:

$$v_m = \inf_{\substack{t \in (0, T], \\ R \leq R_0}} v(t, \lambda, r, u).$$

Функция устойчивости ОИ в общем виде записывается как [14]:

$$v(t, \lambda, r, u) = K_\Gamma(u, r) \varphi(t, \lambda, r, u),$$

где $K_\Gamma(u, r)$ – коэффициент готовности ОИ; $\varphi(t, \lambda, r, u)$ – функция живучести (ФЖ) ОИ; t – текущий момент времени оценки ФЖ; T – интервал времени ожидания КА.

Общий порядок определения коэффициента готовности ОИ приведен и исследуется в теории надежности технических систем [20]: $K_\Gamma = T_n(T_n + T_b)^{-1}$,

где T_n – среднее время наработки на отказ в штатных условиях эксплуатации, T_b – среднее время восстановления работоспособности в штатных условиях эксплуатации – определяют на основании статистических наблюдений, полученных в условиях штатной эксплуатации ОИ.

Для большинства случаев $K_\Gamma \geq 0,99$, а наименьшее значение ФЖ $\varphi_m \ll K_\Gamma$, поэтому K_Γ при оценке живучести можно пренебречь. Тогда математическая модель сводится к определению $v_m \approx \varphi_m = \inf \varphi(t, \lambda, r, u)$, где v_m – минимальное значение функции устойчивости на задан-

ном интервале времени, φ_m – минимальное значение функции живучести на периоде нанесения КА по ОИ.

Задача решается в два этапа:

1) определение вида оператора A : $\varphi(t) = A\{F(t), G(t), P, n\}$; 2) определение функционала $\varphi_m = \inf_{t \in (0, t]} \varphi(t)$.

Наиболее сложным является первый этап, в ходе которого рассматриваются различные виды оператора A и осуществляется выбор приемлемого:

- оператор A_0 , определяемый при произвольных законах распределения $F_i(t)$ и $G_i(t)$ и различных P_i (общий полумарковский процесс восстановления). В этом случае процесс восстановления можно характеризовать как общий полумарковский. Это тема последующей – третьей публикации;
- оператор A_1 , определяемый при одинаковых законах распределения $F_i(t) = F(t)$ и $G_i(t) = G(t)$ и равных $P_i = P$. В этом случае процесс восстановления можно позиционировать как частный полумарковский. Это тема последующей - второй публикации;
- оператор A_2 , определяемый при экспоненциальных законах распределения времени до КА $F(t)$ и времени восстановления работоспособности ОИ $G(t)$, таких, что $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, $G(t) = 1 - e^{-\mu t}$, где λ и μ – параметры экспоненциального распределения времени до КА и времени восстановления работоспособности ОИ соответственно; $P_i = P$, как в A_1 .

В этом случае процесс можно характеризовать как дискретный марковский – это тема настоящего исследования и публикации.

Методы исследования. Описание дискретного марковского процесса. Дискретный марковский процесс характеризуется тем, что время t , на котором определяются возможные состояния ОИ, непрерывно, а случайные состояния ОИ $z(t)$ в сечении t принимают конечные или счетные значения из множества Z . Множество Z содержит конечное число n состояний. Ограничение вводится с помощью математической модели:

$$z(t) \in Z, Z = \{z_i, i = 1, 2, \dots, n\}.$$

В соответствии с этим вместо вероятных i -х состояний ОИ z_i при математическом моделировании можно рассматривать только индексы этих состояний. Для моделирования смены состояний ОИ в качестве исходного можно использовать множество мощностью m^2 условных интервально-переходных вероятностей:

$$P_{ij}(t_0, t), i, j = 1, 2, \dots, m,$$

При этом принимается, что вероятностная модель удовлетворяют следующим условиям:

1. Сумма вероятностей по всем возможным состояниям в момент t равна единице:

$$\sum_{j=1}^m P_{ij}(t_0, t) = 1;$$

2. При $t_0 = t$ вероятность равна единице, когда $i = j$, в остальных случаях равна нулю, т. е. описывается символом Кронекера:

$$\forall t_0, t: t_0 = t \quad P_{ij}(t_0, t) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases}$$

3. Вероятности удовлетворяют уравнениям Колмогорова-Чепмена для любого промежуточного момента времени t' : $t_0 < t' < t$:

$$P_{ij}(t_0, t) = \sum_{k=1}^m P_{ik}(t_0, t') P_{kj}(t', t), i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Уравнения (1) позволяют определить вероятности состояний двух крайних сечений в моменты t_0 и t по известным условным интервально-переходным вероятностям относительно промежуточного сечения в момент t' :

$$P(i, t_0, j, t) = P_j(t_0)P_{ij}(t_0, t'), \quad i, j = 1, 2, \dots, m,$$

где $P_j(t_0)$ – вероятность состояния z_j в момент t_0 .

Если известны начальные вероятности i -х состояний в момент t_0 и найдены $P_{ij}(t_0, t)$, то можно определить вероятность любого j -го состояния в момент t по формуле

$$P_j(t) = \sum_{i=1}^m P_i(t_0)P_{ij}(t_0, t), \quad i, j = 1, 2, \dots, m.$$

Вероятности $P_{ij}(t_0, t)$ определяются путем решения следующей системы дифференциальных уравнений:

$$P'_{ij}(t_0, t) = \sum_{k=1, k \neq j}^m [\lambda_{kj}(t)P_{ik}(t_0, t) - \lambda_{jk}(t)P_{ij}(t_0, t)], \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где $\lambda_{kj}(t)$, $\lambda_{jk}(t)$ – интенсивности переходов из состояний k в j или j в k , определяющие частоту соответствующих переходов в единицу времени:

$$\lambda_{kj} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{kj}(t_0, t) - P_{kj}(t_0, t_0)}{\Delta t}; \quad \lambda_{jk}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{jk}(t_0, t) - P_{jk}(t_0, t_0)}{\Delta t}.$$

Система уравнений (2) выводится путем преобразования уравнения (1) и позиционируется как система обратных уравнений Колмогорова.

Аналогично может быть получен вывод дифференциальных уравнений для безусловных вероятностей $P'_j(t)$ j -х состояний процесса в любой момент времени:

$$P'_j(t) = \sum_{k=1, k \neq j}^m [\lambda_{kj}(t)P_k(t) - \lambda_{jk}(t)P_j(t)], \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Система (3) позиционируется как система прямых уравнений Колмогорова.

Решение (2) и (3) для реальных случаев сопряжено со значительными трудностями вычислительного характера, поэтому целесообразно ввести ряд допущений.

Во-первых, принимается, что исследуемый марковский процесс является однородным. Для однородного процесса можно принять, что вероятности $P_{ij}(t_0, t)$ будут зависеть только от разности $\tau = t - t_0$, т. е. $P_{ij}(t_0, t) = P_{ij}(\tau)$, а интенсивности $\lambda_{ij}(t)$ будут постоянными величинами $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij}$, причем: $P_{ij}(\tau) = \pi_{ij}F_{ij}(\tau) = \pi_{ij}F_i(\tau)$, $\lambda_{ij} = \pi_{ij}\lambda_i$,

где $F_i(\tau) = 1 - e^{-\lambda_i\tau}$ – функция распределения времени пребывания ОИ в состоянии z_i , а π_{ij} – постоянные интенсивности переходов ОИ из состояния z_i в z_j .

В результате дифференциальные уравнения (3) принимают следующий вид:

$$P'_j(t) = \sum_{k=1, k \neq j}^m [\lambda_{kj}P_k(t) - \lambda_{jk}P_j(t)], \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Во-вторых, принимается, что однородный марковский процесс обладает эргодическими свойствами и существует однозначно-определенное (равновесное) состояние при $t \rightarrow \infty$. В этом случае существуют предельно-постоянные значения вероятностей $P_j(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_j(t) = P_j.$$

В итоге дифференциальные уравнения (4) преобразуются в систему линейных алгебраических уравнений относительно P_j :

$$0 = \sum_{k=1, k \neq j}^m [\lambda_{kj}P_k - \lambda_{jk}P_j], \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

В-третьих, ограничивается число допустимых переходов из состояний k в j и j в k , что позволяет сократить число слагаемых в уравнениях (5). Например, для процесса «размножения

и гибели» предполагается, что переходы возможны только в соседние состояния. Тогда уравнения (5) принимают следующий вид:

$$\lambda_{j-1}P_{j-1} + (\lambda_{j-} + \mu_j)P_j + \mu_{j+1}P_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где $\lambda_{j-1} = \lambda_{j-1,j}$; $\lambda_{j+1} = \lambda_{j,j+1}$ – интенсивности переходов (повреждений) из состояний j в $(j+1)$ соответственно; $\mu_j = \lambda_{j,(j-1)}$; $\mu_{j+1} = \lambda_{(j+1),j}$ – интенсивности переходов (восстановлений работоспособности) из состояний j и $(j+1)$ в состояния $(j-1)$ и j соответственно; $\lambda_0 = \mu_1 = \lambda_n = \mu_{n+1} = 0$, т. к. $0 < j \leq m$, где $\lambda_0 = \lambda_{j-1}$.

Решение систем уравнений (4), (5), (6) осуществляется при соблюдении нормирующего условия:

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1.$$

Определение функции живучести. Заданы КА – n и вероятность поражения ОИ – $P < 1$ при каждом воздействии. Граф переходов подобного ДМП представлен на рис.1.

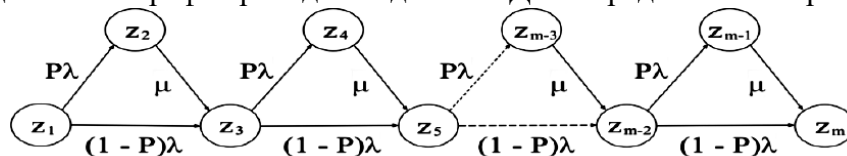


Рис.1. Граф переходов дискретного марковского процесса
 Fig.1. Transition graph of a discrete Markov process

Число m , индексы i состояний z_i процесса и вероятности переходов совпадают с соответствующими характеристиками полумарковского процесса, однако исследуемый ДМП имеет следующие особенности:

1. Процесс является однородным и характеризуется постоянными интенсивностями λ_{ik} переходов из состояния z_i в z_k ; $i, k = 1, 2, \dots, m$, причем $\lambda_{ik} = \pi_{ik}\lambda_i$, где λ_i – параметр экспоненциального закона распределения времени пребывания процесса в состоянии z_i ;
2. Случайное время пребывания процесса в состояниях с нечетными индексами $i = 2j + 1$ распределено по закону $F_{2j+1}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, $j = 1, 2, \dots, (n-1)$; и четными $i = 2j$ – по закону $F_{2j}(t) = 1 - e^{-\mu t}$, $j = 1, 2, \dots, n$.
3. Интенсивности переходов процесса из состояния z_i в z_k имеют следующие значения: $\lambda_{ik} = 0$ при $i \geq k$, $k - i > 2$; $\lambda_{2j, (2j+1)} = \mu$; $\lambda_{(2j-1), 2j} = P\lambda$;
 $\lambda_{(2j-1), (2j+1)} = (1-P)\lambda$, $j = 1, 2, \dots, n$.

С учетом данных особенностей система дифференциальных уравнений (4) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} P'_1(t) &= -\lambda P_1(t); \\ &\dots\dots\dots \\ P'_i(t) &= -\mu P_i(t) + P\lambda P_{i-1}(t); \quad i = 2j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ P'_i(t) &= -\lambda P_i(t) + \mu P_{i-1}(t) + (1-P)\lambda P_{i-2}(t); \quad i = 2j + 1, \quad j = 1, 2, \dots, (n-1); \\ &\dots\dots\dots \\ P'_m(t) &= \mu P_{m-1}(t) + (1-P)\lambda P_{m-2}(t); \quad m = 2n + 1; \\ &\sum_{j=1}^m P_j(t) = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Искомая ФЖ $\phi(t)$ будет равна сумме безусловных вероятностей состояний z_i , соответствующих исправному ОИ, т. е. состояний, индексы которых $i = 2j + 1$. В результате

$$\varphi(t) = \sum_{j=1}^m P_{2j+1}(t). \quad (8)$$

Для нахождения ФЖ к системе (7) и уравнению (8) применяется преобразование Лапласа с учетом следующих начальных условий: $P_1(0) = 1$, $P_i(0) = 0$, $i \neq 1$.

При определении начальных условий принимается, что в начальный момент времени $t_0 = 0$ ОИ всегда находится в исправном состоянии, т. е. $z_1 = 1$.

В результате получается следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} s\widetilde{P}_1(s) - 1 &= -\lambda\widetilde{P}_1(s); \\ &\dots\dots\dots \\ s\widetilde{P}_i(s) &= -\mu\widetilde{P}_i(s) + \lambda\widetilde{P}_{i-1}(s); \quad i = 2j; \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ s\widetilde{P}_i(s) &= -\lambda\widetilde{P}_i(s) + \mu\widetilde{P}_{i-1}(s) + (1-P)\lambda\widetilde{P}_{i-2}(s); \quad i = 2j+1; \quad j = 1, 2, \dots, (n-1); \\ &\dots\dots\dots \\ s\widetilde{P}_m(s) &= \mu\widetilde{P}_{m-1}(s) + (1-P)\lambda\widetilde{P}_{m-2}(s); \quad m = 2n+1; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m \widetilde{P}_j(s) = s^{-1}, \quad (10)$$

где s – аргумент изображения ФЖ.

Преобразование Лапласа $\varphi(t)$ будет иметь вид

$$\widetilde{\varphi}(s) = \sum_{j=1}^m \widetilde{P}_{2j+1}(s). \quad (11)$$

Произведем суммирование левой и правой частей уравнений (9), содержащих $\widetilde{P}_i(s)$ с четными индексами $i = 2j+1$; $j = 0, 1, \dots, (n-1)$, и с учетом (10) и (11) получаем:

$$\begin{aligned} s\widetilde{\varphi}(s) - 1 &= -\lambda[\widetilde{\varphi}(s) - \widetilde{P}_m(s)] + \mu[s^{-1} - \widetilde{\varphi}(s)] + (1-P)\lambda[\widetilde{\varphi}(s) - \widetilde{P}_m(s)], \\ \widetilde{\varphi}(s) &= s^{-1} - \lambda P[1 - s\widetilde{P}_m(s)][s(s + \lambda P + \mu)]^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение для $\widetilde{P}_m(s)$ находим, решая систему уравнений (9) методом подстановки, и получаем:

$$\widetilde{P}_m(s) = [\mu\lambda + (1-P)\lambda s]^n [s(s + \lambda)^n (s + \mu)^n]^{-1}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получаем выражение для преобразования Лапласа ФЖ:

$$\widetilde{\varphi}(s) = \frac{\lambda P \{[(s + \mu)(s + \lambda)]^n - [\mu\lambda + (1-P)\lambda s]^n\}}{s(s + \lambda P + \mu)[(s + \mu)(s + \lambda)]^n}.$$

Полученное выражение представляется в виде, удобном для применения обратного преобразования Лапласа:

$$\begin{aligned} \widetilde{\varphi}(s) &= s^{-1} + \lambda P \sum_{i=1}^n \lambda^{i-1} \widetilde{\alpha}_i(s), \\ \text{где } \widetilde{\alpha}_i(s) &= \frac{(s + \mu - Ps)^{i-1}}{(s + \lambda)^i (s + \mu)^i} = \sum_{j=0}^{i-1} \left[\frac{D_{i-j}}{(s + \lambda)^{i-j}} + \frac{B_{i-j}}{(s + \mu)^{i-j}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Значения D_{i-j} и B_{i-j} определяются с использованием методов разложения отношения $g(s)/f(s)$ многочлена $g(s)$ степени m и многочлена $f(s)$ степени n такой, что $n > m$, на сумму элементарных дробей. Для рассматриваемого случая получаем:

$$g(s) = (s + \mu - Ps)^{i-1}, \quad f(s) = (s + \lambda)^i (s + \mu)^i, \quad m = i-1, \quad n = 2i,$$

причем многочлен $f(s)$ имеет два корня $-\lambda$ и $-\mu$ кратности i . Наиболее приемлемым является метод поиска искомых коэффициентов в условиях рассматриваемой задачи, основанный на последовательном дифференцировании равенства

$$g(s) = f(s) \sum_{j=0}^{i-1} \left[\frac{D_{i-j}}{(s+\lambda)^{i-j}} + \frac{B_{i-j}}{(s+\mu)^{i-j}} \right]$$

с подстановкой значений $s = -\lambda$ или $s = -\mu$.

В результате коэффициенты $D_i, D_{i-1}, \dots, D_1$ и $B_i, B_{i-1}, \dots, B_1$ последовательно находятся из соотношений

$$\begin{aligned} (\mu - \lambda + P\lambda)^{i-1} &= (\mu - \lambda)^i D_i; \\ (i-1)(1-P)(\mu - \lambda + P\lambda)^{i-2} &= i(\mu - \lambda)^{i-1} D_i + (\mu - \lambda)^i D_{i-1}; \\ (i-1)(i-2)(1-P)^2(\mu - \lambda + P\lambda)^{i-3} &= i(i-1)(\mu - \lambda)^{i-2} D_i + \\ &+ 2i(\mu - \lambda)^{i-1} D_{i-1} + 2(\mu - \lambda)^i D_{i-2}; \\ &\dots \\ (i-1)!(1-P)^{i-1} &= i(i-1) \dots 2(\mu - \lambda) D_i + i^2(i-1) \dots 3(\mu - \lambda)^2 D_{i-1} + \dots + i! D_i; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (P\mu)^{i-1} &= (\mu - \lambda)^i B_i; \\ (i-1)(1-P)(P\mu)^{i-2} &= i(\mu - \lambda)^{i-1} B_i + (\mu - \lambda)^i B_{i-1}; \\ (i-1)(i-2)(1-P)^2(P\mu)^{i-3} &= i(i-1)(\mu - \lambda)^{i-2} B_i + \\ &+ 2i(\mu - \lambda)^{i-1} B_{i-1} + 2(\mu - \lambda)^i B_{i-2}; \\ &\dots \\ (i-1)!(1-P)^{i-1} &= i(i-1) \dots 2(\mu - \lambda) B_i + i^2(i-1) \dots 3(\mu - \lambda)^2 B_{i-1} + \dots + i! B_i; \end{aligned} \quad (16)$$

Общие аналитические выражения для коэффициентов D_{i-j} и B_{i-j} , полученные из соотношений (15) и (16), являются достаточно громоздкими. При $P = 1$ поиск решения несколько упрощается и сводится к преобразованию следующих изображений ФЖ:

$$\tilde{\varphi}(s) = s^{-1} + \lambda \sum_{i=1}^n (\lambda\mu)^{i-1} \tilde{\beta}_i(s), \quad (17)$$

$$\text{где } \tilde{\beta}_i(s) = \frac{1}{(s+\lambda)^i (s+\mu)^i} = \sum_{j=0}^{i-1} \left[\frac{D_{i-j}}{(s+\lambda)^{i-j}} + \frac{B_{i-j}}{(s+\mu)^{i-j}} \right], \quad (18)$$

$$D_{i-j} = (-1)^j C_{i+j-1}^{i-1} (\mu - \lambda)^{-(i+j)}, \quad B_{i-j} = (-1)^j C_{i+j-1}^{i-1} (\lambda - \mu)^{-(i+j)},$$

C_x^y – число сочетаний из x элементов по y ; $x, y \in \mathbb{N}$.

Для обращения полученных преобразований Лапласа (14), (18) используем соответствия между изображениями и оригиналами формулы:

$$\frac{D_{i-j}}{(s+\lambda)^{i-j}} \rightarrow \frac{D_{i-j}}{(i-j-1)!} t^{i-j-1} e^{-\lambda t}, \quad \frac{B_{i-j}}{(s+\mu)^{i-j}} \rightarrow \frac{B_{i-j}}{(i-j-1)!} t^{i-j-1} e^{-\mu t}.$$

В результате получаем следующие итоговые выражения:

$$\varphi(t) = 1 - \lambda P \sum_{i=1}^n \lambda^{i-1} \alpha_i(t), \quad (19)$$

$$\text{где } \alpha_i(t) = \sum_{j=0}^{i-1} \frac{t^{i-j-1}}{(i-j-1)!} (D_{i-j} e^{-\lambda t} + B_{i-j} e^{-\mu t}), \quad (20)$$

D_{i-j} и B_{i-j} определяются с помощью соотношений (15) и (16).

При $P = 1$ используется обратное преобразование Лапласа выражения (17):

$$\varphi(t) = 1 - \lambda \sum_{i=1}^n (\lambda\mu)^{i-1} \beta_i(t), \quad (21)$$

$$\text{где } \beta_i(t) = \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^j C_{i+j-1}^{i-1} \frac{t^{i-j-1}}{(i-j-1)!(\mu-\lambda)^{i+j}} (e^{-\lambda t} + (-1)^{i+j} e^{-\mu t}). \quad (22)$$

Процедура определения значений ФЖ при использовании ДМП включает следующие основные этапы:

1. Определение и анализ исходных данных: прогнозируемого числа КА n , вероятности поражения ОИ при каждом воздействии P , ожидаемого времени ведения атак T , среднего времени до воздействия этой атаки m_η и среднего времени восстановления ОИ m_τ ;
2. Обоснование целесообразности использования экспоненциальных законов распределения времени до воздействия и времени восстановления ОИ. Определение параметров этих законов $\lambda = 1/m_\eta$, $\mu = 1/m_\tau$;
3. Вывод аналитических соотношений или разработка алгоритмов определения значений ФЖ с помощью выражений (19), (20), (15), (16) при $P < 1$ или с помощью выражений (21), (22) при $P = 1$;
4. Определение значений ФЖ для конкретных количественных данных n , P , λ , μ .

Обсуждение результатов. Пусть дано, что число КА $n = 2$, интенсивность воздействий $\lambda = 1$, интенсивность восстановления $\mu = 2$, вероятность поражения $P = 0,5$, ожидаемое время ведения атак $T = 2$. Необходимо определить ФЖ и ее наименьшее значение, построить и сравнить графики функции для интенсивности воздействий $\lambda = 1, 2, 3, 4$.

В соответствии с формулами (19) и (20) общее выражение для ФЖ имеет вид:

$$\varphi(t) = 1 - \lambda P[\alpha_1(t) + \alpha_2(t)],$$

$$\text{где } \alpha_1(t) = D_1 e^{-\lambda t} + B_1 e^{-\mu t}, \quad \alpha_2(t) = t(D_2 e^{-\lambda t} + B_2 e^{-\mu t}) + D_1 e^{-\lambda t} + B_1 e^{-\mu t}.$$

Коэффициенты D_1 и B_1 определяем для $\alpha_1(t)$ при условии $i = 1$. В результате получаем:

$$D_1 = (\mu - \lambda)^{-1}; \quad B_1 = (\lambda - \mu)^{-1}.$$

Коэффициенты D_2 , B_2 , D_1 , B_1 определяем для $\alpha_2(t)$ при условии $i = 2$. В результате получаем:

$$D_2 = (\mu - \lambda + P\lambda)(\mu - \lambda)^{-2}; \quad B_2 = P\mu(\lambda - \mu)^{-2};$$

$$D_1 = [(\mu - \lambda)(1 - P) - 2(\mu - \lambda - P\lambda)](\mu - \lambda)^{-3}; \quad B_1 = [(1 - P)(\lambda - \mu) - 2P\mu](\lambda - \mu)^{-3}.$$

Подставляем заданные значения λ , μ , P и полученные коэффициенты в общее выражение для ФЖ и после преобразований получаем:

$$\varphi(t) = 1 - 0,75(t - 1)e^{-t} - 0,5(t + 1,5)e^{-2t}.$$

Минимальное значение $\varphi_m \approx 0,83$ функция $\varphi(t)$ принимает в точке $t_m \approx 1,04 < T$, поэтому имеем:

$$\inf_{t \in (0, T]} = \varphi(t_m) \approx 0,83.$$

Графики функций, составленные с использованием соответствующей компьютерной программы, изображены на рис. 2, шкала времени t имеет размерность часы. Шкала $\varphi(t)$ имеет размерность вероятности. Из рис. 2 видно, что при неизменной интенсивности восстановления работоспособности ОИ ФЖ существенно уменьшается при возрастании интенсивности КА. При этом наименьшее значение ФЖ может составлять величину $\varphi_m \approx 0,64$ в случае $\lambda = 4$. Процедуру вывода соотношений для $\varphi(t)$ можно упростить, используя предложенный ниже подход, основанный на суммировании взвешенных значений ФЖ при $P = 1$ и i -м сочетании из n воздействий и k поражений ОИ $\varphi_{ki}(t, P = 1)$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$. При этом сокращается объем промежуточных вычислений при определении коэффициентов D_{i-j} и B_{i-j} .

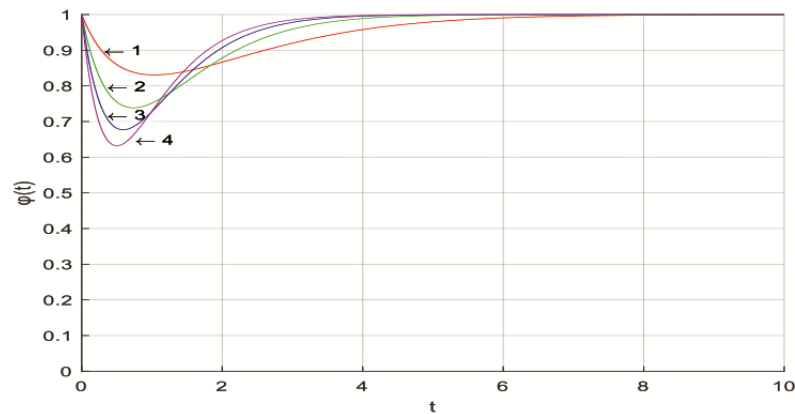


Рис.2. Графики функции живучести 1 - при $\lambda = 1$, 2 - при $\lambda = 1$, 3 - при $\lambda = 3$, 4 - при $\lambda = 4$

Fig.2. Graphs of the survivability function 1 - at $\lambda = 1$, 2 - at $\lambda = 2$, 3 - at $\lambda = 3$, 4 - at $\lambda = 4$

Так как каждому значению k соответствует m_k различных сочетаний возможных поражений и восстановлений ОИ из n по k , и вероятность каждого сочетания $P_k = P^k(1 - P)^{n-k}$, то ФЖ выражается следующим образом:

$$\varphi(t) = \sum_{k=0}^n P_k \sum_{j=1}^{m_k} \varphi_{k_i}(t, P=1), \text{ где } m_k = C_n^k. \quad (23)$$

В том случае, если все n воздействий не приводят к поражению ОИ, то $\varphi_{01}(t, P=1) = 1$.

Выражения для φ_{k_i} определяются путем формирования соответствующих сочетаний k_i при заданном числе n воздействий и k поражений ОИ. Каждому сочетанию k_i будет соответствовать граф переходов (рис.3), где $z_j = 1, z'_j = 0, j = 1, 2, \dots, k; z_{k+1}$ – поглощающее состояние. Вероятности переходов равны единице, а функции распределения $F_j(t)$ времени пребывания процесса в состоянии $z_j = 1$ будут определяться числом воздействий противника n_j , которые он должен осуществить до j -го поражения ОИ.

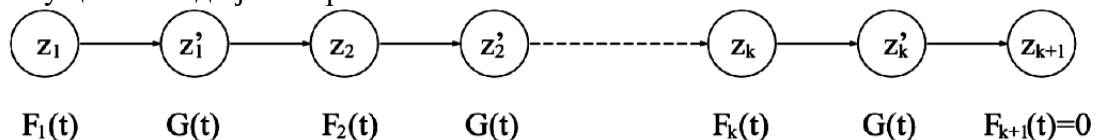


Рис.3. Граф переходов при $P = 1$

Fig.3. Transition graph for $P = 1$

В результате на основании нижеуказанного соотношения получаем (24):

$$\varphi(t, P=1) = 1 - \sum_{j=1}^n [F^{(j)}(t) * g^{(j-1)}(t) - F^{(j)}(t) * g^{(j)}(t)], g^{(0)}(t) = 1,$$

где знак «*» обозначает операцию свертки функций, определяемую как

$$(F * g)(t) = \int_0^t F(t - \tau)g(\tau)d\tau, t \geq 0,$$

и где $g^{(j)}(t) = g * g^{(j-1)}$ – j -кратная свертка функции g , задается рекурсией;
 $g(t) = G'(t)$ – плотность распределения времени восстановления;

$$\varphi(t, P=1) = 1 - \sum_{j=1}^n [F^{(n_j)}(t) * g^{(j-1)}(t) - F^{(n_j)}(t) * g^{(j)}(t)]; n_j = \sum_{s=1}^j r_s(k_i), \quad (24)$$

где n_j – суммарное число воздействий до j -го поражения ОИ; $r_s(k_i)$ – число КА после $(s - 1)$ -го восстановления до s -го поражения ОИ, соответствующее сочетанию k_i .

На практике целесообразно выделить отдельные повторяющиеся (стандартные) соотношения в формулах для различных φ_{ki} , что позволяет упростить соответствующие компьютерные программы для вычисления. Например, используя соотношения $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$:

$$\begin{aligned} F_1 &= F(t) - F(t) * g(t); F_2 = F^{(2)}(t) - F^{(2)}(t) * g(t); F_3 = F^{(3)}(t) - F^{(3)}(t) * g(t); \\ F_4 &= F^{(2)}(t) * g(t) - F^{(2)}(t) * g^{(2)}(t); F_5 = F^{(3)}(t) * g(t) - F^{(3)}(t) * g^{(2)}(t); \\ F_6 &= F^{(3)}(t) * g^{(2)}(t) - F^{(3)}(t) * g^{(3)}(t). \end{aligned}$$

Тогда, применяя формулы (23) и (24), получаем:

$$\begin{aligned} \varphi(t, 1) &= 1 - PF_1; \\ \varphi(t, 2) &= 1 - P[F_1 + (1 - P)F_2] - P^2F_4; \\ \varphi(t, 3) &= 1 - P[F_1 + (1 - P)F_2 + (1 - P)^2F_3] - P^2[F_4 + 2(1 - P)F_3]P^3F_6, \end{aligned} \quad (25)$$

где $\varphi(t, n)$ – ФЖ ОИ при n КА.

Выражения для $F_i, i = 1, 2, \dots, 6$, определяются путем выполнения соответствующих сверток функций $F(t)$ и $G(t)$. Для экспоненциальных законов распределения при $\mu \neq \lambda$ получаем:

$$\begin{aligned} F_1 &= \lambda(\mu - \lambda)^{-1}(e^{-\lambda t} - e^{-\mu t}); \\ F_2 &= \lambda^2(\mu - \lambda)^{-2}\{[t(\mu - \lambda) - 1]e^{-\lambda t} + e^{-\mu t}\}; \\ F_3 &= \lambda^3(\mu - \lambda)^{-3}\{[0,5t^2 - t(\mu - \lambda)^{-1} + (\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\lambda t} - (\mu - \lambda)^{-2}e^{-\mu t}\}; \\ F_4 &= \lambda^2\mu(\mu - \lambda)^{-2}\{[t - 2(\mu - \lambda)^{-1}]e^{-\lambda t} + [t + 2(\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\mu t}\}; \\ F_5 &= \lambda^3\mu(\mu - \lambda)^{-2}\{[0,5t^2 - 2t(\mu - \lambda)^{-1} + 3(\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\lambda t} - [t(\mu - \lambda)^{-1} + 3(\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\mu t}\}; \\ F_6 &= \lambda^3\mu^2(\mu - \lambda)^{-3}\{[0,5t^2 - 3t(\mu - \lambda)^{-1} + 6(\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\lambda t} - \\ &\quad - [0,5t^2 + 3t(\mu - \lambda)^{-1} + 6(\mu - \lambda)^{-2}]e^{-\mu t}\}. \end{aligned} \quad (26)$$

При $\mu = \lambda$ функция $F(t) = G(t)$, поэтому выражения для $F_i, i = 1, 2, \dots, 6$, принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} F_1 &= F(t) - F^{(2)}(t); F_2 = F^{(2)}(t) - F^{(3)}(t); F_3 = F_4 = F^{(3)}(t) - F^{(4)}(t); \\ F_5 &= F^{(4)}(t) - F^{(5)}(t); F_6 = F^{(5)}(t) - F^{(6)}(t), \end{aligned} \quad (27)$$

где $F^{(n)}(t)$ – функция распределения Эрланга n -го порядка – закон распределения для композиции независимых случайных величин, распределенных по экспоненциальному закону: $F^{(n)}(t) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i (i!)^{-1} e^{-\lambda t}$.

В результате, при $\mu = \lambda$ имеем:

$$\begin{aligned} F_1 &= t\lambda(1!)^{-1}e^{-\lambda t}; F_2 = (t\lambda)^2(2!)^{-1}e^{-\lambda t}; F_3 = F_4 = (t\lambda)^3(3!)^{-1}e^{-\lambda t}; \\ F_5 &= (t\lambda)^4(4!)^{-1}e^{-\lambda t}; F_6 = (t\lambda)^5(5!)^{-1}e^{-\lambda t}. \end{aligned}$$

Путем введения идентификаторов для повторяющихся соотношений в формулах (26) и (27), например, для $e^{-\lambda t}, e^{-\mu t}, (\mu - \lambda)$ и т. д., и использования выражений (25) можно составить достаточно компактные компьютерные программы определения значений ФЖ для случаев экспоненциальных законов распределения $F(t)$ и $G(t)$. При этом параллельно требуется проверять условие исчерпания ресурса $R \leq R_0$. Если условие не выполняется, то считается, что процесс функционирования ОИ перешел в невозвратное состояние и требуется пополнение ресурса.

Вывод. Таким образом, результат исследований позволяет утверждать, что:

1. Задача оценки устойчивости ОИ в условиях КА имеет достаточную практическую значимость и востребована органами управления ИБ, что подтверждается апробацией на профильных конференциях;

2. Названную задачу и сопутствующие ей частные задачи можно выделить в особый однозначно определенный класс задач;

3. Выделенный класс задач, с учетом принятых ограничений, может быть представлен в виде соответствующих математических моделей.

Дальнейшие исследования планируется направить на разработку математической модели для оценки устойчивости функционирования ОИ в условиях КА: при произвольных законах распределения $F_i(t)$ и $G_i(t)$ и различных P_i . В этом случае процесс функционирования ОИ позиционируется как общий полумарковский процесс восстановления – это тема следующей публикации; при одинаковых законах распределения $F_i(t) = F(t)$ и $G_i(t) = G(t)$ и равных $P_i = P$. В этом случае процесс функционирования можно позиционировать как частный полумарковский – это тема также следующей публикации.

И в том, и в другом случаях новизна исследования будет определяться учетом при моделировании требуемого R_0 имеющегося ресурса R , выделенного для восстановления работоспособности ОИ после нанесения КА.

Библиографический список:

1. https://qrator.net/presentations/2021/QratorLabs_Network_Security_Availability_in_2020_RU.pdf [Visited March 20, 2022] Report on Network security and Availability in 2020 Available at.
2. Data Breach Investigations Report Available at: <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2019-data-breach-investigations-report.pdf> [Visited March 20, 2022].
3. Федеральный закон от 27.07.2006 N 149-ФЗ "Об информации, информационных технологиях и защите информации" // СПС КонсультантПлюс.
4. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2006 г. N 374-ст. М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
5. Приказ ФСТЭК России от 29 апреля 2021 г. N 77 «Об утверждении порядка организации и проведения работ по аттестации объектов информатизации на соответствие требованиям о защите информации ограниченного доступа, не составляющей государственную тайну. Зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 10 августа 2021 года, регистрационный N 64589. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/608228209>.
6. ГОСТ Р ИСО 19011–2021 Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 апреля 2021 г. N261-ст. М.: Стандартинформ, 2021. – 42 с.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27007—2014. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Руководства по аудиту систем менеджмента информационной безопасности. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1.06.2015 М.: ФГУП «Стандартинформ», 2015. – 27 с.
8. ГОСТ Р 59516—2021. Информационные технологии. Менеджмент информационной безопасности. Правила страхования рисков информационной безопасности. Утверж. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 мая 2021 г. N420-ст. М.: Стандартинформ, 2021. – 20 с.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. N 632-ст. М.: Стандартинформ, 2012 - 91 с.
10. Макаренко С. И. Аудит информационной безопасности: основные этапы, концептуальные основы, классификация мероприятий // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 1–29.
11. Лившиц И. И. Современная практика аудита информационной безопасности // Управление качеством. 2011. № 7. С. 34–41.
12. Кульба В. В., Шелков А. Б., Гладков Ю. М., Павельев С. В. Мониторинг и аудит информационной безопасности автоматизированных систем. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2009. 94 с.
13. Марков А. С., Цирлов В. Л., Барабанов А. В. Методы оценки несоответствия средств защиты информации / под ред. А. С. Маркова. – М.: Радио и связь, 2012. 192 с.
14. Хохлачев Е. Н. Организация и технологии выработки решений при управлении системой и войсками связи. Часть 2. Выработка решений при восстановлении сетей связи. – М.: ВА РВСН, 2009. 241 с.
15. ГОСТ Р МЭК 61165-2019. Надежность в технике. Применение марковских методов. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05 сентября 2019 г. N 635-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.
16. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. N 1247-ст. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
17. Воеводин В. А., Маркин П. В., Маркина М. С., Буренок Д. С. Методика разработки программы аудита информационной безопасности с учетом весовых коэффициентов значимости свидетельств аудита на основе метода анализа иерархий // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 96–129. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-96-129.
18. Воеводин В. А., Буренок Д. С., Маркин П. В., Маркина М. С. «Программа метода анализа иерархий». Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020667542. Дата регистрации 24.12.2020.
19. V. A. Voevodin. Monte Carlo method for solving the problem of predicting the steadiness of the functioning of an automated control system in the conditions of massive computer attacks. Марчукские научные чтения-2021: Тезисы Междунар. конф., 4–8 октября 2021 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. С 75. DOI 0.24412/CL-35064-2021-095.

20. Надежность и эффективность в технике. Справочник Том № 5. Проектный анализ надежности/ под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1989, – 376 с.

References:

1. https://qrator.net/presentations/2021/QratorLabs_Network_Security_Availability_in_2020_RU.pdf[Visited March 20, 2022] Report on Network security and Availability in 2020 Available at.
2. Data Breach Investigations Report Available at: <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2019-data-breach-investigations-report.pdf> [Visited March 20, 2022].
3. Federal'ny' zakon ot 27.07.2006 N 149-FZ "Ob informacii, informacionny'h tehnologiyah i zashhite informacii" SPS Konsul'tant Plyus. (In Russ).
4. GOST R 51275–2006. Zashhita informacii. Ob`ekt informatizacii. Faktory, vozdeystviyushhie na informaciyu. Obshhie polozheniya: nacz. standart Ros. Federacii: izd. ofic.: utv. i vved. v dejstvie Prikazom Feder. agentstva po tehn. regulirovaniyu i metrologii ot 27 dekabrya 2006 g. № 374-st: vved. v pervy'e: data vved. 2021-11-30. M.: Standartinform, 2018; 8. (In Russ).
5. Prikaz FSTEK Rossii ot 29 aprelya 2021 g. N 77 On approval of the procedure for organizing and carrying out work on attesting informatization objects for compliance with the requirements for the protection of restricted information that is not a state secret. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 10, 2021, registration N 64589. Elektronnyj resurs: <https://docs.cntd.ru/document/608228209>. (In Russ).
6. GOST R ISO 19011–2021 Guidelines for auditing management systems. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated April 21, 2021 N261-st. M.: Standartinform, 2021; 42. (In Russ).
7. GOST R ISO/MEK 27007—2014. Information technology. Methods and means of ensuring security. Guidelines for auditing information security management systems. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated 06/01/2015M.: FGUP «Standartinform», 2015; 27. (In Russ).
8. GOST R 59516—2021. Information Technology. Information security management. Information security risk insurance rules. Approval and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated May 20, 2021 N420-st.M.: Standartinform, 2021; 20. (In Russ).
9. GOST R ISO/MEK 27005-2010 Methods and means of ensuring security. Information security risk management. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 30, 2010 N 632-st.M.: Standartinform, 2012; 91. (In Russ).
10. Makarenko S. I. Audit of information security: main stages, conceptual framework, classification of measures. *Control Systems, Communications and Security*. 2018; 1: 1–29. (In Russ).
11. Livshic I. I. Modern practice of information security audit. *Quality management*. 2011;7:34–41. (In Russ).
12. Kul'ba V. V., Shelkov A. B., Gladkov YU. M., Pavel'ev S. V. Monitoring and audit of information security of automated systems. M.: IPU im. V. A. Trapeznikova RAN, 2009; 94. (In Russ).
13. Markov A. S., Cirlov V. L., Barabanov A. V. Methods for assessing the inconsistency of information security tools M.: *Radio and communication*. 2012; 192. (In Russ).
14. Hohlachev E. N. Organization and technology of making decisions in the management of the communication system and troops. Part 2. Development of solutions for the restoration of communication networks. M.: VA RVSN, 2009; 241 (in Russian).
15. GOST R MEK 61165-2019. Application of Markov methods. Approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September N 635-st. M.: Standartinform, 2019; 31. (In Russ).
16. GOST R 27.001-2009. Nadezhnost' v tekhnike. Sistema upravleniya nadezhnost'yu. Utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 15 dekabrya 2009 g. N 1247-st. M.: Standartinform, 2010; 12. (In Russ).
17. Voevodin V. A., Markin P. V., Markina M. S., Burenok D. S. Technique for developing an information security audit program taking into account the weight coefficients of the significance of audit evidence based on the hierarchy analysis method. communications and security. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2021; 2: 96–129. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-96-129. (In Russ).
18. Voevodin V. A., Burenok D. S., Markin P. V., Markina M. S. «Programma metoda analiza ierarhij». Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlya EVM № 2020667542. Data registracii 24.12.2020. (In Russ).
19. V. A. Voevodin. Monte Carlo method for solving the problem of predicting the steadiness of the functioning of an automated control system in the conditions of massive computer attacks. *Marchuk Scientific Readings-2021: Abstracts of the Intern. Conf.*, October 4–8, 2021; 75. *Institute of Comput. mathematics and math. geophysics SB RAS*. DOI 0.24412/CL-35064-2021-095.
20. Reliability and efficiency in technology. Handbook Volume No. 5. Design reliability analysis / ed. IN AND. Patrushev and A.I. Rembeza. *Mashinostroenie*. 1989; 376. (In Russ).

Сведения об авторах:

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

Виноградов Иван Вадимович, студент; кафедра информационной безопасности; ivanvinogradov1111@gmail.com

Волков Даниил Игоревич, студент; кафедра информационной безопасности; d.i.volkov2002@mail.ru

Information about authors:

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

Ivan V. Vinogradov, Student; Department of Information Security; ivanvinogradov1111@gmail.com

Daniil I. Volkov, Student; Department of Information Security; d.i.volkov2002@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.08.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.09.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 20.09.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05653

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-52-60

Оригинальная статья /Original Paper

Аппаратно-программные методы защиты ресурсов информационной системы персональных данных от несанкционированного доступа путем «сниффинг-атак»

А.Р. Газизов

Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматриваются аппаратно-программные методы защиты ресурсов информационной системы персональных данных от несанкционированного доступа путем «сниффинг-атак», суть которого заключается в перехвате данных, которые доставляются в рамках наблюдаемой системы в виде пакетов. **Метод.** Анализ безопасности ресурсов ИСПДн относительно НСД путем «сниффинг-атак» включает пять условных этапов: сбор информации в ИСПДн, сканирование ИСПДн, получение доступа к ИСПДн, закрепление в ИСПДн, формирование отчета. При этом – анализ безопасности всегда сопряжен с несанкционированным доступом к данным (НСД). **Результат.** Для предотвращения НСД путем «сниффинг-атак» предлагаются следующие аппаратно-программные решения: применение протокола HTTPS – безопасной версии протокола HTTP; использование статической таблицы ARP, формируемой вручную; сканирование вычислительной сети ИСПДн программой AntiSniff; шифрование трафика вычислительной сети ИСПДн. **Вывод.** Представленные аппаратно-программные решения позволяют минимизировать последствия несанкционированного воздействия на информационные системы персональных данных.

Ключевые слова: анализ безопасности; активный перехват трафика; безопасность ресурсов; закрепление в системе; информационная система; пассивный перехват трафика; персональные данные; получение доступа; сбор информации; сниффинг-атака; сканирование; средства защиты ресурсов; формирование отчета; этапы анализа

Для цитирования: А.Р. Газизов. Аппаратно-программные методы защиты ресурсов информационной системы персональных данных от несанкционированного доступа путем «сниффинг-атак». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):52-60. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-52-60

Hardware, software and organizational means of protecting the resources of the personal data information system from unauthorized access by means of "sniffing attacks"

A.R. Gazizov

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The article discusses hardware and software methods of protecting the resources of the personal data information system from unauthorized access by means of "sniffing attacks"; the essence of which is to intercept data that is delivered within the observed system in the form of packets. **Method.** The analysis of the security of resources by the personal data information system regarding unauthorized access to data by means of "sniffing attacks" includes five conditional stages: collecting information in the personal data information system, scanning the personal data information system, gaining access to the personal data information system, securing personal data in the information system, generating a report; at the same time, security analysis it is always associated with unauthorized access to data. **Result.** To prevent unauthorized access to data by means of "sniffing attacks", the following software and hardware solutions are proposed to minimize the consequences of

unauthorized exposure to the personal data information system: the use of the HTTPS protocol, a secure version of the HTTP protocol; the use of a static ARP table generated manually; scanning of the computer network of the personal data information system by the AntiSniff program; encryption of the computer network traffic networks of the personal data information system. **Conclusion.** The presented hardware and software solutions allow minimizing the consequences of unauthorized impact on personal data information systems.

Keywords: security analysis; active traffic interception; resource security; anchoring in the system; information system; passive traffic interception; personal data; access; information collection; sniffing attack; scanning; resource protection tools; report generation; analysis stages

For citation: A.R. Gazizov. Hardware, software and organizational means of protecting the resources of the personal data information system from unauthorized access by means of "sniffing attacks". Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 52-60. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-52-60

Введение. В соответствии с Федеральным законом от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ «О персональных данных» под информационной системой персональных данных (ИСПДн) будем понимать совокупность содержащихся в базах данных персональных данных и обеспечивающих их обработку информационных технологий и технических средств [1, 18]. Анализ безопасности ресурсов ИСПДн относительно несанкционированного доступа (НСД) проводился в организации, осуществляющей торговую деятельность, после получения письменного разрешения руководителя организации на проведение работ по анализу безопасности ресурсов ИСПДн; при условии подписания соглашения о неразглашении информации, полученной в результате анализа.

Постановка задачи. Анализ безопасности ресурсов ИСПДн относительно НСД путем «сниффинг-атак» необходимо разделить на пять этапов: сбор информации в ИСПДн, сканирование ИСПДн, получение доступа к ИСПДн, закрепление в ИСПДн, формирование отчета.

Этапы анализа безопасности ресурсов ИСПДн.

1) Сбор информации в ИСПДн условно разделен на пассивную и активную фазы с целью получения её максимального количества относительно исследуемого объекта информатизации. Данный этап является наиболее важными и максимально трудоёмким.

Во время пассивной фазы ИСПДн «не знает» о том, что был начат сбор информации из открытых и общедоступных источников, таких как поисковые системы и базы данных НИС. Базы данных НИС – это ссылка на запись, которая размещена в базе данных той или иной организации, регулирующей деятельность во всемирной паутине [12]. Активная фаза предполагает непосредственное взаимодействие с самой ИСПДн; в том числе – сканирование портов, определение работающих сервисов и их версий, а также определение версий операционной системы, под управлением которой работают конечные пользователи и сервисы.

2) Сканирование ИСПДн осуществляется на основе информации, полученной на предыдущем этапе, с использованием следующего инструментария: ICMP-сканеры, SNMP-сканеры, сканеры открытых портов, сканеры уязвимостей.

Сканирование ИСПДн позволило получить следующую информацию: IP-адреса, версии операционных систем, запущенные сервисы и их версии, «имена компьютеров», учетные записи пользователей.

3) Получение доступа к ИСПДн. Используя данные, полученные после сканирования ИСПДн, выявляется уязвимость, позволяющая НСД к персональным данным.

4) Закрепление в ИСПДн предполагает закрепление в системе, к которой ранее был получен доступ, так называемые методы сохранения доступа к ИСПДн: установка троянских программ, backdoor или rootkit.

5) Формирование отчета относительно проделанной работы является последним этапом.

Подводя итог, следует отметить – анализ безопасности ресурсов ИСПДн всегда сопряжен с НСД; вопрос состоит исключительно в легитимности мероприятий анализа или её отсутствии [15,16].

Методы исследования. Анализ безопасности ресурсов ИСПДн путем «сниффинг-атак». «Сниффинг» – это один из простейших методов мониторинга трафика, проходящего через ИСПДн. Его суть заключается в перехвате данных, которые доставляются в рамках наблюдаемой системы в виде пакетов. Метод называют «сниффинг» потому, что он напоминает «обнюхивание» данных анализаторами сетевых протоколов, которые установил системный администратор. «Сниффинг» предполагает НСД к данным, передаваемым по проводам, оптоволокну, витой паре, радиоволнам или в любой другой среде [7].

Для целей анализа рассмотрим НСД к данным ИСПДн, передаваемым по проводам и радиоволнам вычислительной сети ИС. Применяемые в вычислительной сети ИСПДн сетевые карты принимают данные в виде сигналов, поступающие к ним по проводам, а также – радиосигналы. Далее – сигналы трансформируются в полезную информацию. Когда на одну из сетевых карт приходит пакет данных, в заголовке указывается – сетевой адрес интерфейса Media Access Control (MAC), а также – широковещательный адрес подсети broadcast или многоадресный пакет multicast; при этом – сетевая карта обрабатывает полученный сигнал, а информация передается в ИСПДн. Исходя из этого, чтобы осуществить перехват всего трафика, идущий по вычислительной сети ИСПДн, необходимо внести изменения в режим работы сетевой карты. Реализуется данный метод заменой драйвера или библиотеки, через которые операционная система (ОС) управляет сетевым интерфейсом.

Для ОС Windows – WinPcap; для ОС Linux – libpcap. Также, необходимо учесть среду передачи данных. При этом – для беспроводных сетей, чтобы перехватить трафик, необходимо заменить драйвер или библиотеку и установить специальное ПО; а для сетей, в которых для подключения используется кабель, необходимо получить доступ непосредственно к оборудованию [3,6].

Анализ безопасности ресурсов ИСПДн с использованием проводной сети предполагает использование кабеля типа витая пара; при этом – подключение реализуется с использованием топологии сети типа «звезда», изображенной на рис.1; когда интерфейсы в пределах такого сегмента вычислительной сети получают всю проходящую по ней информацию.

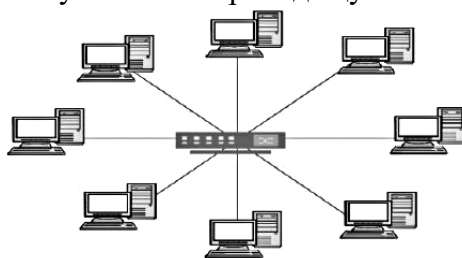


Рис. 1. Топология типа «звезда»

Fig. 1. Star topology

Концентратор (hub) функционирует по такому же принципу; когда подключенные к нему рабочие станции ИСПД, получают всю информацию, направленную в вычислительную сеть ИСПДн, несмотря на то, что для каждой из них используется для подключения отдельный кабель. Таким образом, передача данных по проводам и радиоволнам в вычислительной сети ИСПДн организации является достаточно шаблонной задачей.

В вычислительной сети ИСПДн организации используется коммутатор (switch); по этой причине перехват трафика незначительно усложняется в связи с тем, что коммутатор «знает» адреса рабочих станций, подключенных к его интерфейсу; передавая информацию от отправителя исключительно адресату. Для анализа безопасности ресурсов ИСПДн путем «сниффинг-атак» в аспекте возможного перехвата трафика необходимым элементом является соответству-

ющее программное обеспечение (ПО). С целью минимизации затрат на анализ был выбран бесплатный анализатор пакетов с открытым исходным Wireshark [2,4].

В анализируемой вычислительной сети ИСПДн применимы пассивный и активный методы перехвата трафика. Пассивный перехват трафика будет реализовываться с использованием анализатора пакетов Wireshark. Данное ПО способно работает как под управлением ОС Windows и Linux; позволяя при этом перехватывать, фильтровать, анализировать и сохранять сетевой трафик. Как правило, анализатор пакетов Wireshark используют специалисты по информационной безопасности организаций. По этой причине, обозначенное ПО будет рекомендовано администратору вычислительной сети ИСПДн организации, для выявления и устранения проблем, которые возникнут в ходе работы сетевых сервисов.

После запуска программы Wireshark, выбран интерфейс для мониторинга – eth0; в течение 60 минут было собрано порядка тридцати пяти тысяч пакетов. В данном конкретном случае трафик в вычислительной сети ИСПДн организации был ниже среднего.

Начиная с Domain Name System (DNS-запроса), необходимо отфильтровать запросы к сайту centr.expert.ru. После применения фильтра, появилась возможность увидеть полную, последовательную историю запросов и ответов браузера к DNS-серверу. Зная, по какому IP-адресу будет происходить дальнейшая коммутация, необходимо создать соответствующий фильтр (ip.addr==81.19.72.38), как изображено на рис. 2.

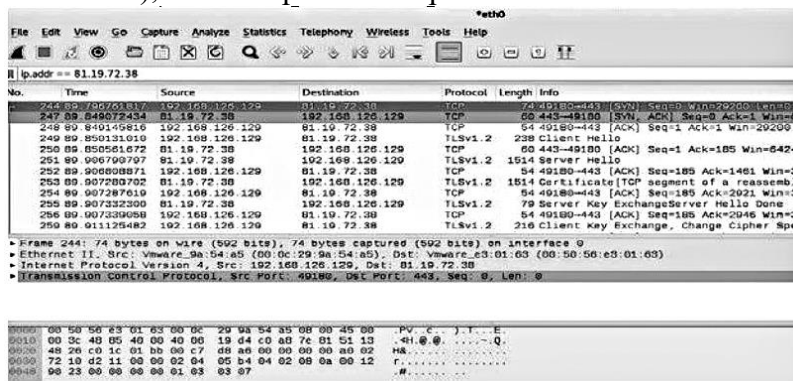


Рис. 2. Процесс коммутации с web-сервером

Fig. 2. The process of switching with a web server

Также можно отследить, поток данных для более детального анализа полученных пакетов, как изображено на рис. 3.

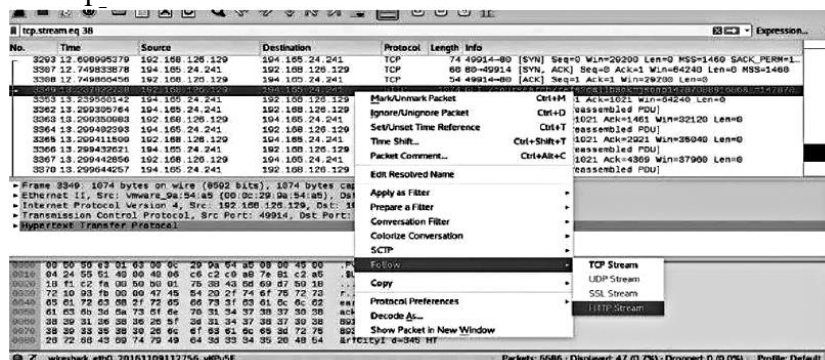


Рис. 3. Процесс отслеживания потока

Fig. 3. Flow tracking process

Для лучшего понимания результата анализа безопасности ресурсов ИСПДн, в Wireshark присутствует возможность отследить определенные потоки данных. В случае с HyperText Transfer Protocol (HTTP) была выбрана функция «follow HTTP stream»

В ходе анализа был применен графический доступ к интерфейсу; вместе с тем, существует иной метод анализа в терминальном исполнении – инструмент Tcprdump, представляю-

щий собой средство сетевого анализа, используемое специалистами в сфере информационной безопасности [2,4].

После запуска сканера было выявлено соединение ok.ru; при этом – количество данных для анализа избыточно. Для решения задачи анализа следует воспользоваться встроенным фильтром заголовков, акцентируя внимание на пакеты с флагами PSH и ACK по следующим причинам:

- 1) PSH-пакет делает этот пакет пакетом PUSH («проталкивания»). При нормальном потоке передачи данных, система получателя не будет подтверждать получение каждого пакета сразу же после его получения. Вместо этого система получателя в течение некоторого времени будет собирать и хранить полученные данные в буфере, пока не передаст их приложению пользователя. Пакет PUSH «инструктирует» систему получателя немедленно передать все полученные ранее данные из буфера в приложение пользователя и немедленно отправить сообщение с подтверждением получения.
- 2) ACK-пакет устанавливается в случае, если он содержит значение номера подтверждения в поле подтверждения. Все пакеты после стартового пакета SYN будут иметь установленный флаг ACK.

Структура прохождения пакетов представлена на рис. 4.

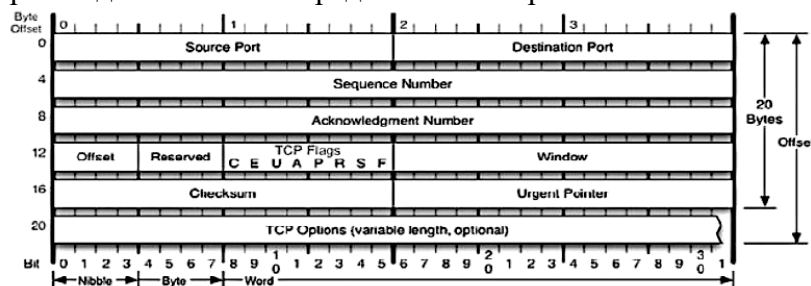


Рис. 4. Структура заголовка сегмента TCP

Fig. 4. The Structure of the TCP Segment Header

Представленная структура демонстрирует, что необходимые флаги A и P (как элемент кода, например: -p istrp или же -A OUTPUT.....) находятся в четвертой и пятой позиции; это обозначает, что в двоичном формате это будет иметь вид 00011000, а в десятичном – 24.

Активный перехват трафика. Этот сегмент анализа безопасности ресурсов вычислительной сети ИСПДн предполагает в качестве конечного результата получение доступа к одному из портов коммутатора. При этом – неважно, будет ли получен доступ к самому коммутатору или же это будет являться сетевой розеткой, имеющей подключение к сетевому оборудованию, расположенному в другом помещении. Главным является факт, что на сетевой интерфейс приходят исключительно те пакеты, которые должны приходить.

Для анализа безопасности ресурсов вычислительной сети ИСПДн предлагается применить один из самых известных способов – переполнение САМ-таблицы, чтобы обойти защиту сети и в принудительном порядке «заставить» коммутатор работать как концентратор; это позволит перехватить весь сетевой трафик. Как правило, все САМ-таблицы имеют конечную величину и определенные данные, которые направляют нужный трафик конкретному работнику организации, а именно MAC-адреса, номер порта и информацию о принадлежности к VLAN.

Переполнение такой таблицы приведет к тому, что коммутатор больше не сможет обрабатывать данные в штатном режиме, и для того, чтобы обеспечить работникам организации минимальный уровень сервиса, коммутатор перестает читать САМ-таблицу и переходит в режим работы концентратора [10,11]. Для проведения атаки, направленной на переполнение САМ-таблицы MAC-адресами, необходимо воспользоваться следующими командами в терминале Kali Linux: root@kali:~# macof.

Следующим шагом является захват ARP-таблицы на маршрутизаторах, которые используют для сопоставления IP и MAC-адресов, что делает возможным для коммутатора выбрать наиболее благоприятный путь для прохождения трафика. Важно то, что широковещательные пакеты, используемые для построения CAM-таблицы, никак не фильтруются; являясь по сути широковещательными. Данная уязвимость опасна тем, что злоумышленник может рассылать по вычислительной сети ИСПД организации недостоверные данные, а также трансформировать режим работы своего компьютера в режим работы концентратора. Во время анализа было использовано ПО Ettercap. При этом – был выбран режим сниффинга и интерфейс eth0, с которым будет осуществляться дальнейшая работа по анализу. После того, как список доступных хостов был получен и проанализирован, следует отметить роутер как первую цель, а случайный компьютер в сети как вторую цель [10,11].

Следующим шагом после определения целей, является непосредственно начало атаки. В ходе анализа был получен доступ к одному из сетевых портов, однако проникновения в вычислительную сеть не было, так как современные коммутаторы обладают способностью контроля доступа по MAC-адресам [1,2,7]. Для завершения анализа и успешного проникновения в вычислительную сеть ИСПДН организации необходимо сменить MAC-адрес компьютера, который используется для анализа следующим способом:

```
root@kali:~# ifconfig eth0 down
root@kali:~# macchanger -r eth0
root@kali:~# ifconfig eth0 up
```

После того, как MAC-адрес был заменен, доступ в вычислительную сеть ИСПДН организации был успешно получен.

Вторым способом анализа безопасности ресурсов вычислительной сети ИСПДН предлагается проверка на предмет уязвимости беспроводного соединения Wi-Fi в организации при помощи атаки Pixie Dust. Анализ проводится с помощью дистрибутива Kali Linux и встроенного в него терминала; а также, набора утилит – исходя из полученного результата, можно определить количество доступных Wi-Fi адаптеров, которые можно использовать для анализа. Информация о сканировании представлена на рис. 5.

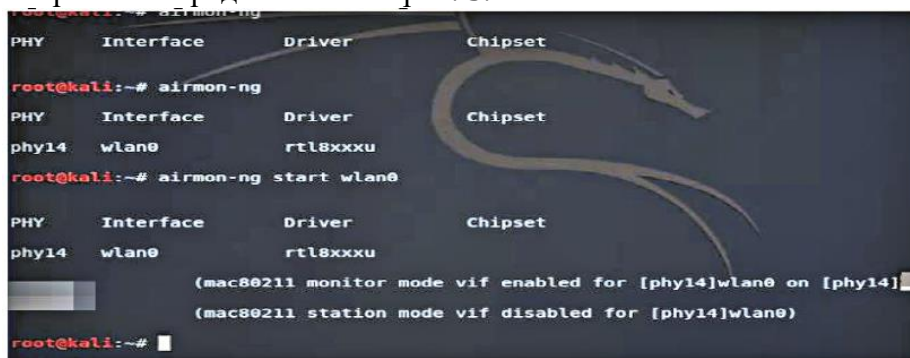


Рис. 5. Доступные Wi-Fi адаптеры
Fig. 5. Available Wi-Fi adapters

После выбора доступного интерфейса wlan0 необходимо включить мониторинг, используя следующую команду в консоли: root@kali:~# airmon-ng start wlan0.

После выполнения вышеописанной команды, адаптер с которого выполняется анализ, переходит в режим мониторинга и имеет название wlan0mon.

Следующая команда проверит доступ к WPS: root@kali:~# wash -I wlan0mon.

Для продолжения анализа была выбрана Pixie dust атака, дающая возможность получить WPS PIN, позволяющий получить пароль от сети. При помощи этой команды будет запущен reaver: root@kali:~# reaver -K -N -S -b (MAC-адрес интерфейса) -I wlan0mon. При этом – ключ i указывает интерфейс в режиме мониторинга, -K атака pixie dust, -b дает возможность

определить MAC-адрес анализируемой цели. В дальнейшем необходимо добавить ключ – А, для ассоциации с точкой доступа в aireplay-ng.

Обсуждение результатов. В итоге – удалось получить WPS PIN и для дальнейшего анализа необходимо получить пароль при помощи следующей команды: `root@kali:~# reaver -A -p 54573895 -N -S -b (MAC-адрес) -I wlan0mon`.

После получения доступа необходимо продолжить анализ безопасности ресурсов вычислительной сети ИСПДн для получения необходимых сведений относительно самой организации и персональных данных ее работников; что обеспечивает выполнение следующих команд:

- `# sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1` – функция подмены mac – адреса роутера субъекта на адрес Kali Linux злоумышленника;
- `iptables -t nat -A PREROUTING -p tcp --destination-port 80 -j REDIRECT --to-port 65000` – по протоколу tcp с порта 80 переводит на порт 65000 тем самым будет осуществляться прослушивание трафика;
- `arp spoof -i` (название сетевой карты с которой будет осуществляться атака) `ip` – субъекта и `ip` роутера – начало атаки;
- `sslstrip -k -l 65000` – подмена защищенного соединения https на небезопасное http в браузере субъекта;
- `tail -f sslstrip.Log` – выводит на экран злоумышленника только логин, пароль и на какой сайт был сделан вход субъектом.

В дальнейшем – злоумышленнику необходимо лишь ждать действий от субъекта атаки, на которого была совершена атака; т.е. после успешной атаки, злоумышленник получает доступ к ресурсам ИСПДн работников организации, в том числе – логин и пароль от учетных записей. Результат изображен на рис. 6 [10,16].



Рис. 6. Информация, вводимая сотрудником организации
Fig. 6. Information entered by an employee of the organization

Проанализирован НСД к данным ИСПДн, передаваемым по проводам и радиоволнам вычислительной сети ИС относительно двух типов сетей передачи данных:

- 1) Беспроводные вычислительные сети, а также сети, построенные с помощью концентраторов; в данном случае НСД к данным является незатруднительным для злоумышленника, т.к. данные относительно общедоступны при их передаче по сети.
- 2) Вычислительные сети, построенные с помощью коммутаторов; в данном случае НСД к данным является более затруднительным для злоумышленника, т.к. данные при их передаче по сети доступны исключительно адресату [16].

Вывод. Для предотвращения НСД к ИСПДн организации путем «сниффинг-атак» предлагаются следующие решения (аппаратно-программные и организационные средства защиты ресурсов), позволяющие минимизировать последствия несанкционированного воздействия на ИСПДн:

- 1) Применение протокола HTTPS – безопасной версии протокола HTTP, которая реализует протокол HTTP с использованием протокола TLS для защиты базового TCP-подключения. В этом случае пароль от учетных записей пользователей будет зашифрован и не виден.

2) Использование статической таблицы ARP, формируемой вручную; в итоге – неуязвимой к ARP – атакам. Для этого следует добавить необходимые MAC – адреса в таблицу. При этом – если отключить использование ARP на сетевых интерфейсах; то доступны будут исключительно те системы, MAC-адреса которых добавлены в ARP-таблицу «нашего» узла, а «наш» MAC-адрес добавлен в ARP-таблицы узлов, с которыми производится обмен трафиком. Если не отключать использование ARP на сетевых интерфейсах, статически заданный MAC-адрес имеет приоритет. Если MAC-адрес для какого-то IP-адреса не задан, используется ARP-запрос.

3) Сканирование вычислительной сети ИСПДн программой AntiSniff, позволяющей выявить рабочую станцию злоумышленника в сети; а также – собирающую и анализирующую не предназначенные для неё данные (пакеты).

4) Шифрование трафика вычислительной сети ИСПДн, для обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности данных [16].

Библиографический список:

1. Geekkies: сайт. – 2022. – URL. <https://geekkies.in.ua/crossplatform/chto-takoe-virtualbox-i-kak-ej-polzovatsja.html> (дата обращения: 05.07.2022).
2. RU-center: сайт. – 2022. – URL. <https://www.nic.ru/help/bazy-dannyh-1228/> (дата обращения: 05.07.2022).
3. Академик – информационная безопасность: сайт. – URL. https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_economic_law/5569/ (дата обращения: 05.07.2022).
4. Академик – официальная терминология: сайт. – 2022. – URL. <https://official.academic.ru/7175> (дата обращения: 05.07.2022).
5. Академик – словарь чрезвычайных ситуаций: сайт. – 2022. – URL. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/emergency/777/> (дата обращения: 05.07.2022).
6. Астайкин, А. И. Методы и средства обеспечения программно-аппаратной защиты информации: научно-техническое издание / А. И. Астайкин, А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев, В. Н. Фомченко. – Саратов: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2015. 224 с. Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/60959.html> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
7. Башлы П. Н. Информационная безопасность и защита информации: учебник / П. Н. Башлы, А. В. Бабаш, Е. К. Баранова. – Москва: РИОР, 2013. 222 с. Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/405000> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: по подписке.
8. Википедия – Kali Linux: сайт. – URL. https://ru.wikipedia.org/wiki/Kali_Linux (дата обращения: 05.07.2022).
9. Гатчин Ю. А. Основы информационной безопасности: учебное пособие / Ю. А. Гатчин, Е. В. Климова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2009. – 84 с. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/67463.html> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
10. Голембиовская О. М. Этапы формирования модели угроз и модели нарушителя информационной безопасности с учетом изменений законодательства Российской Федерации: учебное пособие / О. М. Голембиовская, М. Ю. Рытов, К. Е. Шинаков [и др.]. – Саратов: Вузовское образование, 2021. – 265 с. – ISBN 978-5-4487-0791-9. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/109162.html> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
11. Громов, Ю. Ю. Программно-аппаратные средства защиты информационных систем : учебное пособие / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, К. В. Стародубов, А. А. Кадыков. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. – 193 с. – ISBN 978-5-8265-1737-6. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/85968.html> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
12. Консультант плюс – Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27.07.2006 N 149-ФЗ: сайт. – URL. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (дата обращения: 05.07.2022).
13. Основные проблемы защиты информации в сетях: сайт. – 2022. – URL. <https://zen.yandex.com/media/id/5da8242ead43600b1f1f9ed/osnovnye-problemy-zascity-informacii-v-setiah-5da82678c31e4900ae31ec07> (дата обращения: 05.07.2022).
14. Правительство России – Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных»: сайт. – URL. <http://government.ru/docs/all/84743/> (дата обращения: 05.07.2022).
15. Ревнивых А.В. Информационная безопасность в организациях: учебное пособие. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 83 с. – ISBN 978-5-4497-1164-9. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/108227.html> (дата обращения: 08.05.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
16. Скабцов Н. Аудит безопасности информационных систем. СПб.: Питер, 2018. 72 с.
17. ФСТЭК России – Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. №21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных, при их обработке в информационных системах персональных данных»: сайт. – URL. <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691-prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21> (дата обращения: 05.07.2022).
18. ФСТЭК России – Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ»: сайт. – URL. <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/107-zakony/365-federalnyj-zakon-ot-27-iyulya-2006-g-n-152-fz?highlight=WyIxNTItXHUwNDQ0XHUwNDM3Il0=> (дата обращения: 05.07.2022).
19. Шаньгин, В. Ф. Информационная безопасность и защита информации / В. Ф. Шаньгин. – 2-е изд. – Саратов: Профобразование, 2019. – 702 с. – ISBN 978-5-4488-0070-2. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/87995.html> (дата обращения: 05.07.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
20. Шаньгин В. Ф. Комплексная защита информации в корпоративных системах: учебное пособие. Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. – 592 с.

References:

1. Geekkies: сайт. – 2022. – URL. <https://geekkies.in.ua/crossplatform/chto-takoe-virtualbox-i-kak-ej-polzovatsja.html> (дата обращения: 05.07.2022).
2. RU-center: сайт. – 2022. – URL. <https://www.nic.ru/help/bazy-dannyh-1228/> (дата обращения: 05.07.2022).
3. Академик – информационная безопасность: сайт. – URL. https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_economic_law/5569/ (дата обращения: 05.07.2022). (In Russ)
4. Академик – официальная терминология: сайт. – 2022. – URL. <https://official.academic.ru/7175> (дата обращения: 05.07.2022). (In Russ)
5. Академик – словарь чрезвычайных ситуаций: сайт. – 2022. – URL. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/emergency/777/> (дата обращения: 05.07.2022). (In Russ)
6. Astaykin, A. I. Methods and means of providing software and hardware protection of information: scientific and technical edition / A. I. Astaykin, A. P. Martynov, D. B. Nikolaev, V. N. Fomchenko. – Sarov: Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF, 2015; 224. Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/60959.html> (accessed: 05.07.2022). – Access mode: for authorization. users. (In Russ)
7. Bashly P. N. Information security and information protection: textbook / P. N. Bashly, A. V. Babash, E. K. Baranova. – Moscow: RIOR, 2013; 222. Text: electronic. URL: <https://znanium.com/catalog/product/405000> (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
8. Wikipedia – Kali Linux: website. – URL. https://ru.wikipedia.org/wiki/Kali_Linux (accessed: 05.07.2022).
9. Gatchin Yu. A. Fundamentals of information security: a textbook / Yu. A. Gatchin, E. V. Klimova. – St. Petersburg: ITMO University, 2009; 84. Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/67463.html> (accessed: 05.07.2022). – Access mode: for authorization. users. (In Russ)
10. Golembiovskaya O. M. Stages of formation of the threat model and the information security violator model taking into account changes in the legislation of the Russian Federation: textbook / O. M. Golembiovskaya, M. Yu. Rytov, K. E. Shinakov [et al.]. Saratov: University Education, 202; 265. Text: electronic // IPR SMART Digital Educational Resource: [website]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/109162.html> (accessed: 05.07.2022). Access mode: for authorization. users. (In Russ)
11. Gromov Yu. Yu. Software and hardware protection of information systems: a textbook / Yu. Yu. Gromov, O. G. Ivanova, K. V. Starodubov, A. A. Kadykov. – Tambov: Tambov State Technical University, EBS DIA, 2017. – 193 p. – ISBN 978-5-8265-1737-6. – Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/85968.html> (accessed: 05.07.2022). – Access mode: for authorization. users. (In Russ)
12. Consultant Plus – Federal Law "On Information, Information Technologies and Information Protection" dated 27.07.2006 N 149-FZ: website. URL. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
13. The main problems of information protection in networks: site. 2022. URL. <https://zen.yandex.com/media/id/5da8242ead43600b1f1f9ed/osnovnye-problemy-zascity-informacii-v-setiah-5da82678c31e4900ae31ec07> (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
14. The Government of Russia – Decree of the Government of the Russian Federation dated 01.11.2012 No. 1119 "On approval of requirements for the protection of personal data during their processing in personal data information systems": website. – URL. <http://government.ru/docs/all/84743/> (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
15. Jealous A.V. Information security in organizations: a textbook. Moscow: AI Pi Ar Media, 2021; 83 Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/108227.html> (accessed: 08.05.2022). – Access mode: for authorization. users. (In Russ)
16. I will take it myself – The choice and justification of the methodology for calculating economic efficiency: website. – URL. <http://zdamsam.ru> (accessed: 05.07.2022).
17. Skabtsov N. Information systems security audit. St. Petersburg: St. Petersburg, 2018. 272 p.: (Series "Programmer's Library"). (In Russ)
18. FSTEC of Russia – Order of the FSTEC of Russia dated February 18, 2013 No. 21 "On approval of the composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data when they are processed in personal data information systems": website. URL. <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691-prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21> (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
19. FSTEC of Russia – Federal Law "On Personal Data" dated 27.07.2006 N 152-FZ": website. URL. <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/107-zakony/365-federalnyj-zakon-ot-27-iyulya-2006-g-n-152-fz?highlight=WyIxNTItXHUwNDQ0XHUwNDM3Il0=> (accessed: 05.07.2022). (In Russ)
20. Shangin V. F. Information security and information protection / V. F. Shangin. – 2nd ed. – Saratov: Vocational Education, 2019; 702. Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/87995.html> (accessed: 05.07.2022). Access mode: for authorization. users. Shangin, V. F. Complex information protection in corporate systems: a textbook. Moscow: FORUM: INFRA-M, 2020; 592. (In Russ)

Сведения об авторе:

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

Information about author:

Andrey R. Gazizov, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Computing Systems and Information Security; gazandre@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 21.07.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 30.08.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-61-67

Обзорная статья /Review article

Системы сетевой безопасности

М.А. Ганжур, А.И. Брюховецкий

Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Системы сетевой безопасности являются одним из ключевых игроков в современной деловой жизни. Некоторые сети являются частными, а другие открыты для общего доступа. Независимо от того, является ли ваша сеть частной или общедоступной, она должна иметь надежную защиту и быть надежно защищенной. В этой статье мы обсудим, с чего начинается безопасность сети, опишем общие меры, предпринимаемые для ее безопасности. **Метод.** Исследование определяется необходимостью решения задачи алгоритмического и математического обеспечения оценки функциональной безопасности сети на основе моделирования систем и нахождения ошибочных позиций. **Результат.** Предложено развертывание частной сетевой системы, которая предназначена и обслуживает определенную группу людей для общения, совместной работы и совместного использования. **Вывод.** Предложенные методы могут быть эффективными для защиты сети от атак и других угроз безопасности. Хорошо продуманные корпоративные политики имеют решающее значение для определения и контроля доступа к различным частям сети.

Ключевые слова: сетевая безопасность, информационная безопасность, атаки, риски, угрозы безопасности, вирусы

Для цитирования: М.А. Ганжур, А.И. Брюховецкий. Системы сетевой безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):61-67. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-61-67

Network security systems

M.A. Ganzhur, A.I. Bryukhovetsky

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. Network security systems are one of the key players in today's business life. Some networks are private while others are open to the public. Whether your network is private or public, it must be well secured and secure. In this article, we will discuss where network security begins, and describe the general measures taken to secure it. **Method.** The study is determined by the need to solve the problem of algorithmic and mathematical support for assessing the functional security of a network based on system modeling and finding erroneous positions. **Result.** Proposed deployment of a private network system that is designed and serves a specific group of people for communication, collaboration and sharing. **Conclusion.** The proposed methods can be effective in protecting the network from attacks and other security threats. Well-designed corporate policies are critical to defining and controlling access to various parts of the network.

Keywords: network security, information security, attacks, risks, security threats, viruses

For citation: M.A. Ganzhur, A.I. Bryukhovetsky. Network security systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 61-67. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-61-67

Введение. Безопасность сети — это процесс, который включает в себя все действия, положения и политики, которые организации и системные администраторы предпринимают для защиты целостности и непрерывности операций, коммуникаций, данных и их ценности в своей сети. Чтобы иметь эффективную сетевую безопасность, у должна быть разработана стратегия безопасности.

Постановка задачи. Планирование и разработка такой стратегии является подготовительной частью, которая гарантирует стабильную и целенаправленную безопасность вашей сети; предполагает мониторинг системы, выявление угроз и пути их решения. Хотя обеспечение безопасности сети является сложной задачей, но она может быть обеспечена в этой довольно простой логике. Выявление угроз является одним из ключевых моментов в планировании.

Угрозы для сетей могут иметь различную сущность.

Вирусы и инфекции. Вирусы встречаются в программах, разработанных программистами-мошенниками, и предназначены для самовоспроизведения и заражения систем при запуске определенным событием или службой.

Троянский конь. Программное обеспечение, содержащее трояны, является вредоносным ПО. Трояны кажутся безобидными и даже полезными, но вместо этого они облегчают несанкционированный доступ к системе и изменяют конфигурацию системы или заражают ее. Примерами таких приложений могут быть игры, конвертеры, панели инструментов браузера, гаджеты для рабочего стола, виджеты и т. д. Судя по названию, они всегда кажутся желательными и полезными, поэтому пользователей обманом заставляют скачивать и устанавливать их.

Приложения или апплеты – вандалы. Вандалы – это программные приложения или апплеты, которые наносят ущерб сетям и системам. В отличие от троянских программ, вандалы исключительно стремятся сломать или разрушить систему на «кусочки», не получая доступа к каким-либо данным и не манипулируя ими.

Атаки. Сетевые системы атакуют с разными целями:

- Разведывательные атаки направлены на сбор информации и данных для компрометации сетей;
- Атаки доступа используют уязвимости сети для получения доступа к электронной почте, базам данных и манипулирования данными;
- Атаки типа «отказ в обслуживании», также известные как DoS-атаки, которые блокируют доступ части или всей компьютерной системе. Такие атаки практически невозможно отследить и остановить.

Перехват данных. Перехват данных – это прослушивание сетевых коммуникаций. Перехват также может использоваться не только для перехвата данных, передаваемых по сети, но и для изменения этих пакетов данных.

Неавторизованный доступ и вторжение. Аутентификация пользователя является основным действием для сетевой безопасности. Аутентификация осуществляется в основном с использованием имени пользователя и пароля, которые уникальны для каждого пользователя. Существуют также некоторые другие типы аутентификации, такие как аутентификация с помощью мобильного телефона пользователя, карты банкомата, отпечатков пальцев и т. д. Любой несанкционированный доступ к сети может рассматриваться как вторжение в систему.

Социальная инженерия. Это еще одна форма получения конфиденциальной информации, связанной с сетевой безопасностью, например, выдача себя за сотрудника службы технической поддержки и запрос паролей людей. Спуфинг электронной почты — одно из популярных средств социальной инженерии. Это попытка обманом заставить пользователя сделать оскорбительное заявление или раскрыть конфиденциальную информацию, такую как пароль.

Этот список угроз можно бесконечно расширять и разочаровывать. Если кто-то когда-либо сталкивался с любой из этих угроз (а у вас может быть хотя бы один случай, когда вы все еще являетесь простым пользователем ПК), то ущерб и потери, причиненные вашей небезопасной сети, могут быть действительно ощутимыми и безвозвратными.

Управление рисками. Управление рисками является одним из основных элементов планирования сетевой безопасности. Очень важно понимать риски и уметь с ними справляться. Конечно, риски и их определения различаются для разных организаций и сфер бизнеса. Это зависит от приоритетов безопасности и политики, принятой компанией. Управление рисками для сетевой безопасности – это периодическая деятельность, которая включает в себя анализ сети и мониторинг уязвимостей и угроз.

Брандмауэр. Когда мы говорим о сетевой безопасности, мы сразу же связываем ее с понятием брандмауэра. Брандмауэр похож на «супервизор», обеспечивающего соблюдение политики контроля доступа между двумя подключенными сетями. Как только пользователь аутентифицирован, брандмауэр применяет политики доступа, чтобы установить, какие службы разрешены для использования пользователями. Такие инструменты, как брандмауэры и системы обнаружения вторжений, обеспечивают защиту всех областей сети и обеспечивают безопасное соединение. Сетевые брандмауэры бывают двух типов: программные и аппаратные. Как правило, отдельные ПК-станции используют программное обеспечение брандмауэра, в то время как сети используют выделенные устройства брандмауэра. Устройства брандмауэра предназначены для защиты множества компьютеров, подключенных через сеть. Таким образом, выбор и развертывание оптимального межсетевого экрана для вашей сети имеет большое значение. Однако ни один брандмауэр не может обнаружить или остановить все атаки, поэтому недостаточно установить брандмауэр, а затем игнорировать все другие меры безопасности.

Резервные копии. Даже при эффективной защите ваша система не застрахована от технических и электронных сбоев, часто вызванных аппаратным сбоем. Чтобы предотвратить любые потери или критические повреждения вашей сети, вы должны планировать и осуществлять периодическое резервное копирование данных и журналов передачи. Это поможет легко восстановить ваши данные в случае подобных системных сбоев. Это более чем очевидно лучше жить с резервными копиями, чем терпеть убытки.

Программное обеспечение. Предположим, вы уже определили свои угрозы, настроили политику управления рисками и развернули эффективный брандмауэр для своей сети. Что следующее? Теперь вам нужна система программного обеспечения, которая позволит управлять и централизованно контролировать все текущие меры и действия в вашей сетевой системе. В настоящее время ИТ-рынок богат различным программным обеспечением для сетевых решений, и выбор среди них затруднен.

Для получения оптимального программного решения для вашей сетевой безопасности вы можете сначала рассмотреть такие факторы, как целевое решение, способность обрабатывать объемные данные, возможность создавать различные отчеты о состоянии системы и безопасности, настраиваемость и, конечно же, простота в использовании.

Сегодня многие компании специализируются на обзоре и рейтинге программного обеспечения и приложений, доступных на рынке. Рейтинг определяется такими факторами, как функции, удобство для пользователя, производительность, поддержка, соотношение цены и качества и т. д. Поэтому, если вы заинтересованы в развертывании эффективного программного обеспечения и инструментов для сетевой безопасности, вам следует более внимательно изучить некоторые популярные рейтинги авторитетных рецензентов.

Методы исследования. Пусть данная задача описывается следующими показателями, обладающими двумя управляющими входными, тремя исполнительскими выходами и определенной структурой, отображающей движение и логическое преобразование командной информации. Векторная диаграмма исследуемой структуры приведена на рис. 1.

Входы x_1, x_2 – и управляющие. Выходы y_1, y_2, y_3 – исполнительские. Узел 5 дизъюнктивного типа «УДТ», а узел 6 – конъюнктивного типа (УКТ). Остальные операторы графа одновходовые, а поэтому выполняют лишь функции преобразования входной информации в её выходную форму.

Предположим, что в структуре может отсутствовать нарушитель (назовем это нулевым состоянием или присутствует, но не более чем один (таких состояний будет 8)).

Синдромы состояний системы можно отобразить наличием (обозначим это 1) или отсутствием (обозначим это 0) командной информации на исполнительских выходах при различных комбинациях управляющих команд на входах (1 – наличие команды, 0 – отсутствие таковой).

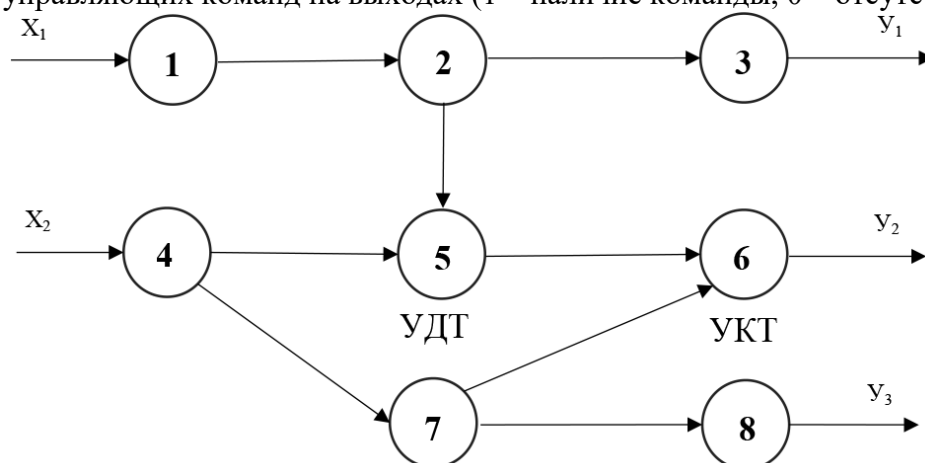


Рис. 1. Векторная диаграмма исследуемой структуры

Fig. 1. Vector diagram of the structure under study

Таблица синдромов приобретает вид (табл.1).

Таблица 1. Таблица синдромов выходов y_1, y_2, y_3

Table 1. Table of output syndromes y_1, y_2, y_3

Состояния входов Input states x_1, x_2	Нарушитель (номер в структуре) Intruder (number in the structure)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
00	000	100	100	100	000	000	010	001	001
01	011	111	111	111	000	001	001	000	010
10	100	000	000	000	111	100	110	101	101
11	111	011	011	011	100	101	101	100	110

По таблицам синдромов могут быть построены тестовые последовательности для определения места нарушителя (рис.2). Длина тестовой последовательности может быть разной, а в некоторых случаях она может состоять даже из одного шага. Так нарушитель с номером 6 обнаруживается сразу же при отсутствии входных воздействий и появлении на выходе y_3 несанкционированного сигнала.

Считается, что возможна минимизация тестовых проверок, в которых по определенным правилам изменяются состояния входов, а анализируются состояния выходов. Описанная модель является детерминированной, но возможен и вероятностный подход.

Обсуждение результатов. По результатам анализа синдромов можно предположить возможность решения нескольких задач: первая связана с минимизацией количества тестовых проверок для выявления места нарушения то есть в процессе тестирования имеется возможность подавать на выходы любые возможные комбинации и в любой последовательности для рассматриваемого примера комбинация входов «01» выявляет четыре возможных места нарушения за один шаг с другой комбинацией «00» за один шаг выявляется результат «0» (нарушений нет) и в восьмом разряде.

Другая задача может состоять в том, чтобы за единственную тестовую комбинацию входов получить информацию о наличии или нарушения в одном из максимального множества узлов такой комбинацией относится «10», с помощью которой получается информация о возможных нарушениях в пяти узлах.

Еще одной задачей испытаний может быть такая, которая выявляет нарушения без специальных входных воздействий на систему в рассмотренном примере такая задача позволяет проверить лишь шестой узел «00». Если стоит задача минимальных изменений входных воздействий для контроля конкретного узла, то такая задача решается, и ее итог будет зависеть от того, какой контрольный узел подлежит проверке.

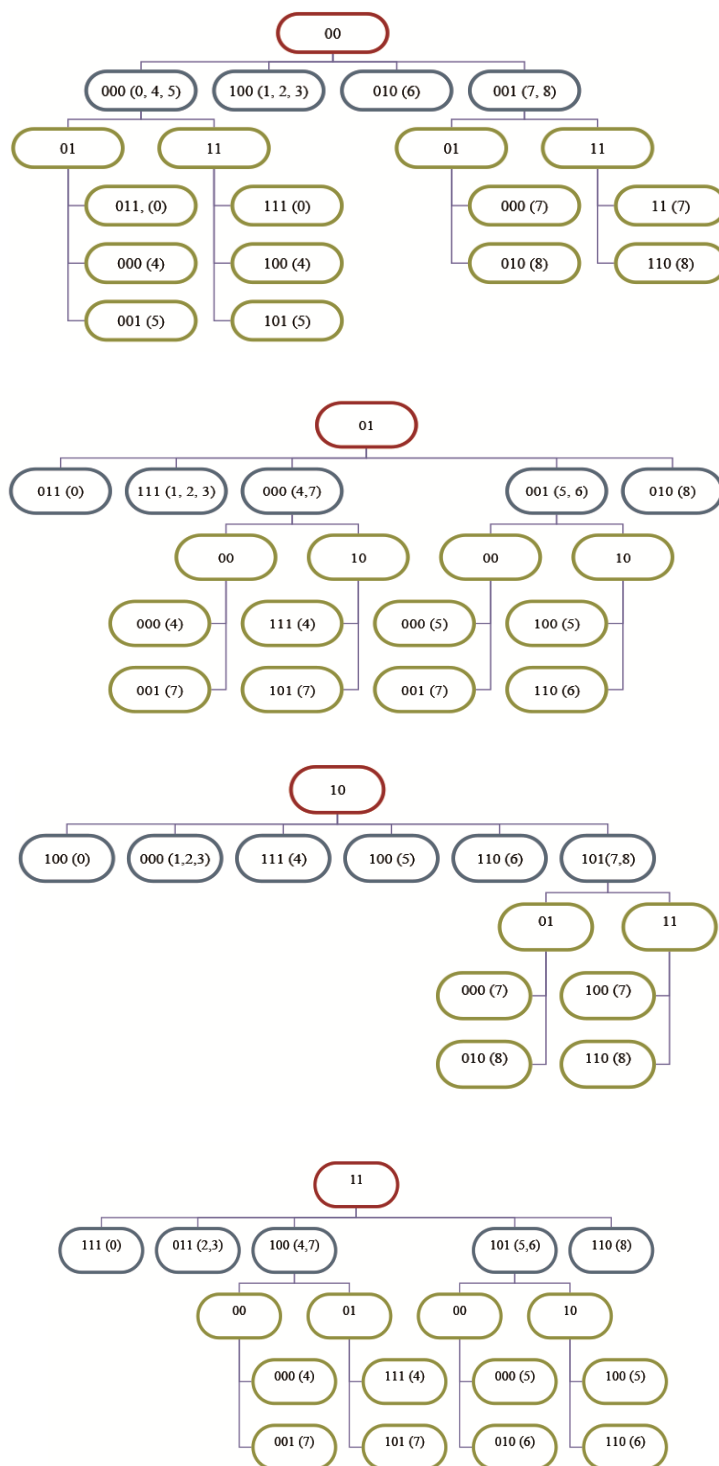


Рис. 2. Деревья-тестогаммы
 Fig. 2. Testogram trees

В рассмотренном примере для проверки узлов шесть и восемь достаточно изменения тестовых значений лишь на одном входе из двух, а для проверки четвертого и седьмого так же достаточно изменения тестовой информации на одном, но уже другом входе. Если необходимо убедиться в том, что решение задачи достоверно для какого-либо узла, проверки можно проводить так, чтобы исключить знак или в конечном результате в одном или нескольких испытаний.

В рассмотренном примере комбинация «01» с последующей входной комбинацией «00» выделяет в качестве возможного места нарушений четвертого и седьмого узла, а также соответствует состоянию без нарушений. Проводя тестовые комбинации «00» и «11» из множества ноль, четыре и семь выделяется семь, если на входе будет «000», для выделения нулевого или четвертого можно воспользоваться тестовой комбинацией «11» при получении на входе «011», что состояние соответствует исправному нулевому, «100» - нарушение в четвертом узле. Такая задача не является однозначной. Возможны и другие комбинаторные задачи, позволяющие повышать разрешающую способность теста или достоверность окончательного решения.

Вывод. В случае, когда моделируются нарушения, которые носят случайный характер, задача приобретает вероятностный смысл и ее решения возможны лишь с применением соответствующих стохастических подходов. Ни один из этих подходов сам по себе не будет достаточным для защиты сети, но, когда моделируются методы борьбы и идет их объединение, они могут быть очень эффективными для защиты сети от атак и других угроз безопасности. Кроме того, хорошо продуманные корпоративные политики имеют решающее значение для определения и контроля доступа к различным частям сети.

Библиографический список:

1. The Emergence of Virtual Reality and Augmented Reality in the Security Operations Center / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://securityintelligence.com/the-emergence-of-virtual-reality-and-augmented-reality-in-the-security-operations-center/>
2. What is a Security Operations Center (SOC) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mcafee.com/enterprise/en-us/security-awareness/operations/what-is-soc.html>.
3. Новикова Е.С., Модели графического представления информации о защищенности компьютерной сети // Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. 2013. С. 126-131.
4. Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность и защита информации. ДМК-Пресс. 2017. С. 254-296) IBM QRadar SIEM / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ibm.com/fi-en/marketplace/ibm-qradar-siem>
5. The Future of Augmented Reality and Cybersecurity / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fedtechmagazine.com/article/2016/03/future-augmented-reality-and-cybersecurity>.
6. The Important Difference Between Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/07/19/the-important-difference-between-virtual-reality-augmented-reality-and-mixed-reality/#2155407935d3>.
7. Шаньгин В.Ф., Защита информации в компьютерных системах и сетях // ДМК-Пресс. 2017. С. 94-120
8. В.А. Фатхи, Н. В. Дьяченко Тестирования безопасности приложений // Инженерный вестник Дона, №5 (2021) URL:http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_38_9_Fathi_Dyachenko.pdf
9. Евсин В.А., Тихонов Н.А., Воробьев С.П. Разработка модуля оптимального размещения информационных ресурсов на узлах вычислительной сети: описание реализуемых методов и структур данных // Инженерный вестник Дона, 2019, №1. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5493
10. Берёза Н. В. Современные тенденции развития мирового и российского рынка информационных услуг // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/758
11. Зотов А.И., Ганжур М.А., Авакьянц А.В., Характеристика управленческой структуры и системы прохождения команд, Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 58-3. С. 111-116
12. Змитрович А.И. Интеллектуальные информационные системы. Мн.: НТООО «ТетраСистемс», 1997. С. 368
13. Фатхи В.А., Фатхи Дм.В., Фатхи Д.В. Функция достижимости и сетевая производная нечеткой сети Петри на основе μ -значной логики // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-19: сб. трудов XIX Междунар. науч. конф.: в 10-и т. Т.6/ под общ. ред. В.С. Балакирева. – Воронеж, Воронеж. гос. технол. акад., 2006. С. 33-37.
14. Ganzhur M.A., Ganzhur A.P., Smirnova O.V. Modeling of critical systems implementing negative events using dual Petri nets. MATEC Web of Conferences Volume 226 (2018), XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018). URL:doi.org/10.1051/mateconf/201822604001
15. Marković N., Živanić J., Lazarević Z., Irićanin B. The Mathematical Model for Analysis and Evaluation of the Transient Process of the three-phase Asynchronous Machine Performance. Serbian journal of electrical engineering (DTS-2018). URL: journal.fkn.kg.ac.rs/Vol_15-3/05-Markovic-Zivanic-Lazarevic-Iricanin.pdf
16. Гинис Л.А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806
17. Гасфилд Д. Строки, деревья и последовательности в алгоритмах: Информатика и вычислительная биология / Пер. с англ. И.В. Романовского. — СПб. Невский Диалект; БХВ-Петербург, 2003. — 654 с.

18. Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. - СПб. СПбГПУ, 2008. - 227с.
19. Андреев А.А. Методика выбора базовой архитектуры реконфигурируемой вычислительной системы на основе методов теоретикоигровой оптимизации//Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1569
20. Фатхи Дм. В. и др. Бинарные сети Петри с альтернативным маркированием [Текст] // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ22: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 5. Секция 5 / под общ. ред. В. С. Балакирева. – Псков: изд-во Псков. гос. политехн. ин-та, 2009. – ISBN 978-5-91116-098-9.

References:

1. The Emergence of Virtual Reality and Augmented Reality in the Security Operations Center / [Electronic resource]. Access Mode: <https://securityintelligence.com/the-emergence-of-virtual-reality-and-augmented-reality-in-the-security-operations-center/>
2. What is a Security Operations Center (SOC) / [Electronic resource]. Access Mode: <https://www.mcafee.com/enterprise/en-us/security-awareness/operations/what-is-soc.html>.
3. Novikova E.S., Models of graphical representation of information about the security of a computer network. *St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*. 2013; 126-131. (In Russ)
4. Shangin V.F., Information security and information protection // DMK-Press.2017. pp. 254-296) IBM QRadar SIEM / [Electronic resource]. Access Mode: <https://www.ibm.com/ru-en/marketplace/ibm-qradar-siem> (In Russ)
5. The Future of Augmented Reality and Cybersecurity / [Electronic resource]. Access mode: <https://fedtechmagazine.com/article/2016/03/future-augmented-reality-and-cybersecurity>.
6. The Important Difference Between Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality / [Electronic resource]. Access mode: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/07/19/the-important-difference-between-virtual-reality-augmented-reality-and-mixed-reality/#2155407935d3>.
7. Shangin V.F., Information security in computer systems and networks. *DMK-Press*. 2017; 94-120
8. V.A. Fathi, N. V. Dyachenko Application Security Testing. *Don Engineering Bulletin*, 2021; 5 URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_38__9_Fathi_Dyachenko.pdf_a11917c479.pdf (In Russ)
9. Evsin V.A., Tikhonov N.A., Vorobyov S.P. Development of a module for the optimal placement of information resources on the nodes of a computer network: a description of the implemented methods and data structures. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019; 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5493 (In Russ)
10. Bereza N. V. Modern trends in the development of the world and Russian market of information services. *Engineering Bulletin of the Don*, 2012; 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/758 (In Russ)
11. Zotov A.I., Ganzhur M.A., Avakyants A.V., Characteristics of the managerial structure and the command passing system, *Problems of modern pedagogical education*. 2018;58-3:111-116 (In Russ)
12. Zmitrovich A.I. Intelligent information systems. *Minsk: NTOOO "TetraSystems"*, 1997;368
13. Fathi V.A., Fathi Dm.V., Fathi D.V. Reachability function and network derivative of a fuzzy Petri net based on μ -valued logic. *Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-19: collection of works of the XIX Intern. scientific conf.: in 10 volumes. T.6 / under the general. ed. V.S. Balakirev. - Voronezh, Voronezh. state technol. Acad., 2006; 33-37. (In Russ)*
14. Ganzhur M.A., Ganzhur A.P., Smirnova O.V. Modeling of critical systems implementing negative events using dual Petrinets. *MATEC Web of Conferences Volume 226 (2018), XIV International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2018)*. URL:doi.org/10.1051/mateconf/201822604001
15. Marković N., Živanić J., Lazarević Z., Irićanin B. The Mathematical Model for Analysis and Evaluation of the Transient Process of the three-phase Asynchronous Machine Performance. *Serbian journal of electrical engineering (DTS-2018)*. URL: journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_15-3/05-Markovic-ZivanicLazarevicIricanin.pdf
16. Ginis L.A. Development of cognitive modeling tools for the study of complex systems // *Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1806 (In Russ)
17. Gasfield D. Lines, trees and sequences in algorithms: Informatics and computational biology / Per. from English. I.V. Romanovsky. *St. Petersburg. Nevsky Dialect; BHV-Petersburg*, 2003; 654. (In Russ)
18. Polikarpova N.I., Shalyto A.A. Automatic programming. *St. Petersburg. SPbGPU*, 2008;227. (In Russ)
19. Andreev A.A. Technique for choosing the basic architecture of a reconfigurable computing system based on game-theoretic optimization methods // *Engineering Bulletin of the Don*, 2013, No. 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1569 (In Russ)
20. Fathi Dm. V. et al. Binary Petri nets with alternative labeling [Text] *Mathematical methods in engineering and technology - MMTT22: coll. Proceedings of the XXII Intern. scientific conf.: in 10 volumes. Vol. 5. Section 5 / under the general. ed. V. S. Balakireva. Pskov: Pskov publishing house. state polytechnic in-ta*, 2009. (In Russ)

Сведения об авторах:

Ганжур Марина Александровна, старший преподаватель, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; mganzhur@yandex.ru ORCID 0000-0002-6254-4850

Брюховецкий Андрей Игоревич, магистрант, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; mganzhur@yandex.ru

Information about authors:

Marina A. Ganzhur, Senior Lecturer, Department of Computing Systems and Information Security; mganzhur@yandex.ru ORCID 0000-0002-6254-4850

Andrey I. Bryukhovetsky, Undergraduate, Department of Computing Systems and Information Security; mganzhur@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.07.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 23.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 23.08.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 62533.65

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-68-73

Оригинальная статья/ Original Paper

**Разработка математического аппарата по оптимизации АСУ
системы теплоснабжения на примере здания высшей школы**

С.В. Гужов, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия

Резюме. Цель. Целью настоящей работы является оптимизация функционирования АСУ системы теплоснабжения. Настройке подвергается связь расхода уходящих газов на входе в котел-утилизатор и температуры теплоносителя в дальней точке потребителя. **Метод.** Методической основой исследования являются: уравнение теплового баланса для котла-утилизатора парогазовой установки; принципы обеспечения заданных параметров теплоснабжения потребителя; уравнение тепломассообмена и санитарные нормы по теплоснабжению. **Результат.** Разработан математический аппарат, выражающий зависимость величины расхода уходящих газов на входе в котел утилизатор и температуры теплоносителя в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. **Вывод.** Оптимизация АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы показывает возможность повышения точности регулирования АСУ системой отопления. В случае дополнительной установки сужение коридора погрешностей происходит в 2,5 раза.

Ключевые слова: оптимизация АСУ, система теплоснабжения, автоматизированные системы управления, математический аппарат

Для цитирования: С.В. Гужов, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп. Разработка математического аппарата по оптимизации АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(3):68-73. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-68-73

Elaboration of a mathematical apparatus for optimizing the automated control system of a heat supply system on the example of a building of a higher school

S.V. Guzhov, E.V. Krylova, D.V. Torop

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this work is to optimize the functioning of the automated control system of the heat supply system. The connection between the flow rate of flue gases at the inlet to the waste heat boiler and the temperature of the heat carrier at the far point of the consumer is subject to adjustment. **Method.** The methodological basis of the study is: the heat balance equation for the waste heat boiler of the combined cycle plant; principles for ensuring the specified parameters of heat supply to the consumer; equation of heat and mass transfer and sanitary standards for heat supply. **Result.** A mathematical apparatus has been developed that expresses the dependence of the flue gas flow rate at the inlet to the waste heat boiler and the temperature of the coolant in the heating device in the farthest room of the analyzed building. **Conclusion.** Optimization of the automated control system of the heat supply system on the example of a building of a higher school shows the possibility of improving the accuracy of control of the automated control system by the heating system. In the case of an additional installation, the narrowing of the error corridor occurs by 2.5 times.

Keywords: ACS optimization, heat supply system, automated control systems, mathematical apparatus

For citation: S.V. Guzhov, E.V. Krylova, D.V. Torop. Elaboration of a mathematical apparatus for optimizing the automated control system of a heat supply system on the example of a building of a higher school. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 68-73. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-68-73

Введение. При отпуске теплоэнергии в системах центрального теплоснабжения, широко распространенных на территории России, обычно ориентируются на параметры теплоносителя на выходе с источника теплоты на основании графика отпуска тепловой энергии в [1]. Проблема состоит в том, что в наиболее удалённом помещении здания потребителя температура воздуха далеко не всегда соответствует принятым нормам, по причине несовершенств и высокого физического износа систем и приборов отопления, возникших в ходе эксплуатации, которые такая система не учитывает.

На данный момент не применяется практика регулирования вырабатываемой теплоты на источнике в зависимости от параметров непосредственно у потребителя. Такая система могла бы значительно сократить производственные сырьевые издержки и обеспечить комфортные условия потребителю без дополнительных систем автоматического регулирования тепла (САРТ), которые не входят в базовую систему теплоснабжения.

Постановка задачи. Целью исследования является оптимизация функционирования АСУ системы теплоснабжения потребителя на примере здания высшей школы. Настройке подвергается связь расхода уходящих газов на входе в котел-утилизатор и температуры теплоносителя в дальней точке потребителя.

В рамках поставленной цели были последовательно решены задачи

1. Анализ существующих схем.
2. Разработка математического аппарата для повышения точности регулирования расхода уходящих газов как функции от температуры теплоносителя в дальней точке потребителя.
3. Оценка применимости разработанного математического аппарата на примере здания высшей школы.

Методы исследования. При расчете использованы уравнения теплового баланса для котла-утилизатора парогазовой установки [2] и принципы обеспечения заданных параметров теплоснабжения потребителя [3], в основе которых лежат уравнения тепломассообмена и санитарные нормы по теплоснабжению жилых и общественных зданий [4].

В описываемую систему входит: ПГУ (парогазовая установка), ЦТП (центральный тепловой пункт), ИТП (индивидуальный тепловой пункт), потребитель и система теплопередающих трубопроводов (рис. 1).

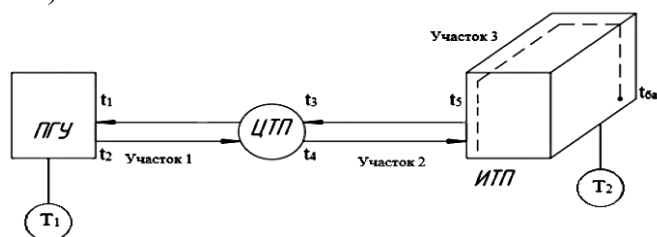


Рис. 1. Принципиальная схема системы теплоснабжения здания

Fig. 1. Schematic diagram of the heating system of the building

t_1 - температура прямой сетевой воды, отпускаемой в сеть теплоснабжения, t_2 - температура обратной сетевой воды на возврате из сети теплоснабжения, t_3 - температура теплоносителя после ЦТП, t_4 - температура теплоносителя возвращаемого в ЦТП после потребителя, t_5 - температура подаваемого теплоносителя после ИТП, $t_{\text{бат}}$ - температура теплоносителя в дальней точке потребителя, T_1 - датчик температуры №1, установленный на выходе из ПГУ, T_2 - датчик температуры №2, установленный по месту потребления теплоэнергии

t_1 - температура воды прямой сети, supplied to the heat supply network, t_2 - температура воды обратной сети, t_3 - температура теплоносителя после ЦТП, t_4 - температура теплоносителя, возвращенного к ЦТП, t_5 - температура теплоносителя после ИТП, $t_{\text{БВТ}}$ - температура теплоносителя в точке отбора, T_1 - датчик температуры No. 1, установленный на выходе из ЦТП, T_2 - датчик температуры No. 2, установленный в месте потребления.

От станции до ЦТП и от ЦТП до ИТП (находящимся непосредственно в здании) трубопровод пролегает в полупроходном подземном канале с параметрами ШхВ=1,3х1,4 м, первая часть канала от ПГУ до ЦТП длиной $L_1=1000$ м и вторая часть канала от ЦТП до ИТП длиной $L_2=350$ м. После ИТП, трубопровод пролегает в условиях комнатной температуры ($t_{\text{вп}}=22^\circ\text{C}$) на протяжении $L_3=250$ м. Трубопровод до ИТП утеплен стекловатой, принят коэффициент, учитывающий изолированные участки трубопровода $\beta=0,2$.

Параметры утеплителя: $\lambda=0,26$ Вт/м, толщина $\delta=70$ мм, внутренний диаметр $d=400$ мм. После ИТП труба ($\beta=0,2$) изолирована пенополиуретаном с характеристиками: $\lambda=0,24$ Вт/м, $\delta=5,4$ мм, $d=21,2$ мм. Скорость теплоносителя на входе в систему составляет 0,4 м/с, температура. Температура обратной сетевой воды на выходе из системы теплоснабжения $t_1=75^\circ\text{C}$. Расход теплоносителя $G = 47,725 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Принимаем допущения:

1. Так как температура теплоносителя незначительно зависит от температуры грунта, в котором пролегает канал с системой теплопередающих трубопроводов, можно принять допущение, что в системе температура и теплопроводность грунта, сухого изглинка, приняты постоянными и равными $t_{\text{гр}}=2^\circ\text{C}$ и $\lambda_{\text{гр}}=2,2$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

2. Для упрощения математической модели объекта принимаем допущение, что теплопотери в трубопроводе не зависят от температуры окружающей среды и постоянны во времени.

3. Так как у нас не стоит специфической задачи о влиянии состояния системы теплоснабжения и здания на эффективность теплоснабжения принимаем, что система теплоснабжения и система отопления здания находятся в удовлетворительном состоянии. Гидравлическое сопротивление трубопровода, геометрия и технические погрешности, возникающие в результате эксплуатации (течи, коррозию или осадок на стенках) не учитываются. Поток в трубе равномерен и постоянен. Расход и скорость теплоносителя принимаются постоянными на всем протяжении системы отопления. Здание имеет удовлетворительное состояние, теплоизоляция здания не имеет погрешностей.

4. Допускаем, что для обеспечения удовлетворительного состояния системы теплоснабжения и отопления промывка систем отопления здания проводится регулярно в соответствии с ПТЭ [5]. Приборы отопления находятся в удовлетворительном состоянии, функционируют нормально и целостно.

5. Соответственно, при допущении, принятом ранее, можно сказать, что тогда температура воздуха в помещениях прямо коррелирует с температурой теплоносителя в приборах отопления в этой комнате, а температуру внутри здания принимаем неизменной.

6. В наиболее удалённом помещении здания потребителя температура воздуха соответствует требованиям СанПИН [11-15].

На практике, данный пункт выполняется крайне редко по причине несовершенств систем и приборов отопления, возникших в ходе эксплуатации.

В качестве измерительного прибора взят термоэлектрический преобразователь типа НСХ: 100Pt ДТС024-РТ100.В3.30/0,2 [7] с пределом допускаемой погрешности $\pm(0.30+0.005 \cdot t)^\circ\text{C}$.

Для решения данной задачи принимается тип источника теплоты – ПГУ. Заданные параметры ПГУ: $G_{\text{кт}}=81,3$ кг/с, $\varphi=0,994$, $h_4=176,790$ кДж/кг, $h_{\text{кт}}=133,156$ кДж/кг.

Параметры газов на входе в котёл-утилизатор: $\beta_{\text{г}} = 1,177$, $\vartheta_{\text{кт}} = 546,33$, $\mu_{\text{г}} = 28,356$.

Величина $h_{\text{кт}}$ определяется по формуле: $h_{\text{кт}} = \frac{\mu \cdot h_{\text{кт}}}{\mu_{\text{г}}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (1)

Величина $Q_{\text{ГВТО}}$ определяется по формуле:

$$Q_{\text{ГВТО}} = G_{\text{КТ}} \cdot (h_4 - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi = G_{\text{СВ}} \cdot (h_{\text{ПС}} - h_{\text{ОС}}) \quad (2)$$

Энтальпии прямой и обратной сетевой воды:

$$h_{\text{ПС}} = t_1 \cdot c_p \quad (3)$$

$$h_{\text{ОС}} = t_2 \cdot c_p. \quad (4)$$

На основании (1)-(4) определяем расход дымовых газов как функцию от переменных величин прямой и обратной температур сетевой воды:

$$G_{\text{КТ}} = \frac{(t_1 - t_2) \cdot G_{\text{СВ}} \cdot c_p}{(h_{\text{КТ}} - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi} \quad (5)$$

Определим теплосоппротивление для 1 участка теплопровода:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{D}{d} = 0,184 \text{ м} \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (6)$$

По эмпирической формуле Шубина [2 с.81] рассчитаем сопротивление грунта $R_{\text{КГР}}$ и далее найдем температуру воздуха в первой части канала (от ПГУ до ЦТП):

$$R_{\text{КГР}} = \frac{\ln \left[3,5 \cdot \frac{h}{a} \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^{0,25} \right]}{5,7 \cdot 0,5 \cdot \frac{a}{b} \cdot \lambda_{\text{ГР}}} = 0,116 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (7)$$

$$t_{\text{К1}} = \frac{\frac{t_1}{R_{\text{из}}} + \frac{t_2}{R_{\text{из}}} + \frac{t_{\text{ГР}}}{R_{\text{КГР}}}}{\frac{1}{R_{\text{из}}} + \frac{1}{R_{\text{из}}} + \frac{1}{R_{\text{КГР}}}} = 46,926^\circ\text{C} \quad (8)$$

Определим расход и температуры теплоносителя в конце участка:

$$t_3 = t_{\text{К1}} + (t_1 - t_{\text{К1}}) \cdot e^{\frac{-(1+\beta) \cdot L_1}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G}} = 88,62^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$t_4 = \frac{t_2 - t_{\text{К1}}}{\frac{-(1+\beta) \cdot L_1}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G_1}} + t_{\text{К1}} = 75,93^\circ\text{C} \quad (10)$$

Второй участок (от ЦТП до ИТП):

Расчет для этого участка проводится аналогичным образом: $t_3 = 88,62^\circ\text{C}$, $t_4 = 75,93^\circ\text{C}$.

Тогда, рассчитаем температуру воздуха во втором участке канала: $t_{\text{К2}} = 46,8^\circ\text{C}$

Рассчитаем температуры теплоносителя в конце участка: $t_5 = 88,15^\circ\text{C}$,

Третий участок (от ИТП до трубы):

Так как принцип проложения системы изменился, рассчитаем термосопротивление изоляции трубопровода для данного участка:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d} = 0,273 \text{ м} \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт} \quad (11)$$

Рассчитаем температуру в батарее в самом дальнем помещении здания (в конце участка трубопровода):

$$t_{\text{бат}} = t_{\text{вр}} + (t^5 - t_{\text{вр}}) \cdot e^{\frac{-(1+\beta) \cdot L_3}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G}} = 87,7^\circ \quad (12)$$

Параметры теплоносителя соответствуют требованиям СНиП 41-01-2003 [3, раздел 6, пункт 6.1.2].

Обсуждение результатов. На основании (5-12) запишем математическую модель, учитывающую зависимость расхода газов от температуры в помещении потребителя с учетом погрешностей средств измерений:

$$G_{\text{КТ}} = \frac{(t_{\text{бат}} \cdot k) \cdot G_{\text{СВ}} \cdot c_p}{(h_{\text{КТ}} - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi}, \quad (13)$$

где: k - коэффициент потерь температуры на протяжении системы отопления, от источника до потребителя=0,2

На основании полученных результатов строим график (рис.2) зависимости расхода уходящих газов $G_{\text{КТ}}$ от температуры теплоносителя в батарее $t_{\text{бат}}$ в конце теплопровода с учётом погрешности измерительного прибора №1 и измерительного прибора №2.

Вывод. Исходя из полученных результатов можно сформулировать вывод, что коридор погрешностей, полученный с прибора №2, установленного непосредственно у потребителя,

находится ближе к теоретической величине расхода дымовых газов, чем коридор погрешностей, полученный с прибора №1, установленный около источника теплоэнергии. Чем ближе к наиболее удалённой от теплоисточника точке потребления находится прибор, тем точнее можно регулировать расход дымовых газов. Это повлечет за собой экономию топлива и получение большей выгоды.

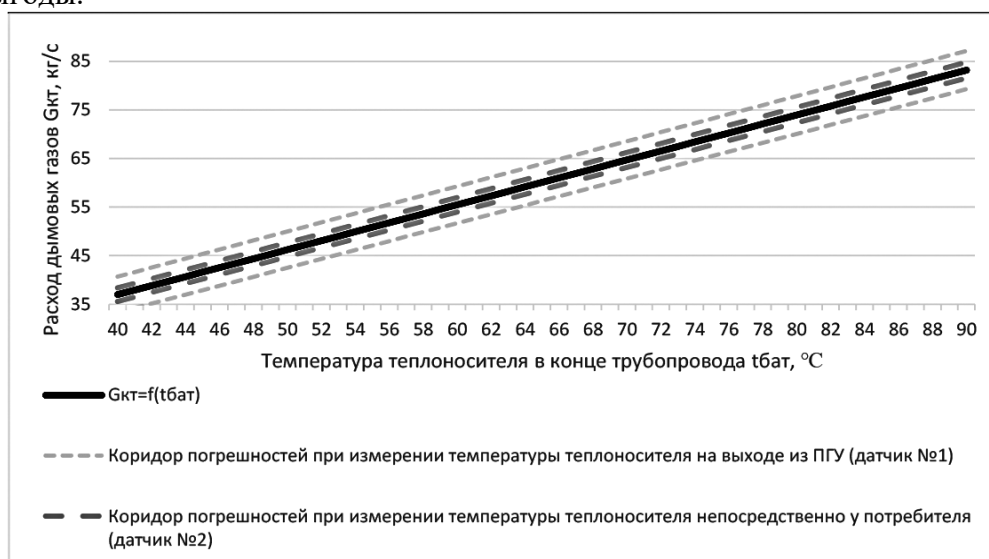


Рис. 2. Зависимость расхода уходящих газов от температуры теплоносителя в конце теплопровода
Fig. 2. Dependence of flue gas flow rate on the coolant temperature at the end of the heat pipeline

Наиболее целесообразная с точки зрения точности регулирования место расположения измерительного прибора – самая удаленная от источника теплоты точка потребителя – в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. Однако подобное местоположение датчика не всегда представляется возможным. Для регулирования расхода дымовых газов необходимо стремиться максимально приблизить датчик к конечной точке потребления, например, использовать данные датчика температуры на входе в ИТП.

Проанализировано влияние расположения измерительных приборов в тепловой схеме на точность регулирования. Разработан математический аппарат, выражающий зависимость величины расхода уходящих газов на входе в котел утилизатор и температуры теплоносителя в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. Таким образом, оптимизация АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы показывает возможность повышения точности регулирования АСУ системой отопления, в случае дополнительной установки сужение коридора погрешностей происходит в 2.5 раза.

Библиографический список:

1. Комерческий сайт компании ООО «МОЭК», температурный график магистральных тепловых сетей ПАО «МОЭК» на отопительный сезон 2020/2021 гг, дата обращения: 10 июня 2022 года https://online.moek.ru/_downloads/temp-grafiks/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD
2. Методика расчета тепловых схем газотурбинных и парогазовых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, М.А.Соколова, В.Е. Торжков. –М.: Издательство МЭИ, 2004. –48 с.
3. Поливода, Ф.А. Надежность систем теплоснабжения городов и предприятий легкой промышленности [Текст]/Ф.А.Поливода – М.: ИНФРА-М, 2017. – 170 с.
4. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – Взамен СНиП 2.04.05-91; Введ. с 01.01.2004 – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России), 2004. – 54 с.
5. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок (утв. приказом Минэнерго РФ от 24 марта 2003 г. N 115) [Текст]. Введ. с 01.10.2003 – М.: Министерство энергетики Российской Федерации, 2003. – 202 с.
6. СО 34.35.101-2003. Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях; Введ. с 01.09.2004 – М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 98 с.
7. СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.1.2.1002-00. Введ. с 15.08.2010 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.— 27 с.

8. Методы расчета основных энергетических показателей паротурбинных, газотурбинных и парогазовых теплофикационных установок / Е. Я. Соколов, В. А. Мартынов ; Ред. В. М. Качалов ; Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . – М. : Изд-во МЭИ, 1997 – 102 с
9. Управление и инноватика в теплоэнергетике : учебное пособие для вузов по направлению "Теплоэнергетика" / А. В. Андришин, В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2011 . – 392 с.
10. Теория автоматического управления : учебник для вузов по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств (энергетика)" / В. Я. Ротач . – 3-е изд., стер . – М. : Изд-во МЭИ, 2005 . – 400 с.
11. Коммерческий сайт компании ООО «ПО Овен», каталог продукции, описание датчика термосопротивления типа ДТСхх4 и его модификаций (включая ДТС024-РТ100.В3.30/0,2), дата обращения: 15 июня 2022 года https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom/klasse_dopuska_izmereniya
12. E. Dotzauer, "Simple model for prediction of loads in district-heating systems", *Applied Energy*, 2002; 73: 277-284,
13. G. Yingjun and H. Yajin, "Heat load forecasting and optimization of thermal network adjustment method study", *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015; 4907-4910.
14. E. Kral, A. Kostalova, P. Capek, L. Vasek, "Algorithm for Central Heating Heat Load Modelling", *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (2018 CSCI)*. 2018; 62.
15. D. Rusovs, L. Jakovleva, V. Zentins, K. Baltputnis, "Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021; 58(3):121.

References:

1. Commercial website of MOEK LLC, temperature chart of main heat networks of PJSC MOEK for the heating season 2020/2021, date of access: June 10, 2022 https://online.moek.ru/_downloads/temp-grafiks/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD
2. Methods for calculating thermal circuits of gas turbine and combined cycle power plants / S.V. Tsanev, V.D. Burov, M.A. Sokolova, V.E. Torzhkov. -M.: MPEI Publishing House, 2004; 48. (In Russ)
3. Polivoda, F.A. Reliability of heat supply systems for cities and light industry enterprises [Text] / F.A. Polivoda. M.: *INFRA-M*, 2017; 170. (In Russ)
4. SNiP 41-01-2003. Heating, ventilation and air conditioning [Text]. - Instead of SNiP 2.04.05-91; Introduction from 01.01.2004 - M.: State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Complex (Gosstroy of Russia), 2004; 54. (In Russ)
5. Rules for the technical operation of thermal power plants (approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of March 24, 2003 N 115) [Text]. Introduction from 01.10.2003 - M.: Ministry of Energy of the Russian Federation, 2003; 202. (In Russ)
6. SO 34.35.101-2003. Guidelines on the volume of technological measurements, signaling, automatic control at thermal power plants; Introduction from 09/01/2004 M.: *TPTI ORGRES*, 2004; 98. (In Russ)
7. SanPiN 2.1.2.2645-10 "Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises" [Text]. - Instead of SanPiN 2.1.2.1002-00. Introduction from 08/15/2010 - M.: *Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor*, 2010; 27. (In Russ)
8. Methods for calculating the main energy indicators of steam turbine, gas turbine and steam-gas heating plants. E.Ya. Sokolov, V.A. Martynov; Ed. V.M. Kachalov; Moscow energy Institute (MPEI) *MPEI Publishing House*, 1997; 102.
9. Andriyushin A.V., Sabanin V.R., Smirnov N.I. M.: *MPEI Publishing House*, 2011; 392. (In Russ)
10. Theory of automatic control: a textbook for universities in the specialty "Automation of technological processes and industries (energy)" / V. Ya. Rotach. - 3rd ed., revised. M.: *MPEI Publishing House*, 2005; 400. (In Russ)
11. Commercial website of PO Oven LLC, product catalog, description of the thermal resistance sensor type DTSxx4 and its modifications (including DTS024-PT100.V3.30/0.2), accessed: June 15, 2022 https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom/klasse_dopuska_izmereniya
12. E. Dotzauer, "Simple model for prediction of loads in district-heating systems", 2002; 73: 277-284.
13. G. Yingjun and H. Yajin, "Heat load forecasting and optimization of thermal network adjustment method study", *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015; 4907-4910.
14. E. Kral, A. Kostalova, P. Capek, L. Vasek, "Algorithm for Central Heating Heat Load Modelling", *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (2018 CSCI)*, 2018; 62.
15. D. Rusovs, L. Jakovleva, V. Zentins, K. Baltputnis, "Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021; 58(3):121.

Сведения об авторах:

Гужов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; GuzhovSV@mpei.ru

Крылова Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; KrylovaYeV@mpei.ru

Тороп Дарья Владимировна, магистрант, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; ToropDV@mpei.ru

Information about the authors:

Sergey V. Guzhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; GuzhovSV@mpei.ru

Yelena V. Krylova, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; KrylovaYeV@mpei.ru

Darya V. Torop, Undergraduate, Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; ToropDV@mpei.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 27.07.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 27.07.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056, 346.244

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-74-81

Обзорная статья / Review article

Угрозы информационной безопасности госкорпораций Российской Федерации

И.А. Лоскутов¹, С.А. Резниченко²

¹Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна»

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»),

¹107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,

^{1,2}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

^{1,2}115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Россия,

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,

²125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49/2,

²Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»,

²119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является структурирование общедоступной информации для определения отличительных особенностей, присущих госкорпорациям РФ и описание угроз, возникающих в результате их непрерывного функционирования. **Метод.** В качестве методов научного познания используются: систематизация, описание, анализ, дедукция. Характеристики госкорпораций формируются на основе данных, полученных как из нормативно-правовой базы, так и по результатам анализа современных исследований по теме. **Результат.** Проведена систематизация угроз информационной безопасности госкорпораций; рассматриваются наиболее распространенные их классификации; отмечается возрастающая активность злоумышленников относительно объектов критической информационной инфраструктуры и выявлены возможные последствия для госкорпораций после «успешно» проведенной на ней компьютерной атаки. Комплексный анализ позволил подробно охарактеризовать объект исследования, тем самым конкретизировав значимые аспекты его функционирования. Определены наиболее значимые угрозы угроз госкорпораций России; отмечена важность обеспечения информационной безопасности и показаны 15 факторных влияний «успешной» кибератаки. **Выводы.** Материалы, представленные в работе, могут послужить базисом для дальнейших исследований по направлению, а также формирования принципов защиты от выявленных угроз.

Ключевые слова: информационная безопасность, госкорпорации, угрозы, компьютерные атаки

Для цитирования: И.А. Лоскутов, С.А. Резниченко. Угрозы информационной безопасности госкорпораций Российской Федерации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):74-81. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-74-81

Threats to information security of state corporations of the Russian Federation

I.A. Loskutov, S.A. Reznichenko

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation 'Space Monitoring Systems,

¹30 Volnaya Str., p. 10, Moscow 107078, Russia,

^{1,2}National Research Nuclear University MEPhI,

^{1,2}31 Kashirskoe highway, Moscow 2115409, Russia,

²Financial University under the Government of the Russian Federation,

²49/2 Leningradsky Ave., Moscow 125167, Russia,

²I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),

²65 Leninsky Ave., Moscow 2119991, Russia

Abstract. Objectives. Structuring of publicly available information to identify the distinctive features inherent in state corporations of the Russian Federation and to describe the threats arising as a result of their continuous operation. **Method.** The following methods of scientific cognition are used: systematization, description, analysis, deduction. The characteristics of state corporations are formed on the basis of data obtained both from the regulatory framework and by means of analysis of modern research in the field. In the future, the systematization of knowledge about the threats of state corporations is carried out, the most common classifications are considered, the increasing activity of intruders regarding critical information infrastructure objects is noted, and possible consequences for the state corporation after a successful computer attack on them are noted. **Result.** In this paper, a study was conducted on a little-covered area in the scientific literature - the protection of Russian state corporations. A comprehensive analysis made it possible to characterize the object of research in detail, thereby specifying the significant aspects of its functioning. Next, the most significant threats of Russian state corporations were shown, the importance of ensuring information security was noted and 15 factor influences of a successful cyberattack were shown. **Conclusions.** The conducted research is of an overview nature. The materials presented in the paper can serve as a basis for further research in the direction, as well as the formation of principles of protection against the mentioned threats.

Keywords: information security, IS, state corporations, threats, computer attacks

For citation: I.A. Loskutov, S.A. Reznichenko. Threats to information security of state corporations of the Russian Federation. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 74-81. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-74-81

Введение. Глобализация мира постоянно требует реакции на вновь появляющиеся вызовы. С целью облегчения поиска выбора верного пути и стратегии развития многие компании объединяются в группы, образуя тем самым различные коммерческие сообщества.

Аналогичным путем действует и государственная политика в областях, связанных с решением стратегически важных вопросов, затрагивающих области национальных интересов. Результатом таких объединений в Российской Федерации с 1999 года становятся «госкорпорации» [1].

В целом, проведение исследований госкорпораций с точки зрения угроз ее информационной безопасности не ново. Являясь по своей сути объединением предприятий в одном структурном блоке, госкорпорации представляют собой мишень интересов для других государств и их шпионских организаций, а также отдельных незаконопослушных личностей.

Поскольку госкорпорации по своей сущности направлены на решение определенных национальных интересов государства, сохранение информации, имеющей особое значение, а также недопущение дисбаланса техпроцесса изготовления научных знаний и изделий, вызванных внешними злонамеренными воздействиями, становятся главными приоритетами организации.

Впервые, в нашем отечестве, официальная терминология была введена в статье 7.1 Федерального закона от 1996 г. №7-ФЗ [2].

Хотя по своей сущности государственные корпорации во многом напоминают фонды [3], в них присутствуют функции, свойственные как всем типам данного организационного объединения, так и конкретному виду экономической деятельности.

Кроме того, отличительная черта госкорпораций от прочих видов коопераций кроется в двойственности их функционирования с точки зрения нормативно-правовых актов.

В отмеченной работе [3] поднимается проблема регулирования их затрат с помощью органов власти, которая до сих пор не предусмотрена, из-за чего невозможно прозрачно оценить работоспособность столь больших экономических механизмов. Затронув тематику обобщающих факторов, с целью подробного определения особенностей, присущих госкорпорациям, стоит показать характеристики, свойственные всем отмеченным некоммерческим единицам [4]:

- базисное имущество выделено государством на безвозмездной основе;

- пока существует госкорпорация, обязательства России ее никак не касаются, обратное – аналогично; исключением является целевое создание госкорпорации, с соответствующей нормативно-правовой базой, в которой прописаны данные обстоятельства;
- имущество, переданное во владение госкорпорации, используется только по назначению (направлению деятельности, обозначенному при его создании);
- любая правомерная предпринимательская деятельность, связанная с направлением госкорпорации не запрещена;
- органы власти любой инстанции не вправе вмешиваться в функционирование госкорпорации, кроме случаев, закрепленных в федеральных нормативно-правовых актах;
- возможны временные рамки существования и функционирования госкорпораций [5];
- учредителем является государство [6];
- членство в госкорпорациях невозможно;
- форма собственности – госкорпоративная [7, с.11].

Достаточно многогранное описание характеристик госкорпораций не показывает всю вариативность их функционирования.

Для создания общей картины, описывающей характер деятельности необходимо отметить, что госкорпорации бывают двух видов [7]:

- функционирующие за счет товаро-имущественных взаимодействий (создающие/использующие);
- выполняющие задачи, носящие организационный и / или координационно-распорядительный характеры.

Целевое предназначение госкорпораций определяется на основании потребности страны в решении проблем, как определенной отрасли, так и региона (ов), в котором (ых) будут представлены офисы и филиалы.

Среди положительных аспектов, как правило, выделяют [8]:

- развитие выбранного экономического сектора;
- долгосрочная занятость экономического сектора с минимизацией политического влияния;
- развитие инновационной политики экономического сектора;
- определение ответственных исполнителей тех или иных решений;
- обеспечение финансовыми потоками со стороны государства (исчезает необходимость в постоянном поиске инвесторов);
- выполнение требований модернизации отрасли, указанных в декадных разрабатываемых стратегиях развития;
- развитие частного предпринимательства, задействованного в кооперациях с госкорпорациями по отрасли;
- совершенствование и отработка новых подходов в части административного управления;
- удовлетворение потребности региона (ов) функционирования в части обеспечения рабочих мест [9].

Ключевой особенностью, на наш взгляд, является имущество, которое выделяется государством при создании госкорпораций.

Ранее упомянутая характеристика требует особого внимания, поскольку, в отличие от передачи помещений, техники и технологий, иных интеллектуальных и материальных элементов, чаще всего подразумевается передача заводских комплексов [10].

Таким образом, госкорпорация есть ни что иное как – управляющий дивизион.

Постановка задачи. Осознание данного факта приводит к логичному умозаключению о необходимости создания в госкорпорациях сложного многоуровневого регулирования, которое подтверждено все большему выходу новых законодательных актов.

Особенно это касается области информационной безопасности, т.к. передача данных как внутренняя, так и внешняя совмещена с определенными рисками и необходимостью создания

информационных «маячков» – категорий, присваиваемых каждому структурному подразделению и помещению внутри подконтрольных госкорпорации заводских комплексов.

Посему, для обеспечения должного уровня защиты столь значимых объектов необходимо постоянно апеллировать данными по основным угрозам, направленные на дестабилизацию функционирования предприятий госкорпораций.

Методы исследования. Поскольку госкорпорации относятся к объектам критической информационной инфраструктуры (КИИ) следует указать типы угроз, которые будут подразумеваться в работе. В соответствии с Федеральным законом от 2017 г. № 187-ФЗ [11] под угрозами КИИ следует понимать компьютерные атаки.

Тем самым, проводится явное разграничение с другими внешними воздействиями, которые могут оказать негативные и даже разрушительные эффекты, как например с электромагнитными, крайне подробно описанными во второй главе книги [12], хоть и предназначенной в первую очередь для разработки средств авиационной и радарной техники.

Покажем классификацию наиболее значимых методов компьютерных атак [13-14]: отказ в обслуживании (DoS атака); логическая бомба; вредоносное программное обеспечение; троянский конь; вирус; червь; спам рассылка; ботнет; фишинг; парольные атаки; и др.

Каждая из указанных атак имеет свои отличительные характеристики, о которых немало написано в научной литературе. Они проявляются во взаимодействии с атакуемой системой. Поэтому оправданно также разделять угрозы по целям, которые будут достигнуты в случае плохой киберзащиты.

Информация, в результате атаки, может быть незаконно [15]: прочитана; изменена; уничтожена.

Кроме того, наличие незаконного программного продукта (ПП), может проявляться как: пассивное; активное.

В первом случае, вредоносный ПП будет предоставлять доступ к информации, но не вредить системе, во втором – целенаправленно дестабилизировать ее.

Также необходимо показать способы добычи информации: через легальные каналы; через недеklarированные каналы.

Стоит обратить внимание, что в работе [15] освещался еще один классификационный элемент – программные закладки, однако в соответствии с РД от 1999 г. № 114 [16], он относится к недеklarированным возможностям, тем самым в выделении его как отдельно значимого нет необходимости.

Существует множество других классификаций угроз, однако, на наш взгляд, уже создана достаточно полная картина способов добычи информации. Единственное – необходимо определить наиболее опасные методы компьютерных атак, среди показанных выше.

В случае атаки DoS, червей, ботнета, фишинга, парольных атак и спам-рассылки, последствия для КИИ будут проявляться в виде замедления передачи данных, потери конфиденциальной информации, находящейся на компьютерах, предназначенных для работ с внешними представителями, поскольку именно они требуют подключения к сети Интернет. Угрозу от них стоит рассматривать как среднюю по степени важности.

Логические бомбы, аналогично троянским коням, вредоносным ПП и вирусам наиболее опасны, в случае их непосредственной интеграции в локальную сеть заводского комплекса, тем самым, можно констатировать потребность обеспечения первостепенной защиты именно от данных типов угроз.

Важно отметить, что в случае деления госкорпорации на подразделения, территориально удаленные от головного здания, возможно стороннее незаконное проникновение в локальную сеть предприятия. В данном случае, атаки, описанные ранее как среднеопасные стоит перекалибровать в «требующих особого внимания», аналогично вредоносному ПП и т.п. Далее стоит акцентировать внимание на таком важном моменте, как вероятность возникновения кибер атаки.

Обсуждение результатов. На рис.1 показана карта потенциальных угроз на 2020 г. [17, с.10]. В соответствии с исследованиями компании Check Point Software Technologies LTD, Россия относится к странам со средней вероятностью нападения.



Рис.1. Карта распределения потенциальных кибератак
Fig.1. Distribution map of potential cyber attacks

Градация света от серого к более темному (яркому) на рис. 1 обозначает вероятность возникновения в той или иной стране киберинцидента.

В целом тенденция распространения вредоносных программ, проведенная компанией SONICWALL за первое полугодие 2020 г., рис.2 [18, с.11], показывает аналогичную картину.

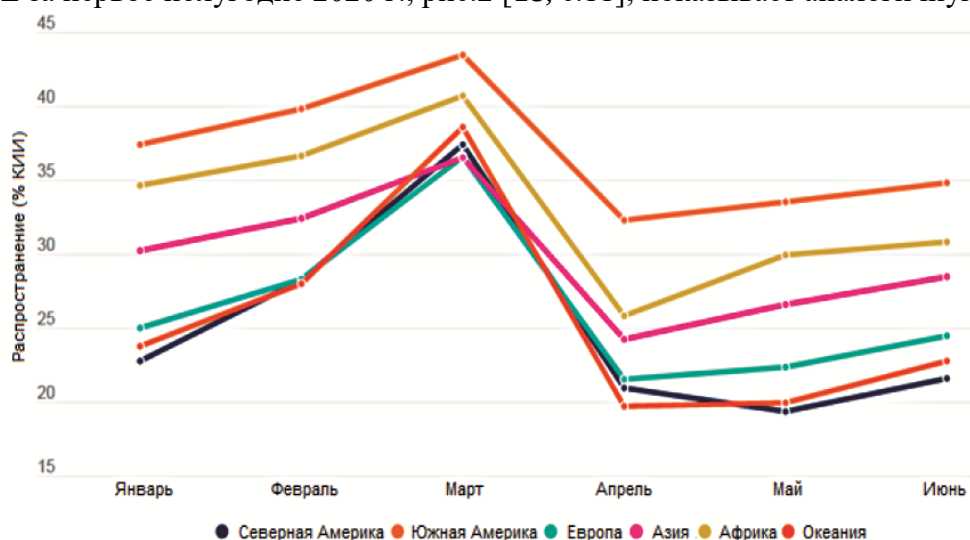


Рис.2. График распространения вредоносных программ
Fig.2. Malware distribution chart

Однако необходимо отметить, что статистика по среднему распределению не указывает конкретные данные по количеству атак.

На основании материалов компании Positive Technologies [19], нападения на объекты КИИ в Российской Федерации выросли более чем на 90% в 2020 году по сравнению с предыдущим отчетным периодом, рис.3.

Данный показатель подтверждает явную потребность в обеспечении должной системы защиты на таких производствах. Кроме того, нельзя не отметить тот разрушительный эффект, который оказывают сетевые атаки на госкорпорации.

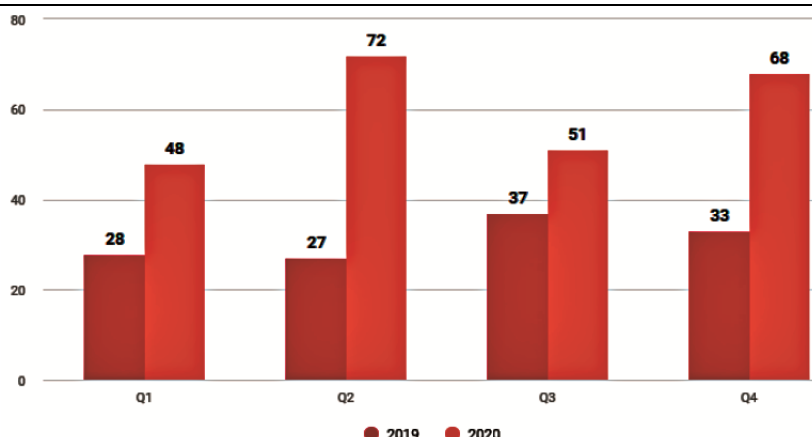


Рис.3. Количество кибернетических нападений на КИИ

Fig.3. Number of cyber attacks on CI

В соответствии с [20], [21, с.6] выделяются 14 факторных влияний на подвергшуюся кибератаке фирму:

- дополнительная трата финансов, в т.ч. на гонорары адвокатам и судебные издержки;
- восстановление системы и приведение в соответствие нормативным требованиям;
- уведомление клиентов о нарушении;
- обеспечение защиты данных клиентов после нарушения;
- проведение технического расследования;
- осуществление связи с общественностью;
- проведение улучшения в области кибербезопасности;
- увеличение страховых взносов;
- увеличение трат на привлечение заемных средств;
- ликвидация последствий сбоя в работе или разрушения;
- потеря интеллектуальной собственности;
- обесценивание торгового имени;
- необходимость возвращения фирменной значимости в отношениях с клиентами;
- необходимость расчета ущерба и упущенной выгоды по контракту.

Поскольку госкорпорации в соответствии с ранее упомянутой статьей 7.1 Федерального закона от 1996 г. №7-ФЗ [2] обязана публиковать бухгалтерскую отчетность, полная применимость указанных факторных влияний для таких организаций не вызывает сомнений.

Делая акцент на последствиях угроз, нельзя обойти вниманием такое понятие, как информационное противоборство. В [22] были отмечены два поколения, которые разнятся степенью влияния и подходами к процессу атаки, а также их характеристиками. Применительно к данной работе относится последний пункт второго поколения, выливающийся в потерях в той или иной сфере деятельности (т.е. можно рассмотреть, как дестабилизация функционирования предприятия госкорпорации).

Тем самым следует создать 15-е факторное влияние: восстановление производства в максимально короткий срок для обеспечения должного функционирования в области национальных интересов.

Вывод. Проведенный в работе анализ носит обзорный характер и затрагивает ключевые моменты информационной безопасности госкорпораций Российской Федерации.

На основании результатов исследования была сформирована база знаний, которая позволяет подробно охарактеризовать объект исследования, конкретизировать значимые аспекты его функционирования; систематизировать наиболее значимые угрозы информационной безопасности госкорпораций; предварительно оценить вероятность возникновения кибератак на госкорпорациях; выявить факторные влияния «успешно» проведенной компьютерной атаки. Информация, представленная статье, может быть использована как базис для дальнейших ис-

следований по направлению информационной безопасности, а также формирования принципов защиты от компьютерных угроз госкорпораций.

Библиографический список:

1. Степанов К.С. Реализация государством предпринимательской функции через институт госкорпорации // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. - 2011. - N 1(35). - С.36-38.
2. Федеральный закон от 12.01.1996 N7-ФЗ «О некоммерческих организациях»
3. Аштаева С.С. Государственные корпорации в России, их становление и роль в развитии экономики // Право и государство: теория и практика. - 2013. - N 12(108). - С.140-146.
4. Панфилов К.С. Экономическое и политическое измерение эффективности российских государственных корпораций // Бизнес. Общество. Власть. - 2019. - № 2(32). - С.45-63.
5. Аштаева С.С. Госкорпорации в современной России: функции, структура и особенности деятельности // Вестник Калмыцкого института гуманитарных исследований РАН. - 2012. - Т. 5. - N 1. С.113-116.
6. Моралес К., Грищенко А.И. Корпорации в России и зарубежных правовых системах: понятие и сущность (государственные корпорации в современной России на примере Государственной корпорации "Росатом") // Энергетическое право. - 2009. - N 1. - С.19-29.
7. Каплин С.Ю. Государственная корпорация как субъект права: автореф. на соиск. ученой степ. канд. юр. наук. 12.00.01 – Теория и история права и государства; история учений о праве и государстве - Казань: 2011. - 26 с.
8. Нехаичик В.К. Административно-правовой статус и функции государственных корпораций в системе субъектов органов исполнительной власти Российской Федерации: проблемные вопросы // Сибирская финансовая школа. - 2016. - N 3(116). - С.11-16.
9. Цыгалов Ю.М., Бутова Т.В., Ординарцев И.И. Эффективность государственных корпораций в развитии депрессивных регионов // Управленческое консультирование. - 2017. - N 10(106). - С.46-58.
10. Биченов Д.Г. Каболов В.В. Законодательство о государственных корпорациях // Наука и современность – 2017: сборник материалов L Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 20 января – 17 февраля 2017 года. - Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Центр развития научного сотрудничества", 2017. - С.166-172.
11. Федеральный закон от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»
12. Electronic Warfare and Radar Systems. Engineering Handbook. - Point Mugu: Naval Air Warfare Centre Weapons Division, 2013. - 455 p.
13. Li Y., Liu Q. A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments // Energy Reports. - 2021. - 11 p.
14. Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей: учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по группе специальностей 2200 "Информатика и вычислительная техника". - М.: Форум, 2009. - 415 с.
15. Гатчин Ю.А., Климова Е.В. Введение в комплексную защиту объектов информатизации: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. - 112 с.
16. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей. Утверждено решением председателя Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации от 4 июня 1999 г. N 114
17. Cyber attack trends: 2020 mid-year report. - Tel Aviv: Check Point Software Technologies LTD, 2021. - 27 p.
18. Mid-year update. 2020 SonicWall Cyber threat reports. - Milpitas: SonicWall Inc., 2020. - 30 p.
19. Актуальные киберугрозы: итоги 2020 года. - URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threats-2020/> (дата обращения 08.10.2021).
20. Mossburg E., Gelinne J., Calzada J. Beneath the surface of a cyber attack: A deeper look at business impacts. Technical Report. - London: Deloitte Development LLC. - 2016. - 28 p.
21. Isaca's cybersecurity nexus. <http://new.groteck.ru/images/catalog/39049/5818630bf28bcbd9a93f676aa7169fae.pdf> (дата обращения 09.10.2021).
22. Фалеев М.И., Черных Г.С. Угрозы национальной безопасности государства в информационной сфере и задачи МЧС России в этой области деятельности // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. - 2014. - Т.4. - N 1(6). - С.21-34.

References:

1. Stepanov K.S. State entrepreneurial function in the institution of state corporation. *Vestnik Saratov State Socio-economic University*. 2011;1(35):36-38. (In Russ)
2. Federal law from 12.01.1996 N7-FL "On non-profit organizations"(In Russ)
3. Ashtaeva S.S. State corporations in Russia, their formation and role in the development of the economy. *Law and State: the theory and practice*. 2013;12(108):140-146. (In Russ)
4. Panfilov K.S. Economic and political dimensions of the effectiveness of russian state corporations. *Business. Society. Rule*. 2019;2(32):45-63. (In Russ)

5. Ashtaeva S.S. State corporations in modern Russia: functions, structure and peculiarities of activity. *Bulletin of the Kalmyk Institute for Humanities of the RAS*. 2012; 5(1):113-116. (In Russ)
6. Morales K., Grishchenko A.I. Corporations in Russia and foreign legal systems: the concept and essence (state corporations in modern Russia on the example of the State Corporation Rosatom). *Energy Law*. 2009; 1:19-29. (In Russ)
7. Kaplin S.Yu. State corporation as a subject of law: abstract. on the job. scientific step. candidate of legal sciences. 12.00.01 – Theory and history of law and the state; history of the teachings of law and the state - Kazan: 2011; 26 p. (In Russ)
8. Nekhajchik V.K. Administrative legal status and functions of the state corporations in system of subjects of executive authorities of the Russian Federation: problematic issues. *Siberian Financial School*. 2016; 3(116):.11-16. (In Russ)
9. Tsygalov Yu.M., Butova T.V., Ordinartsev I.I. Efficiency of the State Corporations in Depressive Regions Development. *Administrative Consulting*. 2017; 10(106):.46-58. (In Russ)
10. Bichenov D.G. Kabolov V.V. Legislation on state corporations. *Science and modernity – 2017: collection of materials of the L International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, January 20 – February 17, 2017*. - Novosibirsk: Limited Liability Company "Center for the Development of Scientific Cooperation", 2017;166-172. (In Russ)
11. Federal Law from 26.07.2017 № 187-FL "On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation"(In Russ)
12. Electronic Warfare and Radar Systems. *Engineering Handbook*. - Point Mugu: Naval Air Warfare Centre Weapons Division, 2013; 455.
13. Li Y., Liu Q. A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments. *Energy Reports*. 2021; 11.
14. Shangin V.F. Information security of computer systems and networks: a textbook for students of secondary vocational education institutions studying in the group of specialties 2200 "Computer Science and computer engineering". M.: Forum, 2009; 415. (In Russ)
15. Gatchin Yu.A., Klimova E.V. Introduction to complex protection of informatization objects: textbook. St. Petersburg: SRI ITMO, 2011; 112. (In Russ)
16. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Part 1. Information security software. Classification according to the level of control of the absence of undeclared opportunities. Approved by the decision of the Chairman of the State Technical Commission under the President of the Russian Federation dated June 4, 1999;114 (In Russ)
17. Cyber attack trends: 2020 mid-year report. Tel Aviv: Check Point Software Technologies LTD, 2021; 27.
18. Mid-year update. 2020 SonicWall Cyber threat reports. Milpitas: SonicWall Inc., 2020; 30.
19. Current cyber threats: results of 2020. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2020/> (Date of treatment 08.10.2021). (In Russ)
20. Mossburg E., Gelinne J., Calzada J. Beneath the surface of a cyber attack: A deeper look at business impacts. Technical Report. London: Deloitte Development LLC. 2016; 28.
21. Isaca's cybersecurity nexus. <http://new.groteck.ru/images/catalog/39049/5818630bf28bcd9a93f676aa7169fae.pdf> (Date of treatment 09.10.2021).
22. Faleev M.I., Chernykh G.S. Threats to the national security of the state in the information sphere and the tasks of the MES of Russia in this field of activity. *Civil protection strategy: problems and research*. 2014; 1(6):.21-34. (In Russ)

Сведения об авторах:

Лоскутов Иван Андреевич, инженер – конструктор в отделе 55; магистрант; faxvex@ya.ru
Резниченко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; rsa_5@bk.ru

Information about authors:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor in the Department 55, Master's Student; faxvex@ya.ru
Sergey A. Reznichenko, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; rsa_5@bk.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.08.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 26.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 26.08.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 658.8.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-82-90

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование оптимальной системы управления цепями поставок
в транспортных системах**

Н.Г. Мамедов

Азербайджанский технический университет,
Баку AZ1073, проспект Гусейн Джавида, 25, Азербайджан

Резюме. Цель. Цель работы заключается в моделировании оптимальной системы управления цепями поставок и выработке универсальных логистических подходов в условиях работы мультимодального сервисного центра. **Метод.** Методологическую основу исследования представляют собой теоретические и экспериментальные исследования в области создания эффективной модели управления цепями поставок в транспортных системах. **Результат.** Формализован процессный подход к стратегическому управлению цепями поставок материально-технического обеспечения транспортных систем с учетом влияния группы факторов; разработана методика управления взаимоотношениями с поставщиками с учетом их интеграции в управлении цепями поставок; определены рациональные параметры оценки эффективности логистической системы управления материально-техническим обеспечением в заданных условиях работы; разработана методика по управлению цепями поставок материально-технического обеспечения в условиях работы мультимодального сервисного центра на основе применения теории планирования эксперимента. **Вывод.** Оптимизация управления цепями поставок (Supply Chain Management, SCM) позволяет эффективно планировать, формировать, контролировать и регулировать материальные, финансовые, информационные потоки на протяжении всего жизненного цикла товаров. Полученные уравнения регрессии рекомендуется использовать как механизм проведения анализа работы с выбранным поставщиком при организации оптимального управления процессами поставок и закупок в транспортной системе в условиях работы мультимодального сервисного центра ООО «Grand Motors».

Ключевые слова: управление, закупка, логистика, снабжение, цепями поставок

Для цитирования: Н.Г.Мамедов. Моделирование оптимальной системы управления цепями поставок в транспортных системах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):82-90. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-82-90

Modeling an optimal supply chain management system in transport systems

N. H. Mamedov

Azerbaijan Technical University,
25 Husein Javid Avenue, Baku AZ1073, Azerbaijan

Abstract. Objective. The purpose of the work is to develop universal logistics approaches to modeling the optimal supply chain management system in the conditions of a multimodal service center. **Method.** The methodological basis of the study is theoretical and experimental research in the field of creating an effective model of supply chain management in transport systems. **Result.** A process approach to the strategic management of supply chains for the logistics of transport systems has been formalized, taking into account the influence of a group of factors; developed a methodology for managing relationships with suppliers, taking into account their integration in supply chain management; rational parameters for evaluating the effectiveness of the logistics management system for logistics under given working conditions were determined; a methodology has been developed for managing supply chains of logistics in the conditions of operation of a multimodal service center based on the application of the theory of experiment planning. **Conclusion.** Optimization of supply chain management (Supply Chain Management, SCM) allows you to effectively plan,

form, control and regulate material, financial, information flows throughout the entire life cycle of goods. The resulting regression equations are recommended to be used as a mechanism for analyzing the work with the selected supplier when organizing the optimal management of supply and procurement processes in the transport system in the conditions of operation of the multimodal service center of GRAND MOTORS LLC.

Keywords: management, procurement, logistics, supply, supply chains

For citation: N.H. Mamedov. Modeling an optimal supply chain management system in transport systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3):82-90. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-82-90

Введение. Поиск новых резервов роста в условиях обострения конкуренции вызывает стремление многих компаний и фирм искать не только новые рынки сбыта, но также и более выгодные качественные источники сырья и трудовых ресурсов, и при этом заниматься комплексными логистическими вопросами оптимизации управления цепями поставок материально-технического обеспечения [1, 13-15,19].

Перспективы создания и последующего развития логистической системы управления цепями поставок являются основой конкурентоспособности любого предприятия в разных сегментах рынка [2, 11,12,18,20,21]. Снижение издержек в процессе управления различными логистическими процессами является одним из ключевых элементов эффективности хозяйственной деятельности любого предприятия, что и является более актуальным вопросом в развитых странах. Проведённые исследования показывает, что на эффективность системы управления цепями поставок на микроэкономическом уровне могут повлиять многие факторы.

В общем случае оптимизация управления цепями поставок (Supply Chain Management, SCM) позволяет эффективно планировать, формировать, контролировать и регулировать материальные, финансовые, информационные потоки на протяжении всего жизненного цикла товара [3, 9,10]. Использование данной системы позволяет существенно эффективней удовлетворять спрос на продукцию компании и значительно снизить издержки.

Вопросам оптимизации управления цепями поставок материально-технического обеспечения в логистических системах посвящены труды многих западных ученых, таких как: Баррат К., Бауэрсокс Д., Dekker Н. С., Джонсон Дж., Джиллингем М., Круминыш Нормундс., Немогай Н. В., Уотерс Д., Хэндфилд Р., Шехтер Дэймон и др.

Значительный вклад в развитие рассматриваемого направления внес и целый ряд российских ученых. Среди них можно отметить таких авторов, как: Азаркина Н.О., Аникин Б.А., Афанасьева Н.В., Афанасенко И.Д., Бережной В.И., Гаджинский А.М., Григорьев М. Н., Еремеева Л. Э., Кардашин Л.И., Костоглодов Д.Д., Курганов В. М., Щербаков В. В., Лукинский В. С., Миротин Л.Б., Неруш Ю. М., Просветов Г. И., Проценко О. Д., Пурлик В.М., Сергеев В.И. и др.

Однако, несмотря на наличие высокой степени проработанности данного вопроса, в настоящее время существует целый ряд теоретических и практических задач в логистике материально-технического обеспечения (МТО) транспортных систем (ТС), которые требуют современного подхода к их решению [4, 15-17]. Выше отмеченные требования в значительной мере зависят от надежности транспортных систем. Данное обстоятельство вынуждает пересматривать и оптимизировать политику в сфере формирования, хранения и управления запасами, а также внесения соответствующих изменений в процесс организации материально-технического обеспечения для снижения эксплуатационных затрат и повышения эффективности перевозочного процесса.

Постановка задачи. Цель исследования заключается в моделировании оптимальной системы управления цепями поставок и выработке универсальных логистических подходов в условиях работы мультимодального сервисного центра.

Методы исследования. Методологическую основу данной работы представляют теоретические и экспериментальные исследования в области создания эффективной модели управления цепями поставок в транспортных системах.

Особенность современного этапа развития логистики и управления цепями поставок заключается в стремительной компьютеризации всего процесса передвижения материального и сопутствующего потоков от места возникновения до конечного потребителя. Это обусловлено возросшими масштабами производства и объемами мировой торговли, которая согласно данным ВТО (Всемирной торговой организации) выросла на 8% с начала текущего года [1-4].

Ранее было подробно раскрыта сущность управления цепями поставок, анализирована одна из самых часто применимых моделей, определены оценочные критерии и ключевые показатели эффективности управления цепями поставок [8].

Прежде чем разрабатывать рекомендации, направленные на оптимизацию системы управления цепями поставок, необходимо провести экспериментальные исследования в этой области. В данной работе в качестве исследуемого предприятия используется мультимодальный сервисный центр ООО «Grand Motors». Компания напрямую покупает необходимые запчасти у производителей из Китая, Германии, Франции, Южной Кореи, Турции и т.д.

Рассмотрим практические вопросы, связанные с использованием метода экспертных оценок при выборе основных факторов влияющих на эффективности управления цепи поставок. Рассмотрим основные положения современной теории измерений и экспертные оценки. Для более углубленного рассмотрения проблем экспертных оценок понадобятся понятия, так называемой, репрезентативной теории измерений (РТИ) [5,6,7]. Экспертная оценка - это метод поиска и результат применения метода, полученный на основании использования персонального мнения эксперта или коллективного мнения группы экспертов. Рассмотрим в качестве примера применения результатов теории измерений, связанных со средними величинами в порядковой шкале, один сюжет, связанный с ранжировками и рейтингами.

Перечень факторов, подлежащих дальнейшему исследованию, приведен в табл.1.

Таблица 1. Ранжирование факторов
Table 1. Ranking of factors

№	Наименование факторов Name of factors	Условное обозначение
1	Надежность поставки Supply reliability	X ₁
2	Цена продукции Product price	X ₂
3	Качество продукции Product quality	X ₃
4	Время использования заказа Order use time	X ₄
5	Длительность логистических циклов Duration of logistics cycles	X ₅
6	Производительность транспортных средств Vehicle performance	X ₆
7	Производительность технологического оборудования Technological equipment productivity	X ₇
8	Специфика и конъюнктура рынка Specificity and market conditions	X ₈
9	Квалификация персонала Personnel qualification	X ₉
10	Финансовое состояние поставщика The financial condition of the supplier	X ₁₀
11	Возможность внеплановых поставок Possibility of unscheduled deliveries	X ₁₁

Принятые одиннадцать факторов были согласованы с руководством фирмы. Следует отметить, что с увеличением количества факторов, принятых для проведения эксперимента, стоимость эксперимента увеличивается. Поэтому при изучении нужно выделить наиболее важные управляемые факторы для дальнейшего исследования и отсеять остальные. Метод априорного ранжирования факторов основан на известных методах ранговой корреляции. Этот метод иногда называют методом экспертных оценок или пассивным экспериментом. Особенность метода априорного ранжирования факторов заключается в том, что факторы, которые согласно

априорной информации могут иметь существенные влияния, ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад каждого фактора оценивается по величине ранга, которые эксперты присваивают каждому из исследуемых факторов. Экспертам были предоставлены все необходимые исходные данные (анкеты) для расчета по каждому факторов.

Учитывая условия работы в качестве оценивающего параметра принимаем величины относительного изменения некоторых логистических издержек (%) при организации доставки товара от выбранного поставщика, которые были подробно описаны в [8]. Оценки выбранных факторов влияющих на оценивающий параметр были рассчитаны и проанализированы 9 экспертами, включенными в экспертную комиссию.

Опрашиваемым было предложено заполнить анкету и проранжировать отобранные факторы по степени их влияния на параметр оптимизации. В анкетном опросе приняли участие ведущие специалисты Транспортного Агентства Республики и преподаватели АзТУ. Различия мнений экспертов по поводу рангов поставщиков обусловлены, прежде всего, разными подходами каждого эксперта к удельному весу того или иного показателя оценки. Присвоение рангов осуществлялось в соответствии с представлением каждого специалиста о целесообразности включения поставщика в стратегический план фирмы.

При этом эксперт присваивает ранг 1 самому лучшему – главному фактору. Ранг 2 получает от эксперта второй по привлекательности фактор и т.д. В табл. 2. приведена матрица ранжирования факторов, присвоенным им каждым из 9 экспертов.

Таблица 2. Матрица ранжирования факторов
Table 2. Factor ranking matrix

Факторы Factors	Э к с п е р т ы Expert s									$\sum a_{ij}$	Δi	$(\Delta i)^2$	Общий ранг General rank
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
X1	1	2	1	1	3	1	1	2	1	13	-41	1681	1
X2	3	1	2	2	1	4	3	3	2	21	-33	1089	2
X3	2	3	3	5	2	2	4	1	3	25	-29	841	3
X4	6	5	6	6	5	5	2	7	4	46	-8	64	5
X5	4	6	4	3	4	3	5	4	5	38	-16	256	4
X6	5	4	5	4	7	7	6	6	7	51	-3	9	6
X7	8	7	7	8	6	6	7	5	6	60	6	36	7
X8	7	8	8	7	9	8	8	8	8	71	17	289	8
X9	9	11	9	10	8	10	9	10	9	85	31	961	9
X10	10	9	10	11	11	11	11	9	11	93	39	1521	11
X11	11	10	11	9	10	9	10	11	10	91	37	1369	10
										594		8116	

Метод средних арифметических рангов. Сначала для получения группового мнения экспертов был применен метод средних арифметических рангов. Для этого, прежде всего, была подсчитана сумма рангов, присвоенных проектам (табл. 2.). Затем эта сумма была разделена на число экспертов, в результате рассчитан средний арифметический ранг (именно эта операция дала название методу). Фактор, который с точки зрения специалистов оказывает на изучаемый параметр наибольшее влияние, имеет наименьшую сумму рангов, а фактор, показывающий самое слабое влияние – наибольшую сумму рангов. Ранжировка по суммам рангов имеет вид:

$$X1 < X2 < X3 < X5 < X4 < X6 < X7 < X8 < X9 < X11 < X10$$

После ранжирования часть факторов «отсеивается» и не включается к проведению дальнейшего эксперимента.



Рис. 1. Гистограмма ранжирования факторов

Pic. 1. Histogram of factor ranking

Из рис.1 тоже видно, что факторы X7, X8, X9, X11, X10 можно исключить из эксперимента и не вводить в математическую модель. Влияние этих факторов на параметр оптимизации можно проверить отдельно и если обнаружится, что величина их влияния превышает ошибку эксперимента, то необходимо эти факторы ввести.

Учитывая сложность проведения многофакторного эксперимента, считаем целесообразным, что в данной ситуации достаточно изучить влияние первых групп факторов на параметр оптимизации. Математическая обработка результатов ранжирования осуществляется по следующей последовательности [5,6].

Сумма рангов по факторам определяется по формуле:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (1)$$

Средняя сумма рангов

$$T = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \cdot \sum_{j=1}^m a_{ij} = \frac{1}{11} \cdot 594 = 54, 0 \quad (2)$$

где $m = 9$ - число экспертов, $k = 11$ - число факторов

Разность между суммой рангов i -го фактора и средней суммы рангов определяется по формуле

$$\Delta i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - T \quad (3)$$

где T - средняя сумма рангов.

Сумма квадратов разностей рассчитывается по формуле

$$S = \sum_{j=1}^m (\Delta i)^2 = 8116 \quad (4)$$

Для определения согласованности мнений экспертов применяется коэффициент конкордации. Коэффициент конкордации W определяется по формуле (5) и может принимать значения от 0 до 1. Чем ближе его значение к 0, тем согласованность считается более низкой. При величине данного коэффициента менее 0,3 мнения экспертов считаются несогласованными. При нахождении величины коэффициента в диапазоне от 0,3 до 0,7 согласованность считается средней. При величине более 0,7 согласованность считается высокой.

$$W = \frac{12 S}{m^2 (k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j} \quad (5)$$

$$\text{где } T_j = \sum_{i=1}^n (t_j^3 - t_j), \quad (6)$$

t_j – число связей (количество повторяющихся элементов) в оценках j -го эксперта;

Из-за отсутствия повторяющихся элементов в нашем случае:

$$T_j = 0$$

S – сумма квадратов отклонений суммы рангов от их средней величины;

m – количество экспертов;

k – количество факторов .

В нашем примере коэффициент конкордации примет следующее значение:

$$W = \frac{12.8116}{9^2(11^3 - 11)} = 0,9$$

Значение $W = 0,9$ говорит о высокой согласованности мнений экспертов.

Далее необходимо провести оценки значимости коэффициента конкордации. Для этой цели необходимо вычислить критерий согласования Пирсона по формуле (7):

$$\chi^2 = \frac{12S}{mk(k+1) - \frac{1}{k-1} \sum_1^m T_j} \quad (7)$$

Учитывая что, $T_j = 0$

$$\chi^2 = \frac{12.8116}{9 \cdot 11 \cdot (11 + 1)} = 81,98$$

Вычисленный $\chi^2 = 81,98$ сравним с табличным значением для числа степеней свободы $f = k - 1 = 11 - 1 = 10$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличные значения критериев согласования составляют $\chi^2_{\text{таб}} = 18,307$ [7].

$$\text{Следовательно } \chi^2_{\text{таб}} = 18,307 < \chi^2_{\text{расч}} = 81,98.$$

Так как получено значение $\chi^2 = 81,98$ больше соответствующих табличных значений данного показателя, то $W = 0,9$ величина не случайная.

Таким образом, полученные результаты по оценке поставщиков имеют смысл для организации и могут использоваться в дальнейшем при принятии соответствующих управленческих решений.

После анализа мнений различных специалистов, работающих в данной области, были отобраны для оптимизации управления цепями поставок основные факторы: цена продукции (характеризуется средневзвешенным темпом роста цен); качество поставляемой продукции (представляет собой темп роста поставок продукции ненадлежащего качества от того или иного поставщика); надежность поставки (среднее количество дней опозданий, приходящихся на одну поставку).

В качестве параметра оптимизации было принято изменение величины логистических издержек. Логистические издержки в данном случае включают в себя: затраты на закупку продукции; расходы по оформлению заказа товара у поставщика; расходы на хранение складских запасов; издержки на вложенный капитал; издержки, связанные с невыполнением поставщиком своих обязательств (нарушение сроков поставок, поставки некачественного товара, пересортица и т.д.).

Далее предполагается применение математических методов планирования эксперимента, с целью оптимизации УЦП, который позволит рассматривать многофакторную технологическую ситуацию с учетом воздействия на оценочный параметр, как каждого отдельного фактора, так и их совокупности. Поскольку в данном случае принятые показатели отражают увеличение негативных характеристик взаимоотношений с выбранным поставщиком, поэтому увеличение результирующего признака будет считаться отрицательным фактором в сфере взаимоотношений ООО «Grandmotors» и соответствующим контрагентом.

Составим математическую модель решения задачи по определению степени влияния отмеченных выше факторов на изменение логистических издержек рассматриваемого предприятия. Применительно к заданным условиям работы в качестве результирующих параметров принимаем величины относительного изменения некоторых логистических издержек (%) при организации доставки товара от выбранного поставщика.

Введем следующие обозначения:

У1 – относительное изменение затрат на закупку продукции, %;

- У2 – относительное изменение расходов по оформлению заказов товара у поставщика, %;
У3 – относительное изменение расходов на хранение складских запасов, %;
У4 – относительное изменение издержек на вложенный капитал, %;
У5 – относительное изменение издержек, связанных с невыполнением поставщиком своих обязательств, %.

В качестве факторов, влияющих на изменение величины логистических издержек приняты следующие признаки:

- Х1 – изменение цены продукции от выбранного поставщика, %;
Х2 – изменение надежности поставки, %;
Х3 – изменение качества поставляемой продукции, %.

Таким образом в общем виде получаем 5 уравнений регрессии (методика отражена в трудах нескольких зарубежных ученых):

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_{01} + a_{11} \cdot X_1 + a_{21} \cdot X_2 + a_{31} \cdot X_3; \\ Y_2 &= a_{02} + a_{12} \cdot X_1 + a_{22} \cdot X_2 + a_{32} \cdot X_3; \\ Y_3 &= a_{03} + a_{13} \cdot X_1 + a_{23} \cdot X_2 + a_{33} \cdot X_3; \\ Y_4 &= a_{04} + a_{14} \cdot X_1 + a_{24} \cdot X_2 + a_{34} \cdot X_3; \\ Y_5 &= a_{05} + a_{15} \cdot X_1 + a_{25} \cdot X_2 + a_{35} \cdot X_3; \end{aligned} \quad (8)$$

где Y – результативный параметр, определяющий логистические издержки при организации процесса доставки товара от поставщика в адрес рассматриваемого мультимодального сервисного центра;

X_1, X_2, X_3 – факторные признаки, характеризующие соответственно цену, качество поставляемой продукции, надежность поставок.

Обсуждение результатов. Сущность эксперимента заключается в следующем. Проводим ряд опытов, а именно принимаем разные значения факторов X и наблюдаем за изменением параметра Y . После этого с использованием метода корреляционно-регрессионного анализа находим коэффициенты a в уравнениях регрессии. Далее оцениваем значимость полученных результатов и делаем соответствующие выводы.

Обработка результатов моделирования осуществлялась в автоматизированном режиме с помощью стандартных программ. Уравнения регрессии могут принимать различные формы: линейную, квадратичную, экспоненциальную и др. В основе расчетов заложены данные по доставкам товара от разных поставщиков в адрес ООО «Grandmotors». Для построения уравнения регрессии использованы результаты 100 поставок в течение 2-х лет. Подробно использование метода корреляционно-регрессионного анализа рассмотрим на примере расчета фактора Y_1 . При анализе влияния факторных признаков на результативный Y_1 , получено уравнение регрессии:

$$Y_1 = 0,04667 + 0,1827 X_1 + 0,0773 X_2 + 0,034 X_3, \quad (9)$$

При проверке значимости данного уравнения по критерию Фишера [5], получили, что $F_{\text{рас.}} > F_{\text{табл.}}$.

Поскольку фактическое значение $F_{\text{рас.}} > F_{\text{табл.}}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно. Необходимость такой оценки связана с тем, что не каждый фактор, вошедший в модель, может существенно увеличить долю объясненной вариации результативного признака. Это может быть связано с последовательностью вводимых факторов (т. к. существует корреляция между самими факторами). По максимальному коэффициенту уравнения регрессии делаем вывод, что наибольшее влияние на результат Y оказывает фактор X_1 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 99.98% общей вариабельности Y объясняется изменением факторов X_j . Установлено также, что парамет-

ры модели статистически значимы. Для других результативных признаков получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_2 = 0,9483 + 0,08571X_1 + 0,4806X_2 + 0,4755X_3$$

$$Y_3 = 0,8514 + 0,4459X_1 + 0,729X_2 + 0,635X_3$$

$$Y_4 = 0,812 + 0,096X_1 + 0,344X_2 + 0,532X_3$$

$$Y_5 = 0,734 + 0,5689X_1 + 0,4012X_2 + 0,369X_3$$

Данные уравнения проверены аналогичным образом, что и результативным признаком Y_1 . Проверка показала статистическую значимость полученных уравнений.

Оценка тесноты связи между факторами находилась с помощью коэффициентов корреляции $r_{x_i, x_{i+1}}$. В случае больших значений $r_{x_i, x_{i+1}}$ один из факторов может быть исключен из анализа, так как результативный признак от этого меняется незначительно [5,6,7].

Теснота связи между результативным и всеми факторными признаками, включенными в уравнение регрессии, оценивалась совокупным коэффициентом множественной корреляции $R_{y x_1 x_2 x_3}$, рассчитанный как корень квадратный из коэффициента множественной детерминации $R^2_{y x_1 x_2 x_3}$. Последний показывает долю дисперсии результативного фактора, обусловленную влиянием исследуемых факторов.

Однако необходимо подчеркнуть, что факторов, на основании которых в реальной практической деятельности происходит выбор поставщика достаточно много. В работе взято всего три. В этой связи использование полученных уравнений регрессии позволяет сделать некий первичный выбор поставщиков тех или иных материальных ресурсов, т.е. отсеять из рассмотрения заведомо не удовлетворяющих данным критериям.

Вывод. Перечислены основные стратегии и решения системы SRM, а также уделено внимание современным методам и концепциям управления закупками применительно к заданным условиям работы. Приведен примерный состав показателей, с помощью которого предлагается оценивать эффективность планирования в цепях поставок для заданных условий работы. Проведены экспериментальные исследования эффективной модели управления цепи поставок методом экспертных оценок с учетом утвержденного Регламента.

Использование полученных уравнений регрессии предполагает следующий механизм проведения анализа работы с выбранным поставщиком: определяются значения всех факторных признаков для каждого поставщика по формулам (8); полученные значения факторных признаков подставляются в уравнение регрессии (9); после определения значений результирующего фактора для дальнейшего взаимодействия выбирается тот поставщик, работа с которым обеспечивает минимальную величину относительных логистических издержек рассматриваемого предприятия.

Разработанные рекомендации, направленные на совершенствование управления цепями поставок материально-технического обеспечения транспортной системы логистическими методами, апробированы в условиях работы мультимодального сервисного центра ООО «Grandmotors».

Библиографический список:

1. Логистика и управление цепями поставок : учебник для академического бакалавриата. Под ред. В.В.Щербакова. - М.:Издательство Юрайт, 2019 -582 с.
2. Логистика и управление цепями поставок. Теория и практика. Учебник. - М.: Проспект, 2015. - 224 с.
3. Логистика и управление цепями поставок. Учебник. - М.:Юрайт, 2015.592 с.
4. Проценко О. Д. Логистика и управление цепями поставок - взгляд в будущее. Макроэкономический аспект /- М.: Издательский дом "Дело" РАНХиГС, 2015. - 192 с.
5. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М., «Легкая индустрия», 1974
6. Вознесенский В.А. Статистические методы планирование эксперимента в технико- экономических исследованиях. М.,Статистика, 1974
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшее образование, 2007г.

8. Мамедов Н.Г. Логистический подход в управлении цепями поставок. 1 International scientific and practical conference. Баку, БМУ, -02-05 Oktyabr 2018, ст. 293-297.
9. Афанасьева Н.В. Управление процессом снабжения на предприятии. М.: Инфра-М, 2011. - 342 с.
10. Бауэрсокс Доналд Дж. Логистика. Интегрированная цепь поставок. - М.: Олимп-Бизнес, 2017. - 964 с.
11. Бережной В.И. Методы и модели логистического подхода к управлению автотранспортным предприятием. Ставрополь: Ставроп. гос. техн. ун-т, «Интеллект-сервис», 1997. — 277 с.
12. Герами В.Д. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. Д. Герами, А. В. Колик. М. : Издательство Юрайт, 2018. 438 с.
13. Джонсон Дж. и др. Современная логистика. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.
14. Джиллингем М., Лайсонс К. Управление закупочной деятельностью и цепью поставок. Инфра-М, 2014. 816 с.
15. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л.Б. Миротин, А.В. Бульба, В.А. Демин. - М.: Феникс, 2009. - 416 с.
16. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие для вузов / под ред. проф. В.С. Лукинского. – СПб.: Изд-во Питер, 2003. – 176 с. 5.
17. Пузанова И.А. Интегрированное планирование цепей поставок. М.:ЮРАЙТ, 2014г.
18. Шехтер Дэймон. Логистика. Искусство управления цепочками поставок / Дэймон Шехтер , Гордон Сандер. - М.: Претекст, 2018. - 240 с.
19. Рудзки Р.Э. Эффективное снабжение: Простые и надежные способы снижения издержек и повышения прибыли / Р.Э. Рудзки; пер. с англ. С.В. Кривошеин; науч. ред. Д.Л. Бенько. Минск: Гревцов Паблишер, 2008. 304 с.
20. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок: пер.с англ. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.с.73
21. Хэндфилд Р., Николс.мл. Э. Реорганизация цепей поставок. Создание интегрированных систем формирования ценности: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. - 406 с.

References:

1. Logistics and supply chain management: a textbook for the academic baccalaureate. Ed. by Shcherbakov V.V. M.: Yurayt Publishing, 2019; 582 (In Russ)
2. Logistics and supply chain management. Theory and practice. Textbook. Moscow: Prospect, 2015; 224. (In Russ)
3. Logistics and supply chain management. Textbook. M.: Yurayt, 2015; 592. (In Russ)
4. Protsenko O.D. Logistics and supply chain management - a look into the future. Macroeconomic aspect. M.: Delo Publishing House, RANEPa, 2015; 192. (In Russ)
5. Tikhomirov V.B. Experimental design and analysis. M.: Legkaya Industriya, 1974. (In Russ)
6. Voznesensky V.A. Statistical methods of experimental design in technical and economic research. M., Statistika, 1974. (In Russ)
7. Gmurman V.Y. Probability theory and mathematical statistics. M.: Vyssheye Obrazovaniye, 2007. (In Russ)
8. Mammadov N.H. Logistic approach in supply chain management. 1 International scientific and practical conference. Baku, BMU, October 02-05, 2018; 293-297. (In Russ)
9. Afanasieva N.V., Management of the supply process at the enterprise. M.: Infra-M, 2011; 342.
10. Bowersox Donald J. Logistics. Integrated supply chain. M.: Olymp-Business, 2017; 964.
11. Berezhnoy V.I. Methods and models of the logistic approach to the management of a motor transport enterprise. Stavropol: Stavrop. state tech. un-t, "Intellect-service", 1997; 277.
12. Gerami V. D. Management of transport systems. Transport supply at logistics: textbook and workshop for academic undergraduate students / Gerami V. D., Kolik A. V. M.: Yurayt Publishing House, 2018; 438.
13. Johnson J. et al. Modern logistics. M.: Williams Publishing House, 2005.
14. Gillingham M. and Lysons K., Purchasing and supply chain management. M.: Infra-M, 2014; 816.
15. Mirotin L.B. Logistics, technology, design of warehouses, transport hubs and terminals / Mirotin L.B., Bulba A.V. Demin V.A. M.: Phoenix, 2009; 416.
16. Models and methods of the theory of logistics: textbook. manual for universities / ed. prof. Lukinsky V.S.. St. Petersburg: Publishing House Peter, 2003; 176.
17. Puzanova I.A. Integrated supply chain planning. M.: URAIT, 2014.
18. Shechter Damon, Gordon Sander. Logistics. The Art of Supply Chain Management., M.: Pretext, 2018; 240.
19. Rudzki R.E. Efficient supply: Simple and reliable ways to reduce costs and increase profits / R.E. Rudzki; per. from English. S.V. Krivoshein; scientific ed. D.L. Benko. Minsk: Grevtsov Publisher, 2008; 304.
20. Waters D. Logistics. Supply chain management: translated from English. M.: UNITY-DANA, 2003;73
21. Handfield R., Nichols Jr. E. Reorganization of supply chains. Creation of integrated value formation systems.: Per. from English. M.: Publishing house "William", 2003; 406.

Сведения об авторе.

Мамедов Нами́к Гамиду́лла оглы, кандидат технических наук, старший специалист по закупкам, докторант, mammadov1980@gmail.com

Information about the author.

Namig H. oglu Mamedov, Cand.Sci. (Eng.), senior procurement specialist, doctoral student; mammadov1980@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11.07.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 02.09.2022.

Принята в печать / Accepted for publication 02.09.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-91-103

Оригинальная статья /Original Paper

Методический подход к количественной оценке рисков реализации угроз
несанкционированного доступа к информационному ресурсу

автоматизированных систем органов внутренних дел

Т.В. Мещерякова¹, Е.А. Rogozin¹, А.О. Ефимов¹, В.Р. Романова¹, С.А. Коноваленко²

¹ Воронежский институт МВД России,

¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

² Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко,

²350063, г. Краснодар, ул. Красина, 4, Россия

Резюме. Цель. Характерной особенностью современного этапа развития сферы информатизации органов внутренних дел (ОВД) является значительный рост объема и многообразия видов служебной информации ограниченного распространения, хранящейся, обрабатываемой и передаваемой в автоматизированных системах (АС). Это порождает возникновение большого количества и расширение номенклатуры угроз безопасности информации, в первую очередь – угроз, связанных с несанкционированным доступом (НСД) к информационному ресурсу АС ОВД, и вызывает необходимость совершенствования имеющихся способов борьбы с данным видом преступлений для обеспечения информационной безопасности объектов информатизации ОВД. Для получения информации, позволяющей оценивать степень угроз, необходимо провести количественную оценку рисков. **Метод.** Метод оценки рисков реализации угроз несанкционированного доступа к информационному ресурсу АС ОВД и получения данных в количественном представлении основывается на использовании методов математического моделирования. Преимущество количественной оценки по сравнению с качественной оценкой заключается в возможности сопоставления рисков с конечным результатом, который можно представить в денежном эквиваленте, и дальнейшего использования при оценивании вероятности реализации информационных угроз и расчете нанесенного ущерба. **Результат.** Предложен методический подход к количественной оценке рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД, позволяющий оценивать уровень защищенности служебной информации. **Вывод.** Предложенный методический подход к количественной оценке рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД дает наглядное представление в денежном эквиваленте по объектам оценки (ущербу, затратам). Данные расчеты можно использовать при обосновании требований к уровню защищенности АС ОВД при их разработке и эксплуатации.

Ключевые слова: автоматизированная система, риск, несанкционированный доступ, угроза, защита информации

Для цитирования: Т.В. Мещерякова, Е.А. Rogozin, А.О. Ефимов, В.Р. Романова, С.А. Коноваленко. Методический подход к количественной оценке рисков реализации угроз несанкционированного доступа к информационному ресурсу автоматизированных систем органов внутренних дел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):91-103. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-91-103

Methodical approach to quantitative assessment of the risks of the implementation of threats
unauthorized access to an information resource automated systems of internal
affairs bodies

T.V. Meshcheryakova¹, E.A. Rogozin¹, A.O. Efimov¹, V.R. Romanova¹, S.A. Konovalenko²

¹Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

¹53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,

² General of the Army S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military School,
4 Krasina Str., Krasnodar 2350063, Russia

Abstract. Objective. A characteristic feature of the current stage of development of the sphere of informatization of internal affairs bodies (OVD) is a significant increase in the volume and variety of types of service information of limited distribution, stored, processed and transmitted in automated systems (AS). This gives rise to the emergence of a large number and expansion of the range of threats to information security, primarily threats associated with unauthorized access (UAS) to the information resource of the ATS AS, and necessitates the improvement of existing methods to combat this type of crime in order to ensure the information security of objects of informatization of ATS. To obtain information that allows assessing the degree of threats, it is necessary to conduct a quantitative risk assessment. **Method.** The method for assessing the risks of implementing threats of unauthorized access to the information resource of the ATS AS and obtaining data in a quantitative representation is based on the use of mathematical modeling methods. The advantage of a quantitative assessment compared to a qualitative assessment is the ability to compare risks with the final result, which can be represented in monetary terms, and further use in assessing the likelihood of information threats and calculating the damage caused. **Result.** A methodical approach to the quantitative assessment of the risks of the implementation of UA threats to the information resource of the ATS AS is proposed, which makes it possible to assess the level of security of service information. **Conclusion.** The proposed methodological approach to quantitative assessment of the risks of the implementation of UA threats to the information resource of the ATS AS provides a visual representation in monetary terms of the objects of assessment (damage, costs). These calculations can be used to justify the requirements for the level of security of ATS ASs during their development and operation.

Keywords: automated system, risk, unauthorized access, threat, information security

For citation: T.V. Meshcheryakova, E.A. Rogozin, A.O. Efimov, V.R. Romanova, S.A. Konovalenko. Methodical approach to quantitative assessment of the risks of the implementation of threats unauthorized access to an information resource automated systems of internal affairs bodies. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3):91-103. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-91-103

Введение. В эпоху развития информационных технологий особое внимание уделяется обеспечению необходимого уровня защищенности служебной информации ограниченного распространения, циркулирующей на объектах информатизации ОВД, от угроз, связанных с НСД к информационным ресурсам. Согласно руководящему документу Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России «Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения» НСД представляет собой доступ к информации, нарушающий правила разграничения доступа с использованием штатных средств, предоставляемых средствами вычислительной техники, или АС [1]. Ссылаясь на ГОСТ Р 50922-2006. «Защита информации. Основные термины и определения», под информационной угрозой понимается совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации [2].

Для минимизации угроз и проведения оценки рисков их реализации в АС ОВД необходимо определить вид потенциальных угроз:

- угрозы доступа (проникновения) в операционную среду компьютера с использованием штатного программного обеспечения (средств операционной системы или прикладных программ общего применения);
- угрозы создания нештатных режимов работы программных (программно-аппаратных) средств за счет преднамеренных изменений служебных данных, игнорирования предусмотренных в штатных условиях ограничений на состав и характеристики обрабатываемой информации, искажения (модификации) самих данных и т.п.;
- угрозы внедрения вредоносных программ (программно-математического воздействия).

Постановка задачи. Настоящее время характеризуется бурным ростом информационных технологий в различных сферах деятельности, что в полной мере относится и к сфере ин-

форматизации ОВД. С каждым днем увеличивается объем служебной информации ограниченного распространения, являющейся основным ресурсом для решения поставленных оперативно-служебных задач.

В МВД РФ обеспечение высокого уровня защищенности АС министерского назначения является приоритетным направлением ОВД, эксплуатирующих систему. Основой при определении требований к защищенности АС ОВД являются международные и стандарты РФ по информационной безопасности (ИБ) АС, такие как, ГОСТ Р 51583-2014, ГОСТ ИСО/МЭК-Р 15408-2013. Так же на объектах информатизации ОВД нашли применение приказы МВД России, приказ от 14.03.2012 №169. Проведенный анализ нормативных актов показал, что одной из главенствующих задач при эксплуатации защищенных АС ОВД является количественная оценка эффективности систем защиты информации (ЗИ) при разработке и эксплуатации АС ОВД, после которой можно выбрать наилучшую систему защиты.

Важнейшим этапом построения любой АС ОВД должен стать анализ рисков реализации угроз ИБ, который поможет верно определить условия и факторы, влияющие на нарушение целостности, конфиденциальности и доступности циркулирующей в системе информации, и оценить потенциальную опасность информационных угроз. Грамотная оценка уязвимостей АС ОВД и рисков реализации возможных угроз НСД к информационному ресурсу послужит основой для оптимизации принятия решений по защите служебной информации ограниченного распространения с учетом необходимых затрат.

Методы исследования. Под защищенностью АС ОВД согласно ГОСТ Р 50922-2006 понимается возможность предотвращать НСД, при этом система должна сохранять возможность функционирования по своему прямому назначению [2]. Проведение оценки защищенности предназначено для определения степени адекватности реализованных в ней систем и средств ЗИ, имеющихся в данной среде функционирования рискам [2].

В Руководящем документе ФСТЭК 2004 [7] определена общая методика проведения оценки защищенности АС ОВД.

Процесс оценки защищенности АС ОВД состоит из подготовки к проведению и непосредственно проведения оценки защищенности АС ОВД [7].

Проведение оценки защищенности АС ОВД предусматривает подготовку исходных данных, необходимых для оценки, включающих: документирование описания АС ОВД; категорирование АС ОВД; идентификацию угроз безопасности для АС ОВД; определение показателей, по которым будет проводиться оценка АС ОВД; определение состава участников проведения оценки защищенности; предоставление исходных данных для оценки уровня защищенности АС [7].

Практическая оценка защищенности АС ОВД включает в себя четыре этапа [7].

Первый является предварительным этапом, который связан с анализом достаточности материалов для оценки, оценкой предъявленных к АС ОВД требований безопасности информации, определением способов оценки.

Вторым этапом является оценка безопасности АС ОВД.

На третьем этапе выполняется подтверждение соответствия АС ОВД требованиям безопасности информации.

Четвертым этапом оценки защищенности является поддержка доверия к безопасности АС ОВД.

Методика оценки защищенности АС ОВД согласно требованиям Руководящего документа Гостехкомиссии от 19.06.2002 №187 предназначена для оценки параметров безопасности продуктов и систем информационных технологий [8]. Методический документ ФСТЭК 2015 года «Методика выявления НСД в АС» определяет показатели, характеризующие проектную защищенность информационной системы [9].

Рассмотренные выше нормативные правовые акты показывают, что оценка защищенно-

сти АС ОВД строится на основе определенного класса защиты АС ОВД. Также рассмотренные документы не предусматривают проведение количественной оценки защищенности информации.

Для выбора мер и средств защиты информации необходимо грамотно и в полной мере оценить возможные риски нарушения информационной безопасности АС ОВД от реализации угроз НСД.

Существуют различные способы оценки рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД, которые можно объединить в два основных взаимно дополняющих друг друга вида – качественная оценка и количественная оценка.

Главной задачей качественной оценки рисков является выявление факторов риска, этапов работы АС ОВД, при выполнении которых возникает риск, установление потенциальных областей риска, после чего определяются все возможные риски, требующие устранения для оптимальной работы АС ОВД. Качественная оценка включает в себя также рассмотрение методологического подхода к количественной оценке приемлемого уровня риска. При необходимости получения конечных данных, выраженных в денежном эквиваленте, временных ресурсах, процентах или иной количественной информации, применяется количественная оценка рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД, позволяющая получить конкретные значения объектов оценки рисков путем проведения аналитических расчетов.

Количественная оценка подразумевает присвоение конкретных значений для получения выходной информации в количественном представлении. Алгоритмы, обеспечивающие получение выходных значений, должны быть четкими и понятными. Объектом оценки могут стать такие данные, как вероятность наступления угрозы, размер ущерба от реализации угрозы, стоимость мер защиты информации в АС ОВД и др.

Основная цель обоих методов состоит в выявлении предполагаемых угроз НСД к информационному ресурсу, а также выбор эффективных мер и средств защиты служебной информации в АС ОВД. Каждый метод оценки рисков имеет свои преимущества и недостатки.

Использование количественного метода позволяет рассчитывать стоимость ущерба от реализации угроз, однако он более трудоемок по сравнению с качественным методом. Проведение качественной оценки рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД сократит время оценивания, однако повысит степень субъективизма полученного результата. Использование качественного метода не подразумевает под собой конкретных выходных данных, что не даст наглядного понимания размеров причиненного ущерба. Для получения более точного выходного значения объекты оценки должны содержать реальные данные и быть представленными в удобном для анализа виде.

Обсуждение результатов. Для оценки риска реализации любой угрозы информационной безопасности АС ОВД необходимо определить и описать компоненты (факторы риска), используемые в качестве входных данных, способные повлечь за собой нарушение конфиденциальности информации, ее целостности и доступности.

Типовые факторы риска включают в себя: угрозы; уязвимости; негативное влияние; вероятность; предварительные условия. Основные элементы процесса оценивания информационной безопасности объекта информатизации представлены на рис. 1.

Источником угрозы нарушения безопасности информации может стать как целенаправленное действие с целью завладения служебной информацией ограниченного распространения и дальнейшего ее использования, так и ненамеренное действие, причиной которого является недоработка (неверная эксплуатация) АС ОВД, позволяющая инсайдеру воспользоваться уязвимостью.

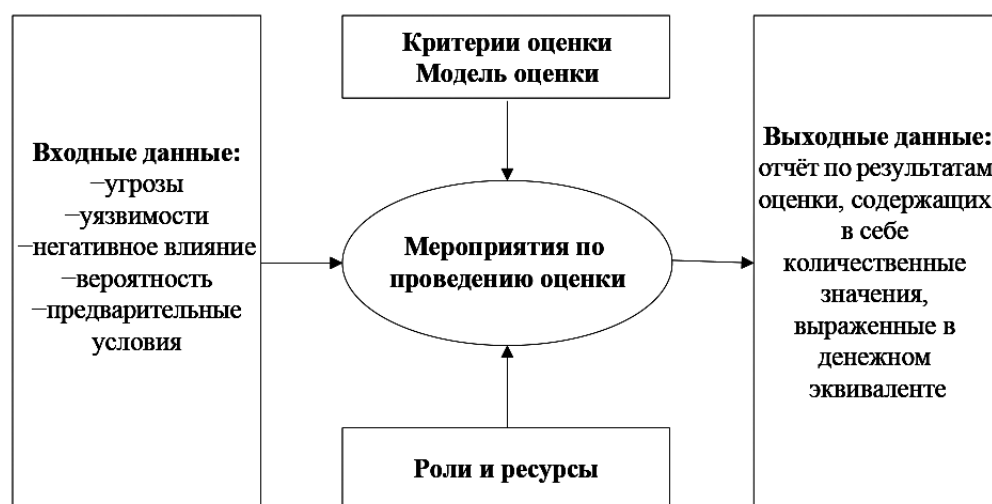


Рис. 1. Основные элементы проведения оценки информационной безопасности объекта информатизации

Fig. 1. The main elements of the information security assessment of the informatization object

От точности построения модели рисков, от грамотного описания всех факторов риска зависит детализация определения событий угроз. Детальное рассмотрение различных моделей рисков позволит построить сценарии угроз, включающие совокупность нескольких событий угроз, в результате которых наступает негативный эффект, относящийся к определенному источнику угрозы или к их совокупности.

Уязвимостью считается недостаток (слабость) программного (программно-технического) средства или информационной системы в целом, который (ая) может быть использован (а) для реализации угроз безопасности информации [3]. Степенью опасности уязвимости приятно считать меру (сравнительную величину), характеризующую подверженность АС уязвимости и ее влияние на нарушение свойств безопасности информации (конфиденциальности, целостности, доступности) [3].

В большинстве своем, уязвимости возникают из-за применения намеренных действий по получению служебной информации, либо ненамеренных действий, связанных с недоработкой или неправильной эксплуатацией АС ОВД. При этом важно учитывать не только эволюцию информационной среды, но и совершенствование способов деструктивного воздействия злоумышленника, что требует обеспечения соответствующей защиты информационных ресурсов АС ОВД.

Негативное влияние события угрозы подразумевает под собой размер ущерба, возникающего от реализации угроз НСД, например получение доступа к информации, ее изменение, утеря и недоступность.

Явным образом определяют: процесс, используемый для определения негативного влияния; предположения, используемые для определения негативного влияния; источники и методы получения информации о негативном влиянии; логическое обоснование, использованное для определения негативного влияния.

Вероятность возникновения информационной угрозы, связанной с НСД, является важным фактором при оценке рисков. Она подразумевает под собой рассчитываемый аналитически фактор риска, связанный с эксплуатацией определенной уязвимости (совокупности уязвимостей), определенной угрозой с учетом вероятности причинения угрозой реального ущерба.

На основании вышесказанного входные данные можно описать в виде логической структуры, которая является основой для получения интересующей информации, выраженной в количественном представлении: источник угрозы с определенной долей вероятности провоцирует определенную угрозу, которая эксплуатирует уязвимость, следствием чего является создание негативного влияния, порождающего риск. Мероприятия по проведению оценки рисков

реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД могут быть осуществлены с помощью внутреннего и внешнего аудита. Аудит информационной безопасности подразумевает под собой систематический, независимый и документируемый процесс получения свидетельств деятельности организации по обеспечению информационной безопасности и установлению степени выполнения в организации критериев информационной безопасности, а также допускающий возможность формирования профессионального аудиторского суждения о состоянии информационной безопасности организации [6]. Различные типы аудита представлены в табл. 1.

Таблица 1. Различные типы аудита информационной безопасности
Table 1. Different types of information security audit

Аудит первой стороны First party audit	Аудит второй стороны Second party audit	Аудит третьей стороны Third party audit
Внутренний аудит Internal audit	Аудит внешнего поставщика External supplier audit	Аудит для сертификации и/или аккредитации Audit for certification and/or accreditation
	Аудит другой внешней заинтересованной стороны Audit of another external stakeholder	Аудит соблюдения законодательства, нормативных правовых требований и аналогичных целей Audit of compliance with legislation, regulatory legal requirements and similar purposes

Необходимыми условиями обеспечения достоверной оценки информационной безопасности при проведении аудита являются: использование доверенного процесса аудита; использование наиболее достоверных источников оценки; определение объема выборки с учетом заданной достоверности оценки; учет факторов, влияющих на аудиторский риск, с целью его снижения. Доверенный процесс аудита информационной безопасности должен отвечать требованиям принятого нормативного документа, описывающего данный процесс.

Критерии оценки, служащие критическими элементами для измерения объекта оценки должны быть представлены в удобном для анализа виде с целью получения на выходе данных, отражающих степень риска реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД в числовом виде.

Основой модели оценки процесса аудита информационной безопасности служит совокупность показателей, являющихся базовыми для сбора объективных данных. С помощью данных, полученных в результате анализа входных параметров, можно последовательно сформировать суждения по оценке анализа, а также повысить эффективность полученных результатов.

Показатели позволяют оценивать степень реализации процессов объекта оценки. Модель оценки процесса аудита с наибольшим числом входных параметров обеспечивает более глубокий анализ, что позволит получить максимально приближенный к действительности результат. Однако такой анализ требует значительного увеличения ресурсов.

Каждый процесс характеризуется входными параметрами, выходными данными (результатом), управляющими воздействиями и ресурсами. Состояние любого процесса отображается совокупностью параметров процесса оценки, входных параметров, параметров управления, параметров ресурсов и выходных параметров.

Для проведения оценки функционирования процессов каждый из них должен быть представлен совокупностью параметров, требуемых для функционирования процессов в соответствии с их назначением. При соблюдении всех условий на выходе можно получить данные, которые помогут: оценить в количественном выражении потенциальный ущерб от реализации каждой угрозы; определить вероятность реализации каждой из угроз информационной безопасности АС ОВД; определить общий потенциальный ущерб от каждой угрозы за контрольный период; провести анализ полученных данных по ущербу для каждой угрозы.

Анализ угроз безопасности информации имеет целью установление того, каким способом существует возможность нарушения конфиденциальности (копирование, неправомерное распространение), целостности (уничтожение, изменение) или доступности (блокирование) информации, содержащейся в АС ОВД. Результат воздействия НСД показан на рис. 2:

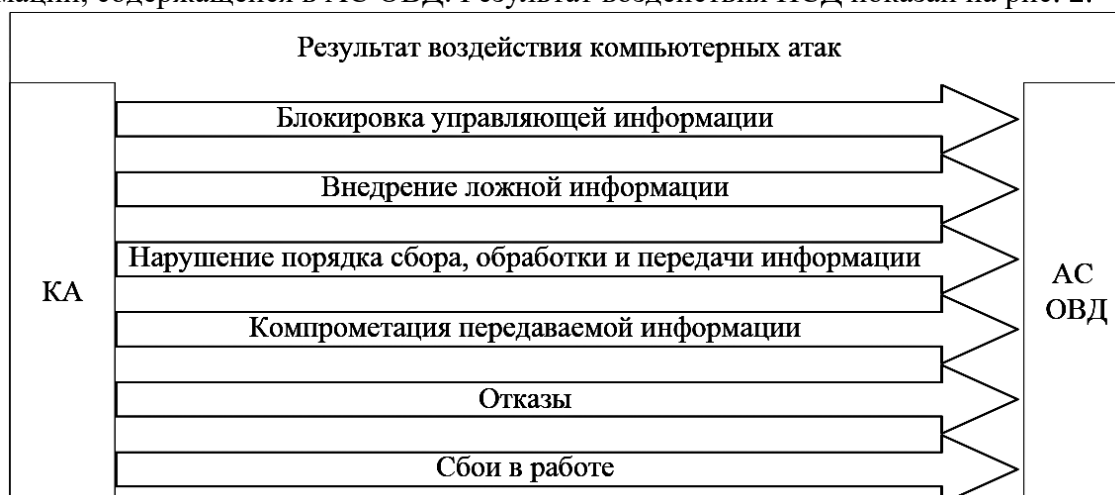


Рис. 2. Результат воздействия НСД на информационный ресурс АС ОВД

Fig. 2. The result of the impact of NSD on the information resource of the ATS AS

По способу воздействия компьютерные атаки делятся на сетевые и протокольные. По целевому назначению основные типы компьютерных атак представлены на рис. 3 [10]:



Рис. 3. Типы компьютерных атак на АС ОВД

Fig. 3. Types of computer attacks on ATS automated systems

На основе проведенного анализа угроз безопасности информации АС ОВД наиболее актуальным способом в современном мире является осуществление противником компьютерных атак, воздействие которых направлено на элементы системы, поэтому дальнейшее исследование необходимо проводить исходя из условий воздействия на АС ОВД компьютерных атак.

С целью обеспечения ЗИ необходимо использовать механизмы защиты, под эффективностью применения которых понимается повышение защищенности АС ОВД за счет решения ряда частных задач. Исходя из множества задач, решаемых с целью обеспечения требуемого уровня защищенности информации, необходимо построить методику и алгоритм их решения в виде комплексной оценки защищенности. Для этого строится следующий пошаговый алгоритм действий.

Шаг 1. Задаются исходные данные, начальные и конечные условия:

- количество элементов АС ОВД, подверженных воздействию компьютерных атак – N;
- наличие реализованных средств ЗИ;
- описание угроз безопасности информации, уязвимостей и реализованных средств ЗИ в АС ОВД.

Шаг 2. В соответствии с установленными средствами ЗИ, осуществляющими ограничи-

тельные действия злоумышленнику, целью противоправных действий которого являются нарушение функционирования АС ОВД, определяются типы возможных инцидентов, возникающих в результате действия злоумышленника, и на основе имеющихся уязвимостей, определяется связь уязвимостей АС ОВД, инцидентов и необходимых мер ЗИ.

Шаг 3. В соответствии с возможностями злоумышленника, возникающими в результате их действий инцидентами, выбирается комплекс организационных и технических мероприятий по предотвращению неправомерных действий злоумышленником, соответствующий каждому отдельно взятому инциденту [11].

Шаг 4. Определяется критерий эффективности для оценки защищенности АС ОВД.

$$J = \min_{\max} \left\{ \begin{matrix} Q \\ E \\ R \\ O \\ D \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где Q – эффективность АС ОВД; E – точность АС ОВД; R – надежность АС ОВД; O – быстродействие; D – затраты ресурсов.

Ввиду невозможности определения универсального критерия оценки эффективности в связи с различными условиями эксплуатации АС ОВД, а также неопределенностью, связанной с действиями внешней среды целесообразно учитывать ряд особенностей при его формировании. Так, предлагается общий подход к построению критерия, который основывается на следующих предположениях:

1. В каждом конкретном случае эксплуатации АС ОВД необходимо предавать конкретный вес соответствующему критерию. Для различных условий эксплуатации АС ОВД и воздействий внешней среды экспертным путем определены соответствующие решаемым задачам значения критериев методом анализа иерархий (табл. 2);

Таблица 2. Значения критериев
Table 2. Criteria values

№ п/п	Q	E	R	O	D
1	0,3	0,08	0,1	0,27	0,25
2	0,16	0,32	0,17	0,29	0,06
3	0,14	0,08	0,11	0,36	0,31
4	0,42	0,27	0,23	-	0,08

2. В условиях неопределенности действия злоумышленника на АС ОВД следует распределить показатели по группам и формировать их исходя их цели выполнения задач.

Исходя из вышесказанного, для оценки защищенности АС ОВД целесообразно в качестве основных критериев выбрать быстродействие и затраты ресурсов, характеризующих с одной стороны скорость выполнения необходимых для оценки защищенности операций, а с другой стороны, затраченные на это ресурсы.

Правильный выбор оптимальных значений критериев позволит гарантированно осуществить оценку защищенности АС ОВД в условиях отсутствия полной достоверной информации о предполагаемых действиях злоумышленника.

Поиск оптимального соотношения критериев осуществляется по следующей схеме:

$$\left. \begin{matrix} O \rightarrow \max \\ D = D_{opt} \end{matrix} \right\} \text{ при } D_{opt} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где D_{opt} – допустимые затраты ресурсов.

Шаг 5. Определяется вектор ограничений, характеризующийся условиями применимости методики. Так как основными функциями эксплуатируемой АС ОВД являются учет, хранение, передача, обработка, циркулирующей в каналах связи информации и предоставление оператору донесений о виде и форме, полученной в результате ее обработки, то в работе в качестве области возможных действий противника Ω предлагается рассмотрение компьютерных атак.

$$A_{\min}(t) \leq A(t) \leq A_{\max}(t), \quad (3)$$

$$A(t) \in \Omega, \quad (4)$$

где $A(t)$ – воздействие компьютерных атак.

Шаг 6. Определяется вектор возможных действий, обеспечивающих гарантированную стратегию поиска рационального использования ресурсов в зависимости от угроз противника.

$$u(t) \in V, \quad (5)$$

где V – множество всех возможных действий, направленных против воздействия злоумышленника.

Шаг 7. В качестве показателей, характеризующих процесс оценки защищенности АС ОВД, предложено выбирать вероятности нейтрализации НСД.

$$P_{защ} = 1 - \prod_{m=1}^k P_{преод}_m, \quad (6)$$

где k – общее количество имеющихся механизмов защиты, которые нужно нейтрализовать злоумышленнику; $P_{преод}$ – вероятность преодоления НСД средств защиты.

В случае экспоненциальной аппроксимации имеющихся параметров

$$P_{преод}_m = \frac{\overline{t}_{fm}}{\overline{t}_{fm} + \overline{t}_{um}}, \quad (7)$$

где $\overline{t}_{fm}$ – среднее время между соседними изменениями параметров m -ого механизма защиты;

$\overline{t}_{um}$ – среднее время НСД m -ого механизма защиты.

Поэтому, при определении эффективности СЗИ, прежде всего, нужно найти среднее время между соседними изменениями характеристик m -ого СЗИ и ($\overline{t}_{um}$) НСД.

Для этого использовались профильные модели механизмов – в виде «Вредоносных кодов» при НСД «Ransomware», воздействующих на ППЭВМ (сервер), с установленными на них антивирусной СЗИ и метод топологических изменений случайных сетей.

Профильная модель компьютерной атаки:

- получение пакета сообщения на порт ППЭВМ (сервера), зараженными вредоносным кодом «Ransomware» за $\overline{t}_{получ}$ с функцией распределения $W(t)$;
- дефрагментация сетевой картой ППЭВМ (сервера) указанного пакета за среднее время $\overline{t}_{дефр}$ с функцией распределения $M(t)$;
- запуск сканера антивируса в оперативной памяти ППЭВМ (сервера) имеющегося пакета за $\overline{t}_{пров}$ с функцией распределения $L(t)$;
- с вероятностью P_1 преодоление антивирусной системы вредоносным кодом «Ransomware» за среднее время $\overline{t}_{скан}$ с функцией распределения $B(t)$;

– заражение ППЭВМ за среднее время $\overline{t_{зар}}$ с функцией распределения $O(t)$.
Если пакет заблокирован, то с вероятностью $(1-P_1)$ противник повторно направляет запрос за среднее время $\overline{t_{блок}}$ с функцией распределения $Z(t)$.

Требуется определить интегральную функцию распределения вероятности $F(t)$ и среднее время $\overline{T}$ преодоления антивирусной системы.

Описанный выше процесс представлен в виде стохастической сети (рис. 4):

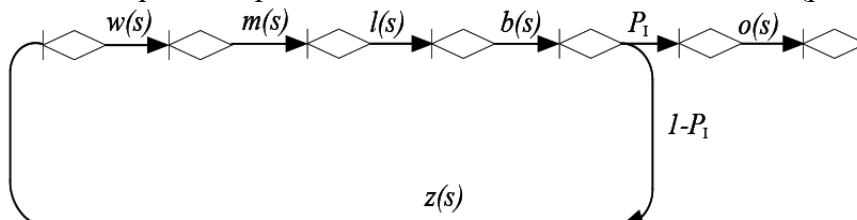


Рис. 4. Стохастическая сеть компьютерной атаки вида «Вредоносные коды» при реализации способом «Ransomware»

Fig. 4. Stochastic network of a computer attack of the "Malious codes" type when implemented using the "Ransomware" method

Расчетные выражения для интегральной функции распределения вероятности и среднего времени реализации компьютерной атаки [12],

$$F(t) = \sum_{k=1}^6 \frac{w \cdot m \cdot l \cdot b \cdot P_1 \cdot o \cdot (z + s_k)}{\varphi'(s_k)} \cdot \frac{1 - \exp[s_k t]}{-s_k}, \quad (8)$$

$$\overline{T} = \sum_{k=1}^6 \frac{w \cdot m \cdot l \cdot b \cdot P_1 \cdot o \cdot (z + s_k)}{\varphi'(s_k)} \cdot \frac{1}{(-s_k)^2}. \quad (9)$$

Результаты расчетов вероятностно-временных характеристик представлены на рис. 5, 6. В качестве исходных данных используются следующие значения:

$\overline{t_{получ}} = 8$ мин, $\overline{t_{дефр}} = 8$ мин, $\overline{t_{пров}} = 8$ мин, $\overline{t_{скан}} = 8$ мин, $\overline{t_{блок}} = 8$ мин, $\overline{t_{повт}} = 1$ мин, $P_1 = 0,1 \dots 0,9$.

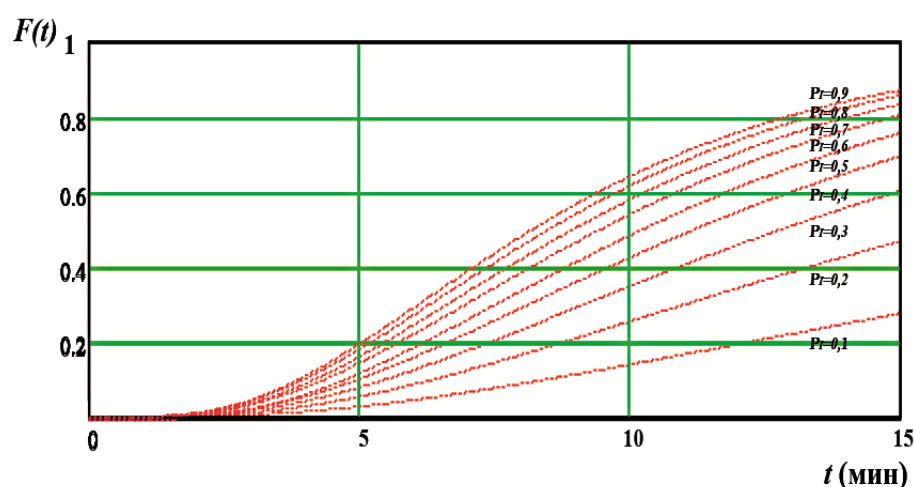


Рис. 5. Зависимость интегральной функции распределения вероятности от времени преодоления антивирусной системы

Fig. 5. Dependence of the integral probability distribution function on the time to overcome the anti-virus system

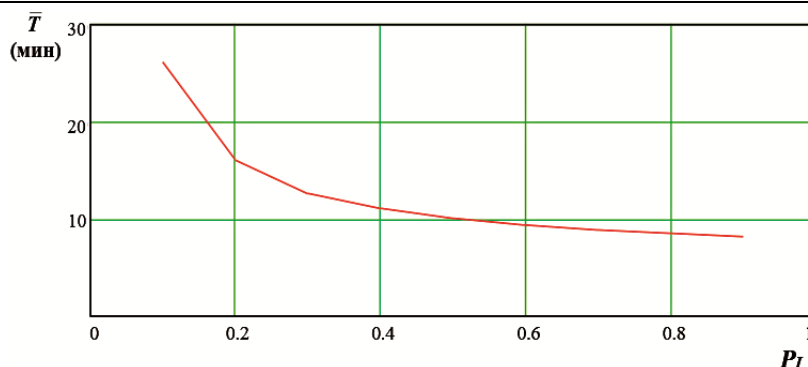


Рис. 6. Зависимость среднего времени от вероятности преодоления антивирусной системы
Fig. 6. Dependence of the average time on the probability of overcoming the anti-virus system

Шаг 8. Для определения уровня защищенности АС ОВД, значение только коэффициента защищенности недостаточно, поэтому исходя из полученной оценки защищенности на основе вероятностей преодоления злоумышленником средств защиты, реализованных в АС, предлагается использовать вербально-числовую шкалу Харрингтона (табл. 3).

Таблица 3. Вербально-числовая шкала Харрингтона
Table 3. Harrington Verbal Number Scale

№ п/п	Содержательное описание градаций Meaningful description of gradations	Числовое значение Numeric value
1	Очень высокая Very high	08-1,0
2	Высокая High	0,64-0,8
3	Средняя Medium	0,37-0,64
4	Низкая Low	0,2-0,37
5	Очень низкая Very low	0,0-0,2

Таким образом, разработанная методика оценки защищенности позволяет определить угрозы и обосновать соответствующие им меры защиты; оценивает НСД для элементов АС ОВД и ее системы защиты в условиях информационного противоборства.

Вывод. По итогам применения предложенного методического подхода к количественной оценке рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД определяются актуальные атаки, реализация которых может подвергнуть систему нарушению безопасности обрабатываемой в ней служебной информации ограниченного распространения (нарушению ее конфиденциальности, целостности или доступности), а также нарушению функционирования самой системы.

Полученные систематизированные результаты по оценке рисков реализации информационных угроз НСД для конкретной АС ОВД выражаются в количественном представлении (числовом эквиваленте).

Обеспечение безопасного, устойчивого и надежного функционирования современных объектов информатизации ОВД является актуальной и сложной задачей, решение которой видится в проведении количественной оценки рисков реализации угроз НСД к информационному ресурсу АС ОВД в соответствии с требованиями действующей методической документации ФСТЭК России, а также директив, приказов и инструкций МВД России.

В отличие от существующих в настоящее время методов, основанных на экспертных оценках рисков, осуществление их количественной оценки позволит проводить исследования в динамическом (временном) диапазоне и разрабатывать конкретные рекомендации по повышению уровня защищенности объектов информатизации.

Библиографический список:

1. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения // М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2006. 12 с.
3. ГОСТ Р 56546–2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. 2016. 8с.
4. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации.
5. ГОСТ Р 15408–2013. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий // М.: Стандартинформ. 2014. 152 с.
6. ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. 2008. 22с.
7. Руководящий документ. Безопасность информационных технологий. Концепция оценки соответствия автоматизированных систем требованиям безопасности информации: утв. ФСТЭК России 2004 г.
8. Руководящий документ Гостехкомиссии. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий: утв. Приказом Гостехкомиссии от 19.06.2002 №187.
9. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах: утв. ФСТЭК России 2015 г.
10. Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Кудрявцев А.М., Лаута О.С. Киберустойчивость ИТКС. СПб, 2015 г.
11. Требования к защите информации, содержащейся в информационных системах общего пользования: утв. приказом ФСТЭК России от 31 августа 2010 г. №489
12. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
13. Мочалов Д.А., Вольф В.А., Романова В.Р., Рогозин Е.А., Калач А.В. Анализ существующих угроз внешнего нарушения к информационному ресурсу веб-серверов в автоматизированных системах вооруженных сил российской федерации // Вестник Воронежского института ФСИН России №1–2022. С. 68-75.
14. Коноваленко С.А., Королев И.Д. Выявление уязвимостей информационных систем посредством комбинированного метода анализа параметрических данных, определяемых системами мониторинга вычислительных сетей // Альманах современной науки и образования №11-2016. С.60-66.
15. Система защиты информации от несанкционированного доступа «Страж NT». Описание применения. URL: <http://www.rubinteh.ru/public/opis30.pdf> (дата обращения: 23.06.2022).
16. Yang N. Modeling and quantitatively predicting software security based on stochastic Petri nets / N. Yang, H. Yu, Z. Qian, H. Sun // Mathematical and Computer Modelling. — 2012. — Vol. 55. — Issues 1–2. — pp.102–112.
17. Klaic A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaic, M. Golub // Journal of Economics / Business and Management. — 2013. — vol. 1. — Issue 4. — pp. 371–376.
18. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // Information & Management. — 2015. — vol. 52. — Issue 1. — pp. 123–134.
19. Complex Event Processing Modeling by Prioritized Colored Petri Nets / H. Macià [and others] // IEEE Access. — 2016. — vol 4. — pp. 7425–7439.
20. Nikishin K. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri NET / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). — 2017. — pp. 1–5.
21. Korniyenko B.Y. Design and research of mathematical model for information security system in computer network / B.Y. Korniyenko, L.P. Galata // Science-Based Technologies. — 2017. — vol. 34. — Issue 2. — pp. 114–118.
22. White S.C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S.C. White, S.S. Sarvestani // Advances in Computers. — 2014. — vol. 94. — pp. 1–24.
23. Jasiul B. Detection and Modeling of Cyber Attacks with Petri Nets / B. Jasiul, M. Szyrka, J. Sliwa // Entropy. — 2014. — vol. 16. — Issue 12. — pp. 6602–6623.

References:

1. FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions. (In Russ)
2. GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definition. Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 2006.12 K. (In Russ)
3. GOST R 56546-2015. Information protection. Communications of information systems. Classification of information systems. 2016; 8. (In Russ)
4. 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)
5. GOST R 15408-2013. Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technologies Moscow: Standartinform. 2014;152. (In Russ)
6. GOST R 53114-2008. Information protection. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions. 2008; 22. (In Russ)
7. 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)
8. 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)

9. Methodology for determining the risk of information security in information systems: approved by FSTEC of Russia 2015 (In Russ)
10. Kotsynyak M. A., Kuleshov I. A., Kudryavtsev A.M., Laut O. S. Cyberstability of ITCS. St. Petersburg, 2015(In Russ)
11. Requirements for the protection of information contained in public information systems: approved by Order No. 489 of the FSTEC of Russia dated August 31, 2010. (In Russ)
12. Beshelev S. D., Gurvich F. G. Mathematical and statistical methods of expert assessments. *M.: Statistics*, 1980; 263. (In Russ)
13. Mochalov D. A., Wolf V. A., Romanova V. R., Rogozin E. A., Kalach A.V. Analysis of existing threats of an external intruder to the information resource of web servers in automated systems of the Armed forces of the Russian Federation. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia* 2022; 1: 68-75. (In Russ)
14. Konovalenko S.A., Korolev I.D. Identification of vulnerabilities of information systems by means of a combined method of analysis of parametric data determined by monitoring systems of computer networks. *Almanac of modern science and education* 2016; 11:60-66. (In Russ)
15. Information protection system from unauthorized access "Sentinel NT". Description of the application. Stole: <http://www.rubinteh.ru/public/opis30.pdf> (accessed: 06/23/2022). (In Russ)
16. Yang N. Modeling and quantitatively predicting software security based on stochastic Petri Nets / N. Yang, H. Yu, Z. Kian, H. Sun. *Mathematical and Computer Modeling*. 2012; 55: 1-2:102-112.
17. Klaik A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaik, M. Golob / *Journal of Economics. Business and Management*. 2013; 1 (4): 371-376.
18. Nazareth D. System dynamics model for Information security management / D. Nazareth, J. Choi. *Information & Management*. 2015; 52 (1): 123-134.
19. Complex Event Processing Modeling would be Prioritized Colored Petri Nets / H. Makià [and others]. *IEEE Access*. 2016; 4: 7425-7439.
20. Nikishin K., N. Konnov, D. Pashchenko. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri net. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (IKIEAM). 2017; 1-5.
21. Kornienko B. Y. Design and research of mathematical model for Information security system in computer network / B. Y. Kornienko, L. P. Galata. *Science-Based Technologies*. 2017; 34(2): 114-118.
22. White S. C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S. S. White, S. S. Sarvestany. *Advances in Computers*. 2014; 94:1-24.
23. Zhasiul V. Detection and Modeling of Cyber Attacks in Petri Nets / B. Zhasiul, M. Szpyrka, J. Sliva. *Entropy*. 2014; 16; 12: 6602-6623.

Сведения об авторах:

Мещерякова Татьяна Вячеславовна, доктор технических наук, начальник кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; tmeshcheriakova4@mvd.ru

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

Ефимов Алексей Олегович, адъюнкт; APMO6@yandex.ru

Романова Виктория Романовна, адъюнкт; romanovna_vika@inbox.ru

Коноваленко Сергей Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры защиты информации специальными методами и средствами; konovalenko_rcf@mail.ru

Information about authors:

Tatyana V. Meshcheryakova, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; tmeshcheriakova4@mvd.ru

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

Alexey O. Efimov, adjunct; APMO6@yandex.ru

Victoria R. Romanova, adjunct; romanovna_vika@inbox.ru

Sergey A. Konovalenko, Cand.Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Information Security by Special Methods and Means; konovalenko_rcf@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.05.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 18.06.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 18.06.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.94

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-104-115

Оригинальная статья /Original Paper

**Математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки как
предначальная стадия создания САПР сушилок нового поколения**

А.А. Хвостов¹, В.И. Ряжских¹, А.А. Шевцов², В.В.Ткач²

¹Воронежский государственный технический университет,

¹394006, г. Воронеж, ул. 20 – летия Октября, 84, Россия,

²Военный учебно–научный центр Военно–воздушных сил «Военно–воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

²394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ, проектирование установки в САПР, изготовление опытного образца, моделирование полей температур и влагосодержания. **Метод.** Математическая модель реализована численно методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics на сетке из 3678 элементов с использованием её деформирования для изменения высоты. **Результат.** На лабораторной вакуумной СВЧ – установке получены экспериментальные данные, позволившие выявить закономерности при сушке вспененных материалов. Проведен анализ параметров сушки, а также свойств исходного и высушенного материала. Выполнено проектирование с применением САПР вакуумной установки пилотного типа и изготовлен действующий прототип. Осуществлено моделирование поля температуры и зон влагосодержания в динамике процесса. **Вывод.** Математическое моделирование процесса сушки дает возможность с высокой точностью определять температурные поля и влагосодержание материала при сравнительно небольшом количестве необходимых экспериментальных данных.

Ключевые слова: проектирование, СВЧ – установка, сушка, вспененные материалы, вакуум, моделирование

Для цитирования: А.А. Хвостов, В.И. Ряжских, А.А. Шевцов, В.В.Ткач. Математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки как предначальная стадия создания САПР сушилок нового поколения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):104-115. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-104-115

**Mathematical support of the drying process as a pre – stage of the new generation CAD
dryers design**

A.A. Hvostov¹, V.I. Ryazhskikh¹, A.A. Shevtsov¹, V.V. Tkach¹

¹Voronezh State Technical University,

¹84, 20th anniversary of October Str., Voronezh 394006, Russia,

² Military Training and Research Center Air force

«N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin the Air Force Academy»,

²54a, Stary Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is the mathematical support of the vacuum microwave process, the design of the installation in CAD, the manufacture of a prototype, the modeling of temperature and moisture content fields. **Method.** The mathematical model was implemented numerically by the finite element method in the Comsol Multiphysics environment on a grid of 3678 elements, using its deformation to change the height. **Result.** Experimental data were obtained on a laboratory vacuum microwave installation, which made it possible to identify patterns in the drying of foamed materials. The drying parameters, as well as the properties of the initial and dried

material, were analyzed. A pilot-type vacuum plant was designed using CAD and a working prototype was made. The modeling of the temperature field and moisture content zones in the dynamics of the process has been carried out. **Conclusion.** Mathematical modeling of the drying process makes it possible to determine the temperature fields and moisture content of the material with a high accuracy with a relatively small amount of necessary experimental data.

Keywords: designing, microwave installation, drying, foamed materials, vacuum, modeling

For citation: A.A. Hvostov, V.I. Ryazhskikh, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach. Mathematical support of the drying process as a pre – stage of the new generation CAD dryers design. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3):104-115. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-104-115

Введение. В условиях международной конкуренции повышаются требования к производству пищевой продукции. В данных условиях предприятия вынуждены автоматизировать конструирование и производство [1], которые трудно представить без применения систем автоматизированного проектирования (САПР). САПР позволяет значительно снизить трудозатраты при проектировании, исключить недочеты и ошибки, повысить качество, снизить материальные затраты; сократить средства проектирования; повысить производительность труда [2].

Постановка задачи. Цель работы – математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки вспениваемых материалов, проектирование установки в САПР, изготовление опытного образца, моделирование полей температур и влагосодержания.

СВЧ – энергия обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами энергоподвода. Сушка в СВЧ – поле протекает значительно интенсивнее, чем при любом другом методе [3,4]. Ее способность проникать в толщу материала и возможность большой концентрации энергии в единице объема позволяют осуществить равномерный и быстрый нагрев вещества без нежелательных перепадов температуры. Время прогрева зависит только от подводимой мощности и не зависит от формы и объема объекта. СВЧ – энергия проникает в продукт не через поверхность, а появляется во всем объеме. При СВЧ – нагреве нет контакта продукта с теплоносителем, что дает возможность спроектировать более простые конструкции нагревательных устройств по сравнению с устройствами, в которых используется электроконтактный нагрев. При СВЧ – сушке не происходит потерь тепла при нагреве. Использование комбинации СВЧ – нагрева и вакуума приводит к снижению температуры кипения влаги в материале, а, следовательно, интенсификации процесса сушки и испарения [5,6,7].

Методы исследования. Исследование процесса сушки жидких вспениваемых материалов проводили на лабораторной вакуумной СВЧ–установке периодического действия (рис.1). В качестве исследуемых материалов были выбраны: соевая суспензия, карамельная патока, концентрат квасного суслу с содержанием сухих веществ от 30 до 80%.

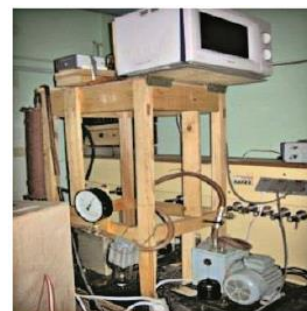
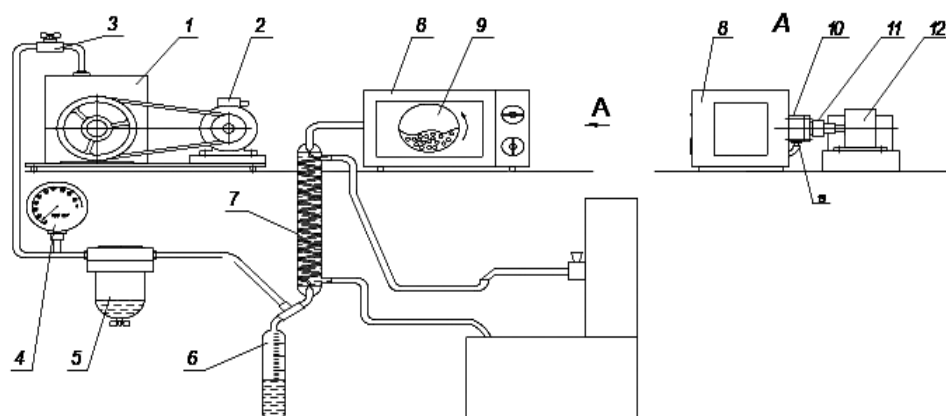


Рис. 1. Лабораторная вакуумная СВЧ – установка периодического действия
 Fig. 1. Laboratory vacuum microwave installation periodic action

СВЧ – установка содержит вакуум – насос 1, электродвигатель 2, кран шаровый 3, вакуумметр 4, воздушный фильтр 5, мерный сборник 6, конденсатор 7, СВЧ–печь 8, рабочую камеру 9, бобину 10, муфту 11, электродвигатель 12.

Работа лабораторной установки заключается в следующем. Жидкий продукт загружается в рабочую камеру 9. Объем камеры 3 л. Вращение рабочей камеры относительно источника СВЧ – излучения (магнетрона) обеспечивается электромотором 12 подсоединенного к ней через муфту 11. Необходимая глубина вакуума в рабочей камере 9 достигается при помощи вакуум–насоса 1 подключенного к ней через бобину 10 и систему гибких шлангов. Измерения остаточного давления производят при помощи вакуумметра 4. С целью охлаждения паровоздушной смеси и ее полной конденсации и накопления в мерном сборнике 6, используют конденсатор 7, через межвитковое пространство которого циркулирует холодная вода. В процессе сушки в зависимости от времени показания снимаются по градуированной шкале мерного сборника 6. Для отделения капель жидкости от паровоздушной смеси используют воздушный фильтр 5.

Под воздействием СВЧ – излучения и вакуума происходит интенсивное вспенивание материала с образованием увеличивающейся в объеме пористой структуры и испарением влаги из толщи материала. Высота пены в зависимости от свойств материала может быть в 15 – 20 раз больше начальной высоты жидкого продукта [3]. Благодаря использованию вакуумирования снижается температура испарения воды из жидкого продукта и осуществляется ее непрерывный отвод из материала. После завершения процесса сушки снимают воздействие СВЧ – излучения и убирают вакуум. Высушенный материал выгружают из рабочей камеры 9.

Проведенные исследования выявили следующие закономерности при сушке вспениваемых материалов:

1) Для максимального проникновения СВЧ – излучения по толщине и образования высокопористой структуры высушиваемого материала, в которой высшие слои не будут препятствовать выходу влаги из низших слоев, рекомендуемая высота исходного продукта должна находиться в интервале $h=(0,15\div0,25)d$, где d – диаметр рабочей камеры.

2) исходный объем вышеуказанных материалов при вспенивании увеличивается в 10 – 13 раз.

3) Вращение рабочей емкости относительно источника излучения способствует равномерному прогреву материала по всей высоте слоя, а также исключает образование зон перегрева. Однако конструктивные особенности СВЧ – печи не позволили установить рабочую камеру строго по центру относительно источника излучения. Замеры в пенно – пористом материале показали допустимое, но все же расхождение значений остаточной влажности по высоте и ширине материала (рис. 2).

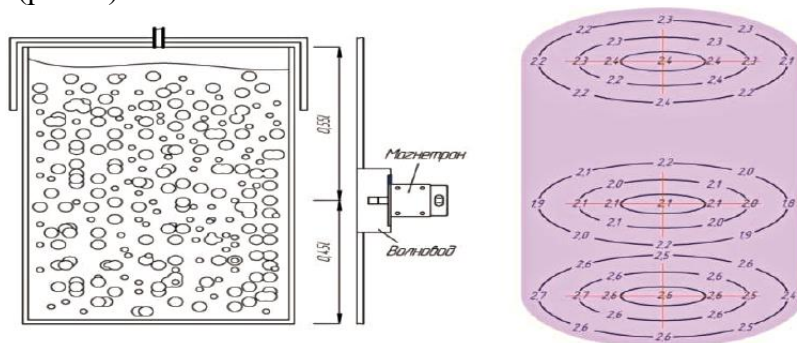


Рис. 2. Распределение остаточной влажности в материале
Fig. 2. Distribution of residual moisture in the material

4) Сушка, проводимая без вращения рабочей камеры с целью снижения энергоемкости процесса и упрощения конструкции установки, исходя из теории проникновения СВЧ – волн

по всей толще продукта показала возникновение значительного температурного градиента и зон перегрева в материале.

5) Максимальная глубина вакуума целесообразна только в периоде возрастающей скорости сушки с целью интенсификации процесса пенообразования и испарения влаги из материала, в других периодах в связи с инерционностью процесса допустимо её снижение для уменьшения удельных энергозатрат.

На основе полученных экспериментальных данных выполнено проектирование в САПР вакуумной СВЧ–установки пилотного типа (рис. 3).

Установка состоит: 1 – корпус, 2 – емкость для материала, 3 – магнетроны, 4 – технологические отверстия, 5 – заглушки, 6 – крепежные элементы, 7 – волноводы, 8 –антикондесатное покрытие, 9 – крышка, 10 – вентиляторы. Система вакуумирования аналогична системе установленной на лабораторной установке с применением более мощного вакуум – насоса и конденсатора.

При проектировании были использованы следующие конструкторские решения: корпус выполнен цилиндрическим, толщина стенки выбрана исходя из прочностного расчета, способная выдерживать снижение давления при вакуумировании. Материалом для изготовления емкости для продукта и заглушек технологических отверстий выбран фторопласт, являющийся безопасным с точки зрения применения в пищевой промышленности, а также обладающий одним из самых низких коэффициентом диэлектрических потерь среди аналогичных материалов. Подбранное соотношение диаметра, высоты емкости и толщины слоя загружаемого материала, обеспечивает максимальную интенсификацию процесса пенообразования и сушки. Магнетроны установлены с внешней стороны корпуса по всей его высоте на равноудаленном по вертикали расстоянии. Данное расположение обеспечивает максимальный и равномерный прогрев многократно увеличивающегося по высоте материала в процессе сушки.

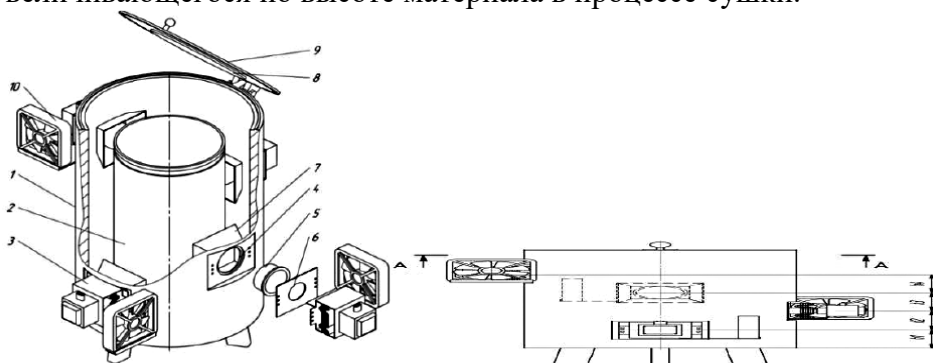


Рис. 3. Вакуумная СВЧ – установка пилотного типа

Fig. 3. Vacuum microwave installation pilot type

Для создания эффекта вращения емкости относительно источника СВЧ – излучения, а также снижения удельных энергозатрат и металлоёмкости конструкции, связанных с установкой привода, магнетроны расположены под углом 90° (рис.4).

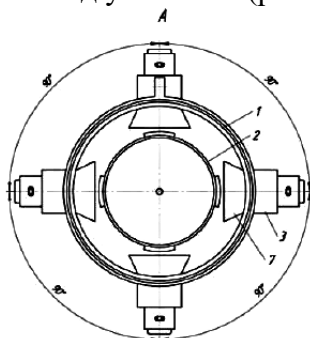


Рис. 4. Расположение магнетронов на установке

Fig. 4. Location of magnetrons on the installation

Крепление к корпусу осуществляется посредством крепежных элементов, на которых также размещены вентиляторы, предназначенные для охлаждения. Проникновение излучения внутрь корпуса и емкости для материала происходит через технологические отверстия с расположенными в них фторопластовыми заглушками предотвращающими контакт магнетронов с испарившейся влагой. Волноводы выполнены в форме усеченной пирамиды.

На крышке установлено антиконденсатное покрытие, предотвращающее конденсацию влаги на ее внутренней поверхности и попадание в емкость для материала, что может снизить производительность сушилки [8]. Проведенные лабораторные исследования, а также проектирование в САПР позволили изготовить СВЧ – установку полупромышленного типа [9].

Обсуждение результатов. Анализ экспериментальных данных и этапов проектирования позволил разработать алгоритм расчёта посредством ЭВМ основных элементов и систем установки (рис. 5).

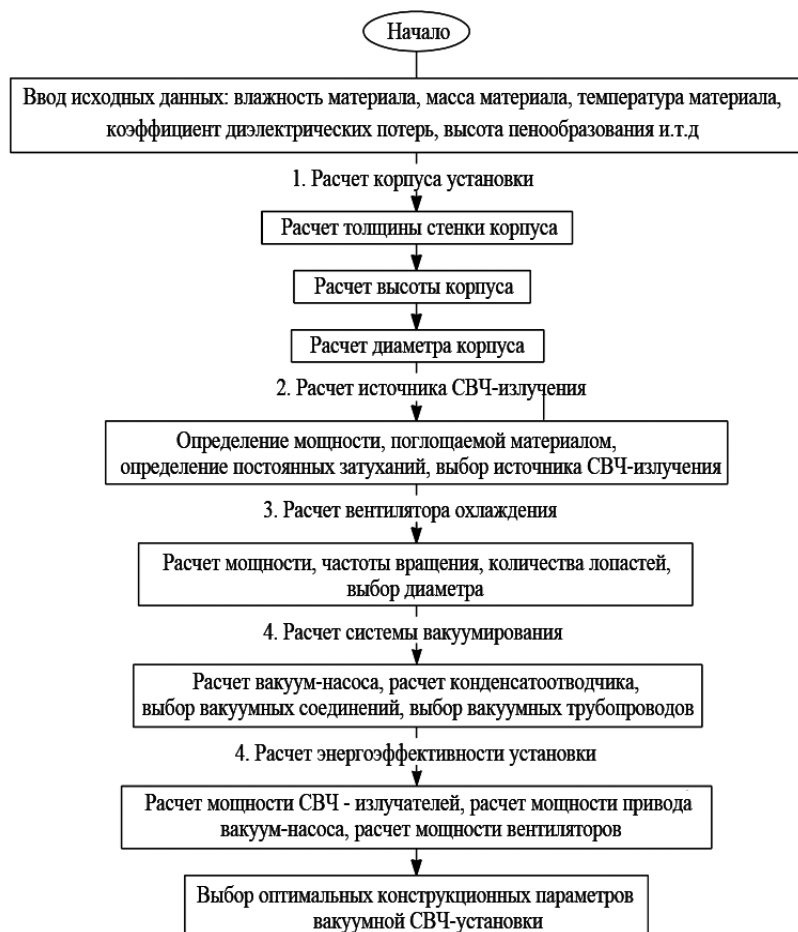


Рис. 5. Алгоритм расчета установки

Fig. 5. Installation calculation algorithm

Под воздействием СВЧ – энергии и вакуума агрегатное состояние материала меняется, переходя из жидкого состояния в твердое, что затрудняет процесс снятия разнообразных параметров. При использовании разнообразной аппаратуры, датчиков, щупов, нарушается структура материала, что приводит к искажению показаний приборов, а также усложняет и удлиняет процесс снятия разнообразных параметров.

Использование моделирования процесса сушки с изменением лишь коэффициентов и начальных параметров, в зависимости от вида продукта, позволяет определить за несколько минут температуру в любой точке материала, её изменение со временем при разных условиях протекания процесса вакуумной сушки не нарушая его целостности вводом датчиков. При моделировании процессов сушки за основу берутся балансовые уравнения, описывающие перенос

влаги и энергии в пористой среде [10]. Предлагаемый подход описывает режимы мягкой сушки, при тепловых потоках, не приводящих к превышению температуры фазового перехода «вода – пар» в значительной части расчётной области.

При интенсивных методах сушки, с подводом СВЧ – энергии, приводящей к смещению фронта испарения вглубь высушиваемого продукта, необходимо учитывать резкое изменение механизмов массопереноса во «влажной» и «сухой» зонах, скрытую теплоту испарения. Ввиду технической сложности идентификации изменяющихся в процессе сушки коэффициентов молекулярной, конвективной и капиллярной диффузии вследствие изменения параметров пористой среды (образование пены) одним из подходов к моделированию процесса сушки является представление расчётной среды как пространственно сопряженных сплошных сред, разделенных подвижной границей раздела фаз (фронтом испарения). Массоперенос рассматривается в диффузионном приближении (совокупность механизмов диффузии выражается коэффициентом эффективной диффузии).

Во «влажной» зоне слабо изменяется влагосодержание и температура асимптотически стремится к температуре фазового перехода, а в «сухой» зоне влагосодержание мало, а температура стремится к температуре окружающей среды. Теплофизические свойства и коэффициенты диффузии определяются локальной температурой.

При этом задача формулируется как тепломассообмен с фазовым переходом с подвижной границей (задача Стефана) [11]. При этом происходит кратное увеличение объема продукта вследствие эффекта «вспенивания». Это приводит к изменению геометрии расчётной области. В случае постоянных параметров основных балансовых соотношений и неизменной геометрии рассматриваемая задача имеет аналитическое решение [12].

Схема расчета представлена в виде рабочей камеры в поперечном сечении (рис. 6).

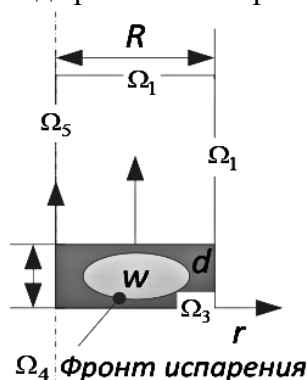


Рис. 6. Схема расчета
 Fig. 6. Calculation scheme

Уравнения сохранения массы и энергии для рассмотренной задачи моделирования в цилиндрической системе таковы:

$$\begin{cases} \rho_w c_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \nabla \cdot k_w \nabla T_w + Q_{mw}; \\ \frac{\partial W_w}{\partial t} = \nabla \cdot D_w \nabla W_w; \\ \rho_d c_{p,d} \frac{\partial T_d}{\partial t} = \nabla \cdot k_d \nabla T_d + Q_{mw}; \\ \frac{\partial W_d}{\partial t} = \nabla \cdot D_d \nabla W_d; \end{cases} \quad (2)$$

С начальными условиями

$$T_w|_{t=0} = T_{w,0}, W_w|_{t=0} = W_{w,0}, T_d|_{t=0} = T_{d,0}, W_d|_{t=0} = W_{d,0}, \quad (3)$$

и граничными условиями на Ω_1 : конвективный теплообмен с окружающей средой,

$$-k_w \nabla T_w = \alpha (T_{Amb} - T_S), \quad -k_d \nabla T_d = \alpha (T_{Amb} - T_S) \quad (4)$$

конвективный массообмен с окружающей средой

$$-D_w \rho_w \nabla W_w = \beta (W_{Amb} - W_S), \quad -D_d \rho_d \nabla W_d = \beta (W_{Amb} - W_S) \quad (5)$$

на Ω_2 : конвективный теплообмен с окружающей средой в форме (4),

и массоизоляция

$$\frac{\partial W_w}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial W_d}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

на Ω_3 : тепловой контакт с основанием и массоизоляция:

$$T_w = T_{base}, \quad \frac{\partial T_w}{\partial n} = \frac{\partial T_{base}}{\partial n}, \quad T_d = T_{base}, \quad \frac{\partial T_d}{\partial n} = \frac{\partial T_{base}}{\partial n}, \quad \frac{\partial W_w}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial W_d}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

на Ω_4 : условие Стефана на границе сухой и влажной зон Ω_3

$$\begin{cases} T_w = T_d; \\ k_w \frac{\partial T_w}{\partial n} - k_d \frac{\partial T_d}{\partial n} = Q_L \frac{\partial \xi}{\partial t}, \end{cases} \quad (8)$$

на Ω_5 : условие симметрии

$$\frac{\partial T_w}{\partial n} = \frac{\partial T_d}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial W_w}{\partial n} = \frac{\partial W_d}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

где t – время, с; T_w, T_d, W_w, W_d – температура [K] и влагосодержание [доля единицы] влажной (w) и сухой (d) зон, $\rho_w, c_{p,w}, k_w, D_w, \rho_d, c_{p,d}, k_d, D_d$ – плотность [кг/м³], удельная теплоемкость [Дж/(кг·K)], коэффициент теплопроводности [Вт/(м·K)] и коэффициент диффузии [м²/с] для влажной и сухой зон, $T_{w,0}, W_{w,0}, T_{d,0}, W_{d,0}$ – начальные температура и влажность влажной и сухой зон [K], α – коэффициент теплоотдачи [Вт/(м²·K)], T_S, T_{Amb}, T_{base} – температура поверхности заготовки, окружающего воздуха и основания [K], β – коэффициент массоотдачи [м²/с], W_S, W_{Amb} – влагосодержание поверхности заготовки и окружающего воздуха [доля единицы], n – единичный вектор нормали к расчетной поверхности [м], Q_L – удельная скрытая теплота парообразования [Дж/м³], $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ – скорость движения границы раздела областей [м/с],

Q_{mw} – удельная поглощенная мощность за счёт подводимой СВЧ энергии нагрева [Вт/м³].

Пренебрегая затуханием электромагнитного поля в нагреваемом образце можно записать удельную поглощенную мощность за счет подводимой СВЧ – энергии нагрева как [13]:

$$Q_{mw} = 2\pi\epsilon_0\epsilon''\omega|E|^2, \quad (10)$$

где $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная [Ф/м], ϵ'' – коэффициент диэлектрических потерь в материале, ω – частота излучения [Гц], E – напряженность электрического поля [В/м].

Для устранения необходимости отслеживания границы фазового перехода осуществлен переход к эффективным значениям теплофизических свойств и коэффициента диффузии методом сквозного счета с помощью разрывных коэффициентов, соответствующих сухой и влажной зонам. Расчетная область описывается общими для сухой и влажной зон уравнениями с эффективными разрывными коэффициентами, обозначенными индексами eff. Уравнения сохранения массы, энергии при заданных условиях и допущениях принимают вид

$$\begin{cases} \rho_{eff}(T) c_{p,eff}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k_{eff}(T) \nabla T + Q_{mw}; \\ \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot D_{eff}(T) \nabla W, \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{с начальными условиями } T|_{t=0} = T_0, W|_{t=0} = W_0, \quad (12)$$

и граничными условиями на Ω_1 : конвективный теплообмен с окружающей средой,

$$-k_{\text{eff}} \nabla T = \alpha (T_{\text{Amb}} - T_S), \quad (13)$$

конвективный массообмен с окружающей средой

$$-D_{\text{eff}} \rho_{\text{eff}} \nabla W = \beta (W_S - W_{\text{Amb}}), \quad (14)$$

на Ω_2 : конвективный теплообмен с окружающей средой в форме (13) (тепловой инерционностью стенок формы пренебрегаем), и массоизоляция:

$$\frac{\partial W}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

на Ω_3 : тепловой контакт с основанием и массоизоляция:

$$T = T_{\text{base}}, \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T_{\text{base}}}{\partial n}, \frac{\partial W}{\partial n} = 0, \quad (16)$$

на Ω_5 : условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial W}{\partial n} = 0 \quad (17)$$

Условие Стефана на границе раздела расчетных областей учитывается с помощью эффективной теплоемкости среды на основе методики, изложенной в [14]. При этом энтальпия на единицу объема H определяется по формуле:

$$H(T) = \int_{T_0}^T C_p(T) dT + Q_{LV} \theta(T - T^*), \quad (18)$$

где T_0 – температура начала процесса передачи тепла, Q_{LV} – теплота фазового перехода на единицу объема, θ – функция Хэвисайда, T^* – температура фазового перехода.

Тогда эффективная теплоемкость с учетом фазового перехода по определению

$$C_{p,\text{eff}}(T) = \frac{dH(T)}{dT} = C_p(T) + Q_{LV} \delta(T - T^*), \quad (19)$$

где δ – дельта-функция Дирака.

Устранение разрывов эффективных коэффициентов осуществляется с помощью различных модификаций сглаженных функций Хэвисайда и Дирака [15]. Представление функции

Хэвисайда в исходном виде $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$, при реализации вычислительного алгоритма за-

труднено, т.к. вычисленная производная в данной точке принимает бесконечное значение. Устранение этой проблемы осуществляется введением «сглаженных» функции Хэвисайда, которые являются непрерывными и дифференцируемыми в области перехода. Будем использовать для моделирования «сглаженной» функции Хэвисайда от аргумента x логистическую функцию

$$\tilde{\theta}(x) \approx \frac{1}{1 + e^{-2kx}}, \quad (20)$$

где k – параметр, определяющий длину транзитного перехода [1/K].

Вводимые новые параметры обеспечивают универсальность (15). Параметр θ_{Low} для задания нижней границы, θ_{Up} для задания верхней границы и τ – для задания сдвига по оси абсцисс. В этом случае (15) можно трансформировать следующим образом:

$$\tilde{\theta}(x) \approx \theta_{\text{Low}} + \frac{\theta_{\text{Up}} - \theta_{\text{Low}}}{1 + e^{-2k(x-\tau)}}. \quad (21)$$

Для моделирования скачка теплоёмкости с помощью функции Дирака

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

будем использовать функцию Гаусса

$$\tilde{\delta}(x) \approx \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (22)$$

где σ – параметр, отвечающий за длину транзитного перехода, m – аргумент, отвечающий за положение точки максимума $\tilde{\delta}(x)$.

Для обеспечения соблюдения энергетического баланса, должно выполняться условие нормировки

$$\int_{T^* - \frac{\Delta T}{2}}^{T^* + \frac{\Delta T}{2}} C_p(T) dT = Q_{LV}, \quad (23)$$

где ΔT – ширина области перехода.

Ввиду нахождения продукта в цилиндрической емкости, изменение объёма в ходе нагрева заменено изменением высоты расчётной зоны от начального значения h_0 .

Так как сушка проходит три стадии (нагрев, пенообразование с испарением влаги, сушка пены с получением твердого высокопористого каркаса), на которых изменение объёма существенно отличается (в процессе нагрева не изменяется, резко растёт в процессе испарения до некоторой предельной величины), представим её изменение в виде «сглаженной» функции Хэвисайда (20).

Масса заготовки вычислена как сумма масс влаги и твердого каркаса в предположении, что масса твердого каркаса неизменна.

$$m = W m_{init} + (1 - W_0) m_{init} \quad (24)$$

Математическая модель реализована численно методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics на сетке из 3678 элементов с использованием её деформирования для изменения высоты.

Модель позволяет достаточно точно рассчитывать поля температуры и влагосодержания в динамике с учётом изменяющейся высоты при сравнительно небольшом количестве необходимых экспериментальных данных. Вычислительный эксперимент показал качественно верное описание динамики изменения среднеобъёмной температуры (рис. 7) и температуры внутри объекта моделирования (рис. 8).

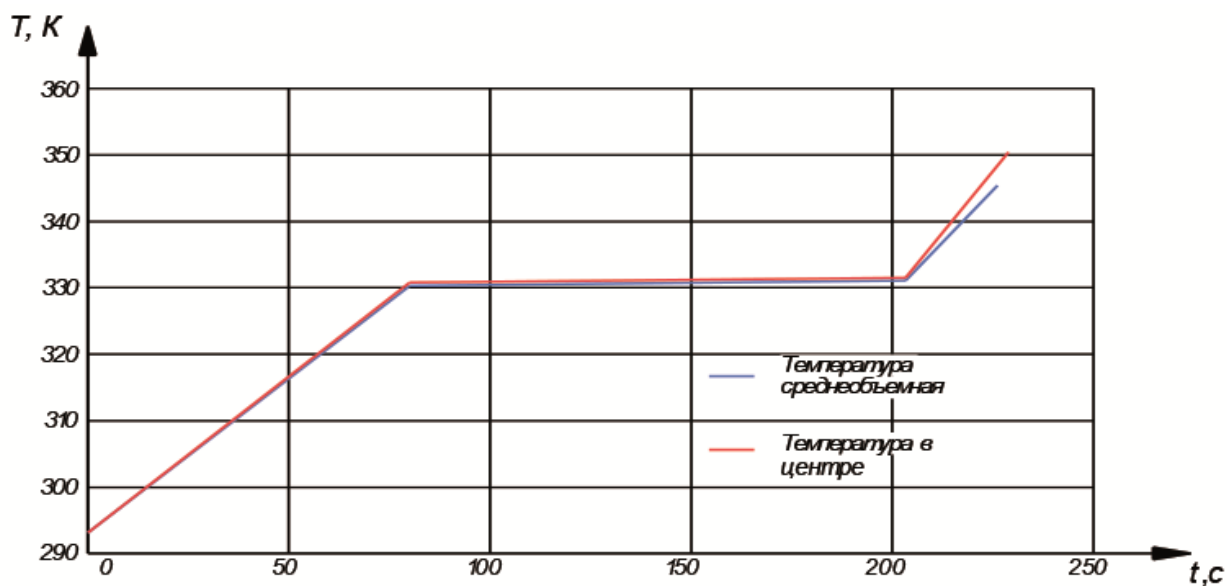


Рис. 7. Изменение средней объемной температуры
 Fig. 7. Change in average volume temperature

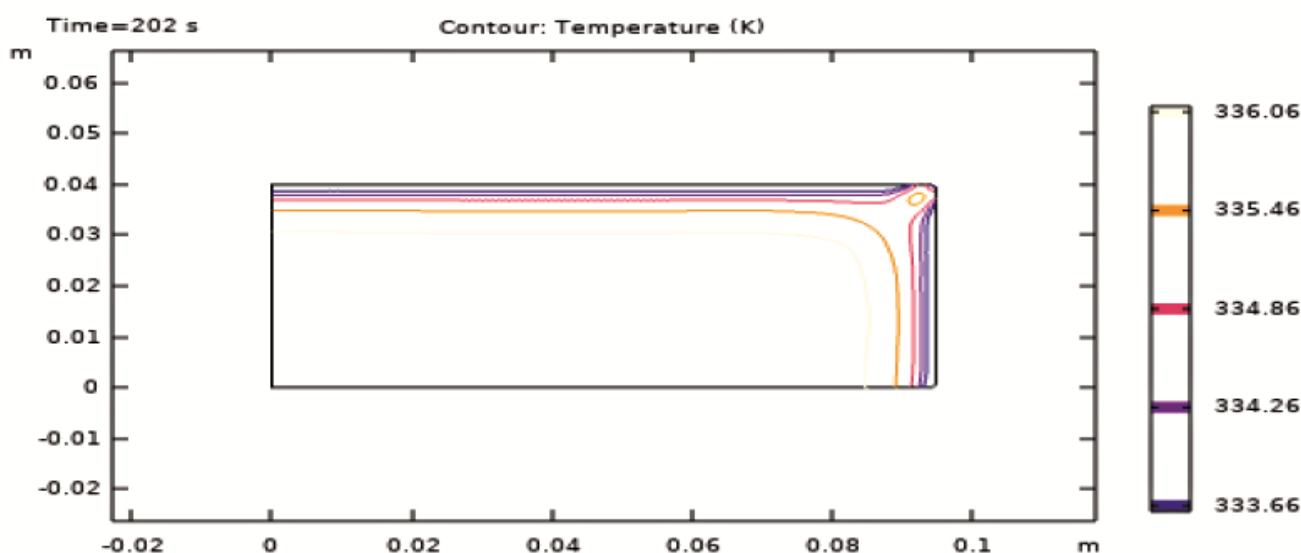


Рис. 8. Изменение температуры внутри объекта моделирования
 Fig. 8. Temperature change inside the simulation object

Процесс изменения температуры на стадии нагрева носит квазилинейный характер, что обусловлено равномерным прогревом по всему объему и малыми температурными градиентами. Скорость нагрева на стадии испарения близка к нулю, что обусловлено поглощением тепла в процессе фазового перехода.

Дальнейший рост температуры обусловлен завершением процесса испарения и нагревом оставшегося сухого вещества. При этом процесс массопереноса также носит трехстадийный характер (рис. 9).

На стадии нагрева скорость массопереноса низкая, т.к. отсутствует конвективная диффузия, после чего скорость сушки увеличивается за счёт образования и переноса пара из-за разницы давлений на поверхности объекта и в окружающем воздухе. При полном удалении влаги скорость сушки также стремится к нулю.

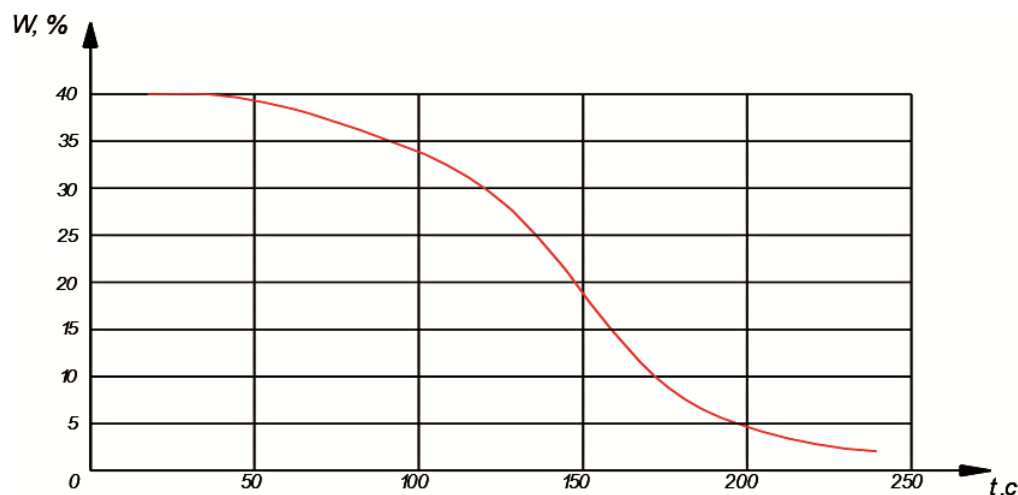


Рис. 9. Трехстадийный процесс массопереноса

Fig. 9. Three – stage mass transfer process

Вывод. Таким образом, экспериментальные исследования и проектирование в САПР позволили изготовить вакуумную СВЧ – установку пилотного типа с потенциалом для дальнейшей модернизации и создания на ее основе промышленного образца.

Математическое моделирование процесса сушки дает возможность с высокой точностью определять температурные поля и влагосодержание материала при сравнительно небольшом количестве необходимых экспериментальных данных.

Библиографический список:

1. Нестеренко, Е. С. Основы систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / Е. С. Нестеренко; Минобрнауки России, Самар. гос.аэрокосм. ун – т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун – т) – Электрон. текстовые и граф. дан. (0,31 Мбайт). – Самара, 2013.
2. Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). – Спб.: Питер, 2004. – 560 с.: ил.
3. Рогов И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Агропромиздат, 1986. – 351 с.
4. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.
5. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
6. Тепляшин В.Н. Технологии и оборудование для сушки растительного сырья[Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова, В.Н. Невзоров; Краснояр. гос. аграр. ун–т. – Красноярск, 2019 – 173 с.
7. Абрамов Я.К. Интенсификация тепло – массообменных процессов при непрерывном вакуумировании / Тезисы докл. на 3 юбилейной научно – практической конф. Бийск: БТИ, 1995. С. 76.
8. Пат. на пол. модель № 72536 РФ, МПК F26B 5/06 (2006.01). Вакуумная СВЧ – установка для лабораторных исследований процесса обезвоживания пищевых сред [Текст] /Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – заявитель и патентообладатель: Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – № 2007145105/22; заявл. 04.12.2007; опубл. 20.04.2008. Бюл. № 11.
9. Пат. № 2755850 РФ, МПК F26B 9/06. Установка для вакуумной сушки [Текст] /С.В. Макеев, Е.С. Бунин, А.А. Шевцов, В.В. Ткач. – заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. универ. инженерных технол. – № 2020141027; заявл. 14.12.2020; опубл. 22.09.2021. Бюл. № 27.
10. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия 1968. – 471 с.
11. Nastaj, J. F. A parabolic cylindrical stefan problem in vacuum freeze drying of random SOLIDS. International Communications in Heat and Mass Transfer, 30(1), 2003. с. 93 – 104.
12. L.N. Gupta. An approximate solution to the generalized Stefan's problem in a porous medium, Int. J. Heat Transfer 17 (1974), с. 313 – 321.
13. Tong, T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. Journal of Food Engineering 19 (1993), 319 – 339 – 286.
14. Bonacina, C., Comini, G., Fasano, F., Primicerio, V., Numerical solution of phase–change problems. International Journal Heat Mass Transfer vol. 16 (1973), pp. 1825 – 1832.
15. Davies, Brian (2002). "Heaviside step function". Integral Transforms and their Applications (3rd ed.). Springer. p. 28.

References:

1. Nesterenko, E. S. Fundamentals of computer–aided design systems [Electronic resource]: electron. Lecture notes / E. S. Nesterenko; Ministry of Education and Science of Russia, Samara State Aerospace. Un – t named after S. P. Korolev (National Research un – t) – Electron. text and graph. dan. (0.31 MB). Samara, 2013. (In Russ)

2. Lee K. CAD basics (CAD, CAM, CAE). St. Petersburg: Peter, 2004; 560. (In Russ)
3. Rogov I.A., S.V. Nekrutman Ultra – high – frequency heating of food products...: Agropromizdat, 1986; 351. (In Russ)
4. Rogov I.A. Electrophysical methods of food processing. M.: Agroprom – izdat. 1988; 272. (In Russ)
5. Ginzburg A.S. Calculation and design of drying plants of the food industry. M.: Agropromizdat, 1985; 336. (In Russ)
6. Teplyashin V.N. Technologies and equipment for drying vegetable raw materials [Electronic resource]: textbook. manual / V.N. Teplyashina, L.I. Chentsova, V.N. Nevzorov; Krasnoyar. State Agrarian. un – t. Krasnoyarsk. 2019; 173. (In Russ)
7. Abramov Y.K. Intensification of heat and mass transfer processes with continuous accumulation / Abstracts of the 3rd anniversary scientific – practical conference. Biysk: BTI, 1995; 76. (In Russ)
8. Pat. on the floor. Model No. 72536 RF, IPC F26B 5/06 (2006.01). Vacuum microwave installation for laboratory studies of the process of dehydration of food media [Text] /G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – applicant and patent holder: G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – No. 2007145105/22; application 04.12.2007; publ. 20.04.2008; 11. (In Russ)
9. Pat. No. 2755850 RF, IPC F26B 9/06. Installation for vacuum drying [Text] /C.V. Makeev, E.S. Bunin, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach. – applicant and patent holder Voronezh. State. University. Engineering technol. – No. 2020141027; application No. 14.12.2020; publ. 22.09.2021; 27. (In Russ)
10. Lykov A.V. Theory of drying. M.: Energiya 1968; 471. (In Russ)
11. Nastaj, J. F. A parabolic cylindrical stefan problem in vacuum freeze drying of random SOLIDS. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2003; 30(1): 93 – 104.
12. L.N. Gupta. An approximate solution to the generalized Stefan's problem in a porous medium, *Int. J. Heat Transfer* 17 1974; 313 – 321.
13. Tong, T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. *Journal of Food Engineering*. 1993; 19: 319 – 339 – 286.
14. Bonacina, C., Comini, G., Fasano, F., Primicerio, V., Numerical solution of phase–change problems. *International Journal Heat Mass Transfer*. 1973; 16: 1825 – 1832.
15. Davies Brian "Heaviside step function". *Integral Transforms and their Applications (3rd ed.)*. Springer.2002; 28.

Сведения об авторах:

Хвостов Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и механика»; khvtol1974@yandex.ru

Рязжских Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и механика»; Ryazhskih vi@mail.ru

Шевцов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин; shevalol@rambler.ru

Ткач Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин; tkachbalian@yandex.ru

Information about authors:

Anatoly A. Hvostov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof, Department of Applied Mathematics and Mechanics; hvtol1974@yandex.ru

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head. Department of Applied Mathematics and Mechanics Ryazhskih; vi@mail.ru

Alexander A. Shevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof, Department of general professional disciplines; shevalol@rambler.ru

Vladimir V. Tkach, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of general professional disciplines; tkachbalian@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.08.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.09.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 12.09.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 69.04

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-116-122

Оригинальная статья / Original Paper

Устойчивость многопролётных стержней

Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова

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

Резюме. Цель. При проектировании сложных инженерных сооружений в настоящее время проблема устойчивости становится особенно актуальной. С необходимостью удовлетворения условиям прочности, жёсткости при расчётах и конструировании обязательно нужно обеспечивать устойчивость равновесия как важнейшее требование. Независимо от вида расчётов на прочность (проверочный, проектировочный, нагрузочный) расчёт конструкции на устойчивость даже в наиболее простой постановке сводится к определению критических сил. Это позволяет оценить запас устойчивости конструкции при заданной нагрузке. Сложность определения критических параметров воздействия возрастает с усложнением рассматриваемой системы. **Метод.** Применение метода конечных разностей является особенностью при решении систем уравнений в задачах с граничными условиями. **Результат.** Определены точные значения критических сил в неклассических задачах устойчивости сжатых стержней, что доказывает полученная кривая с экрана монитора. **Вывод.** Изложены основные моменты теории расчёта при исследовании устойчивости многопролётных стержней. Для отыскания критических сил многопролётного стержня на упругих опорах приведён простой алгоритм решения задач.

Ключевые слова: многопролётные стержни, прочность, устойчивость, критические силы, переменные сечения, упругие опоры, численные методы, собственные значения и формы, метод конечных разностей, графический способ, дифференциальные уравнения, квадратная матрица, прогибы граничные условия

Для цитирования: Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова. Устойчивость многопролётных стержней. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 116-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-116-122

Stability of multi-span rods

L.A. Baragunova, M.M. Shogenova

H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
173 Chernyshevskogo Str., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. In the design of complex engineering structures, the problem of stability is now becoming especially relevant. With the need to meet the conditions of strength, rigidity in calculations and design, it is imperative to ensure the stability of equilibrium as the most important requirement. Regardless of the type of strength calculations (verification, design, load), the calculation of a structure for stability, even in the simplest formulation, is reduced to the determination of critical forces. This allows us to estimate the stability margin of the structure under a given load. The complexity of determining the critical parameters of the impact increases with the complexity of the system under consideration. **Method.** The use of the finite difference method is a feature in solving systems of equations in problems with boundary conditions. **Result.** The exact values of critical forces in non-classical problems of the stability of compressed rods are determined, which is proved by the obtained curve from the monitor screen. **Conclusion.** The main points of the theory of calculation in the study of the stability of multi-span rods are outlined. To find the critical forces of a multi-span rod on elastic supports, a simple algorithm for solving problems is given.

Keywords: multi-span bars, strength, stability, critical forces, variable sections, elastic supports, numerical methods, eigenvalues and shapes, finite difference method, graphical method, differential equations, square matrix, deflections, boundary conditions.

For citation: L.A. Baragunova, M.M. Shogenova. Stability of multispan rods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3): 116-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-116-122

Введение. Многопролётные стержни рассчитывают, как стержни, опирающиеся на упругие основания в тех случаях, когда податливостью опор пренебречь невозможно. С такими расчётными схемами приходится встречаться при расчёте междуэтажных балочных перекрытий, каркасов промышленных зданий, высоких мачт с оттяжками, мостов и т.д. Устойчивость многопролётных сжатых стержней с переменным сечением при наличии упругих промежуточных опор представляет собой сложную задачу.

Такие задачи решаются вычислением такого значения наименьшего параметра критической силы, которое будучи подставленным в уравнение обращает её в тождество. Гибкие опоры в сочетании с многопролётностью оказывают существенное влияние на собственные значения [1-3].

Аналитические методы не решают проблему определения собственных значений и форм. В таких случаях применяются численные методы. В частности, используется метод конечных разностей (МКР), старейший метод, который в настоящее время стал популярным из-за его относительно простого подхода к дискретизации дифференциальных уравнений. Исходные дифференциальные уравнения нужно превратить в эквивалентную систему алгебраических уравнений, для решения которых можно пользоваться вычислительной техникой. К достоинствам метода конечных разностей (метод сеток) можно отнести его универсальность, в отличие от аналитических методов, лёгкость построения решающего алгоритма и его программной реализации [4-9].

Постановка задачи. Определяется спектр собственных значений для сжатого силами F многопролётного стержня переменного сечения на промежуточных упругих опорах (рис.1).

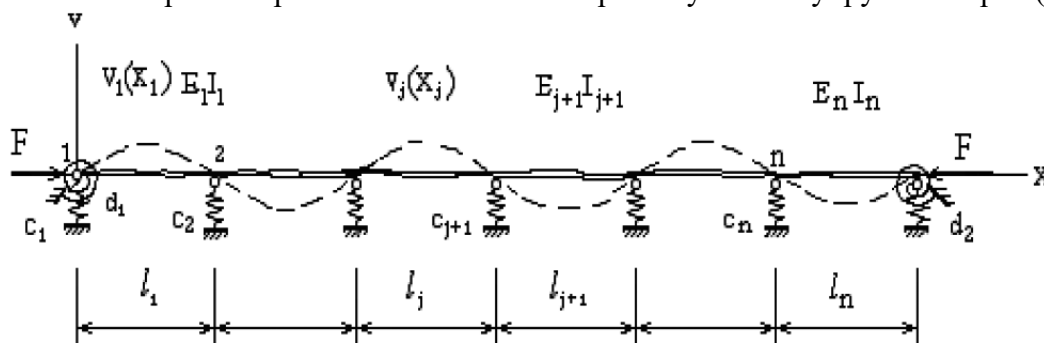


Рис. 1. Спектр собственных значений для сжатого силами F многопролётного стержня переменного сечения на промежуточных упругих опорах

Fig. 1. Spectrum of eigenvalues for a multi-span bar of variable cross section compressed by forces F on intermediate elastic supports

Гибкие упругие опоры имеют коэффициенты жёсткости на закручивание d_1, d_2 , и на растяжение $c_1, c_2, \dots, c_{n+1}$. Рассматриваемый стержень имеет пролёты l_j , с разными моментами инерции сечений $I_j(x)$, ($j=1, 2 \dots n$).

Изогнутая ось каждого пролёта при потере устойчивости стержня описывается дифференциальным уравнением четвёртого порядка

$$(B_j v_j'')'' + F v_j'' = 0, \quad x_j \in (0, l_j), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Здесь $B_j(x_j) = EI(x_j)$ – жёсткость стержня при изгибе, $v_j(x_j)$ – функции прогибов; x_j – локальные координаты j -го пролёта с началом на левом конце.

С левого конца стержень имеет следующие граничные условия:

$$B_1(0)v_1''(0) - d_1 v_1'(0) = 0, \quad [B_1(0)v_1''(0)]' + c_1 v_1(0) + F v_1'(0) = 0, \quad (2)$$

С правого конца:

$$[B_n(l_n)v_n''(l_n)]' - c_{n+1}v_n(l_n) - Fv_n'(l_n) = 0, \quad B_n(l_n)v_n''(l_n) + d_2 v_n'(l_n) = 0. \quad (3)$$

Условия сопряжения j -го и $(j+1)$ -го пролётов:

$$v_j(l_j) - v_{j+1}(0) = 0, \quad v_j'(l_j) - v_{j+1}'(0) = 0, \quad B_j(l_j)v_j''(l_j) - B_{j+1}(0)v_{j+1}''(0) = 0, \quad (4)$$

$$[B_j(l_j)v_j''(l_j)]' - [B_{j+1}(0)v_{j+1}''(0)]' - c_{j+1}v_{j+1}(0) = 0. \quad (5)$$

Методы исследования. Используя метод конечных разностей, который представляет собой процедуру преобразования дифференциальных уравнений в системы частных производных, а также уравнений граничных и начальных условий в системы алгебраических уравнений, заменим в (1) область непрерывного изменения аргумента областью дискретного изменения [10-13]. Обозначим

$$L = \sum_{j=1}^n l_j$$

и разобьём отрезок $[0, L]$ на $N-1$ равных частей.

Введём на этом отрезке сетку с шагом $h = L/(N-1)$.

В задаче (1) – (5) проведём замену дифференциальных операторов на конечноразностные.

Проведём последовательные преобразования основного уравнения (1) в точке i .

$$(B_j v_j'')_i + F(v_j'')_i = 0, \quad j=1, 2, \dots, n; \quad i=3, 4, \dots, n_j-2.$$

Здесь n_j – номер узловой точки над $(j+1)$ -ой опорой в локальной системе координат (рис. 2). Далее такая процедура метода даёт

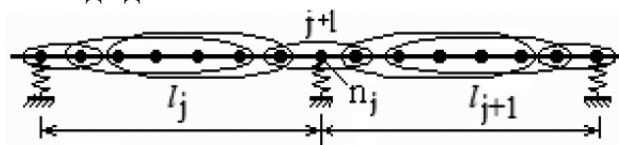


Рис. 2. Локальная система координат

Fig. 2. Local coordinate system

$$(B_j v_j'')_{i-1} - 2(B_j v_j'')_i + (B_j v_j'')_{i+1} + Fh^2 (v_j'')_i = 0, \quad j=1, 2, \dots, n; \quad i=3, 4, \dots, n_j-2.$$

$$L_j = \sum_{k=1}^j l_k, \quad n_j = L_j/h + 1.$$

Переходя к конечным разностям, можно переписать уравнение в виде

$$B_{i-1}(y_{i-2} - 2y_{i-1} + y_i) - 2B_i(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) + B_{i+1}(y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}) + Fh^2(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) = 0, \quad j=1, 2, \dots, n; \quad i=3, 4, \dots, n_j-2,$$

где введены обозначения

$$y_i \approx v(x_i), \quad B_i = B(x_i).$$

Приведение подобных членов даёт в окончательном виде

$$B_{i-1}y_{i-2} + \alpha_i y_{i-1} + \beta_i y_i + \gamma_i y_{i+1} + B_{i+1}y_{i+2} = 0, \quad i=3, 4, \dots, n_j-2, \\ \alpha_i = -2B_{i-1} - 2B_i + Fh^2, \quad \beta_i = B_{i-1} + 4B_i + B_{i+1} - 2Fh^2, \quad \gamma_i = -2B_i - 2B_{i+1} + Fh^2.$$

Аналогичные преобразования проведём для граничных условий и условий сопряжения (2) – (5).

Левый конец (2):

$$B_1 \frac{2y_1 - 5y_2 + 4y_3 - y_4}{h^2} - d_1 \frac{-3y_1 + 4y_2 - y_3}{2h} = 0$$

$$\frac{(4B_1 + 3d_1 h)y_1 + (-10B_1 - 4d_1 h)y_2 + (8B_1 + d_1 h)y_3 - 2B_1 y_4 = 0}{B_1'(0)v_1''(0) + B_1(0)v_1'''(0) - c_1 v_1(0) + F v_1'(0) = 0}$$

$$B_1' \frac{1}{h^2} (2y_1 - 5y_2 + 4y_3 - y_4) + B_1 \frac{1}{2h^3} (-5y_1 + 18y_2 - 24y_3 + 14y_4 - 3y_5) +$$

$$+ c_1 y_1 + F \frac{1}{2h} (-3y_1 + 4y_2 - y_3) = 0$$

$$\frac{[4hB_1' - 5B_1 + 2h^3 c_1 - 3Fh^2]y_1 + [-10hB_1' + 18B_1 + 4Fh^2]y_2 + [8hB_1' - 24B_1 - Fh^2]y_3 + [-2hB_1' + 14B_1]y_4 - 3B_1 y_5 = 0}{}$$

Правый конец (3):

$$B_N'(l_n)v_n''(l_n) + B_N(l_n)v_n'''(l_n) - c_{n+1}v_n(l_n) - Fv_n'(l_n) = 0$$

$$B_N' \frac{1}{h^2} (-y_{N-3} + 4y_{N-2} - 5y_{N-1} + 2y_N) + B_N \frac{1}{2h^3} (3y_{N-4} - 14y_{N-3} + 24y_{N-2} -$$

$$- 18y_{N-1} + 5y_N) - c_{n+1}y_N - F \frac{1}{2h} (y_{N-2} - 4y_{N-1} + 3y_N) = 0.$$

$$3B_N y_{N-4} + [-2hB_N' - 14B_N]y_{N-3} + [8hB_N' + 24B_N - Fh^2]y_{N-2} +$$

$$+ [-10hB_N' - 18B_N + 4Fh^2]y_{N-1} + [4hB_N' + 5B_N - 2h^3 c_{n+1} - 3Fh^2]y_N = 0$$

$$B_N \frac{1}{h^2} (-y_{N-3} + 4y_{N-2} - 5y_{N-1} + 2y_N) + d_2 \frac{1}{2h} (y_{N-2} - 4y_{N-1} + 3y_N) = 0.$$

$$- 2B_N y_{N-3} + (8B_N + d_2 h)y_{N-2} + (-10B_N - 4d_2 h)y_{N-1} + (4B_N + 3d_2 h)y_N = 0$$

Сопряжение участков:

$$\frac{1}{2h} (y_{N_j-2} - 4y_{N_j-1} + 3y_{N_j}) - \frac{1}{2h} (-3y_{N_j} + 4y_{N_j+1} - y_{N_j+2}) = 0$$

$$y_{N_j-2} - 4y_{N_j-1} + 6y_{N_j} - 4y_{N_j+1} + y_{N_j+2} = 0$$

$$B_j(l_j) \frac{1}{h^2} (-y_{N_j-3} + 4y_{N_j-2} - 5y_{N_j-1} + 2y_{N_j}) - B_{j+1}(0) \frac{1}{h^2} (2y_{N_j} - 5y_{N_j+1} + 4y_{N_j+2} - y_{N_j+3}) = 0$$

$$B_j(l_j) (-y_{N_j-3} + 4y_{N_j-2} - 5y_{N_j-1}) + 2[B_j(l_j) - B_{j+1}(0)]y_{N_j} -$$

$$- B_{j+1}(0) (-5y_{N_j+1} + 4y_{N_j+2} - y_{N_j+3}) = 0$$

$$B_j'(l_j) \frac{1}{h^2} (-y_{N_j-3} + 4y_{N_j-2} - 5y_{N_j-1} + 2y_{N_j}) + B_j(l_j) \frac{1}{2h^3} (3y_{N_j-4} - 14y_{N_j-3} +$$

$$+ 24y_{N_j-2} - 18y_{N_j-1} + 5y_{N_j}) - B_{j+1}'(0) \frac{1}{h^2} (2y_{N_j} - 5y_{N_j+1} + 4y_{N_j+2} - y_{N_j+3}) -$$

$$- B_{j+1}(0) \frac{1}{2h^3} (-5y_{N_j} + 18y_{N_j+1} - 24y_{N_j+2} + 14y_{N_j+3} - 3y_{N_j+4}) - c_{j+1}y_{N_j} = 0$$

$$3B_j(l_j)y_{N_j-4} + [-2hB_j'(l_j) - 14B_j(l_j)]y_{N_j-3} + [8hB_j'(l_j) + 24B_j(l_j)]y_{N_j-2} +$$

$$+ [-10hB_j'(l_j) - 18B_j(l_j)]y_{N_j-1} + [4hB_j'(l_j) + 5B_j(l_j) - 4hB_{j+1}'(0) + 5B_{j+1}(0) -$$

$$- 2h^3 c_{j+1}]y_{N_j} + [10hB_{j+1}'(0) - 18B_{j+1}(0)]y_{N_j+1} + [-8hB_{j+1}'(0) + 24B_{j+1}(0)]y_{N_j+2} +$$

$$+ [2hB_{j+1}'(0) - 14B_{j+1}(0)]y_{N_j+3} + 3B_{j+1}(0)y_{N_j+4} = 0.$$

Особенностью при решении систем уравнений в задачах с граничными условиями методом конечных разностей является то, что матрица коэффициентов левой части системы оказывается разрежённой, содержащей множество нулевых элементов. Это связано с тем, что в конечно-разностных выражениях для вычисления производной используется несколько соседних узлов, а не все узлы сетки.

Результатом применения метода конечных разностей к задаче (1) - (5) является однородная система алгебраических уравнений в матрично-векторной форме

$$A y = 0. \quad (6)$$

Элементы квадратной матрицы A порядка N образуются в ходе преобразований, приведённых выше. Они содержат искомые значения F , т.е.

$$a_{ij} = a_{ij}(F).$$

Компоненты вектора $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ соответствуют значениям прогибов в узловых точках. Ненулевые значения элементов вектора A возможны лишь в том случае, если определитель матрицы A равен нулю.

Это требование приводит к алгебраическому уравнению

$$\det A(F) = 0, \quad (7)$$

решение, которого аналитическими методами затруднительно и достигается лишь в некоторых случаях.

Обсуждение результатов. Аналитические методы обладают невысокой степенью универсальности, ориентированы на решение простых задач. Приближённые значения корней можно найти графическими способами (7) с помощью современных компьютерных средств.

У графического способа есть преимущества: лёгкость обозрения в целом, непрерывность изменения аргумента [14-16]. С этой целью в координатной системе $F - \det(A)$ строится кривая, точки пересечения которой с осью F и определяют значения критических сил [17-19].

Рассмотрим конкретный пример с параметрами для вычислений первых критических сил [20].

Трёхпролётный стержень с параметрами $n = 3$, $d = \{300; 100\}$ Нм, $c = \{1000; 1500; 1000; 1500\}$ Н/м, $l = \{1, 1, 1\}$ м.

$$h = 0,05 \text{ м}, \quad B(x) = B_0 + B_1 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \text{ Па} \cdot \text{м}^4, \quad B_0 = 200 \text{ Па} \cdot \text{м}^4, \quad B_1 = 10 \text{ Па} \cdot \text{м}^4.$$

$\det(A)$

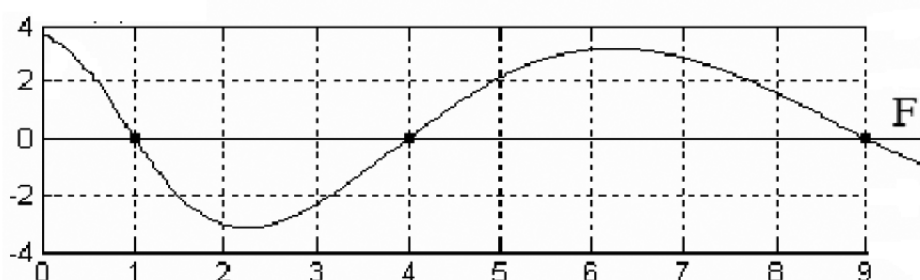


Рис. 3. Степень точности алгоритма

Fig. 3. The degree of accuracy of the algorithm

Кривая с экрана монитора показывает эффективность метода. Степень близости двух результатов говорит о высокой степени точности алгоритма (рис.3).

Первые элементы спектра собственных значений с монитора ЭВМ равны

$$F = \{947; 1301; 3560; 4092; \dots\} \text{ Н.}$$

Вывод. Аналитические методы в сочетании с методом конечных разностей решения характеристического уравнения дают точные значения критических сил в неклассических задачах устойчивости сжатых стержней.

Выявление критических сил, формы потери устойчивости имеет практическое значение: её анализ позволяет принимать обоснованные инженерные решения по внесению эффективных изменений в проект конструкции или сооружения с целью повышения устойчивости.

Библиографический список:

1. Масленников А.М. Динамика и устойчивость сооружений. Учебник и практикум для вузов. – М. : Издательство Юрайт. 2016. -366 с.
2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука. 1967. 984 с.
3. Леонтьев Н.Н. Основы строительной механики стержневых систем: Учеб. для строит. спец. вузов. / Н.Н. Леонтьев, Д.Н. Соболев, А.А. Амосов. – М.: Изд-во АСВ, 1996. – 541 с.
4. Безухов Н.И. Устойчивость и динамика в примерах и задачах: Учеб.пособие для строит. спец. вузов / Н.И. Безухов, О.В. Лужин, Н.В. Колкунов. – М.: Высшая школа, 1987. – 264 с.
5. Крамаренко А.А. Устойчивость и динамика сооружений: Сборник задач для самостоятельной работы студентов / Новосибир. гос. акад. стр-ва. – Новосибирск: НГАС, 1994. – 36 с.
6. Самарский А.А. Введение в численные методы. – 2-ое издание., - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987.-288 с.
7. Алфутов Н.А. Основы расчёта на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение. 1978. 312с.
8. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.,1989. -432 с.
9. Варвак П.М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчёта строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1977. 154 с.
10. Караманский Т.Д. Численные методы строительной механики. –М.: Стройиздат, 1981. - 436 с.
11. Sorin Micu, Ionel Roventă, Laurențiu Emanuel Temereancă. Approximation of the controls for the linear beam equation. Springer-Verlag London, 2016. URL: researchgate.net/publication/294736245 Approximation of the controls for the linear beam equation.
12. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
13. Ильин В.П., Карпов В.В., Масленников А.М. Численные методы решения задач строительной механики. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2005. - 425 с.
14. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Senov Kh. M. About a High-Precision Graphoanalytical Method of Determination of Critical Forces of an Oblate Rod. Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24-28, 2018. St. Petersburg. Russia 2018. P. 794-796.
15. Культербаев Х.П., Барагунова Л.А. О реализации проблемы собственных значений сжато-растянутого стержня на компьютере. Компьютерные технологии в строительстве: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. ДГТУ. –Махачкала: Алеф (ИП Овчинников), 2012. С. 90-94.
16. Шогенова М.М., Шогенов О.М., Барагунова Л.А. Решение задачи Эйлера об устойчивости стержня с неклассическими граничными условиями. Инженерный вестник Дона, 2021, №11. URL: <http://go.microsoft.com/fwlink/?LinkId=69157>.
17. Литвинов С.В., Языев Б.М., Бескопильный А.Н., Ананьев И.В. Расчёт на устойчивость стержней из ЭДТ-10 при начальной погиби стержня в виде S-образной кривой. Инженерный вестник Дона, 2012, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/620/.
18. Барагунова Л.А. Устойчивость предварительно сжимаемой арматуры в железобетонных балках. // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3797/.
19. Барагунова Л.А. О влиянии упругости опор на устойчивость сжатых стержней. Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). ООО «Издательский Дом – Юг», Кубанский гос. Ун-т, 2013, № 1 – 2. Стр. 49 – 54.
20. Барагунова Л.А., Шогенова М.М. Потеря устойчивости стержня при неравномерно распределённой нагрузке. Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4810/.

References:

1. Maslennikov A.M. Dynamics and Stability of Structures. Textbook and Practice for Higher Education Institutions. M. : Publishing house Yurait. 2016; 366. (In Russ)
2. Volmir A.S. Stability of deformable systems. Moscow : Nauka. 1967; 984. (In Russ)
3. Leontiev N.N. Fundamentals of Structural Mechanics of Rod Systems: Textbook for Building Specialties of Higher Education Institutions. / N.N. Leontiev, D.N. Sobolev, A.A. Amosov. Moscow: Publishing House ASV, 1996; 541. (In Russ)
4. Bezukhov N.I. Stability and Dynamics in Examples and Problems: Textbook for Building Specialties of Higher Education Institutions / N.I. Bezukhov, O.V. Luzhin, N.V. Kolkunov. - Moscow: High School, 1987; 264. (In Russ)
5. A.A. Kramarenko, Stability and Dynamics of Structures: Collection of Tasks for Independent Studying / Novosibirsk State Academy of Civil Engineering. Novosibirsk: NGAS, 1994; 36. (In Russ)
6. Samarsky A.A. Introduction in numerical methods. - 2nd edition. M.: Nauka. Main Editorial Office for Physical and Mathematical Literature, 1987. (In Russ)
7. Alfutov N.A. Fundamentals of calculating the stability of elastic systems. Moscow: Mashinostroenie. 1978;312. (In Russ)
8. Samarsky A.A., Gulín A.V. Numerical Methods. Moscow: Nauka, G. Ed. of Physics and Mathematics, 1989; 432. (In Russ)
9. Varvak P.M., Varvak L.P. Method of grids in the tasks of calculating building structures. Moscow: Stroyizdat. 1977; 154.

10. Karamansky T.D. Numerical methods of structural mechanics. M.: Stroyizdat. 1981; 436. (In Russ)
11. Sorin Micu, Ionel Roventă, Laurențiu Emanuel Temereancă. Approximation of the controls for the linear beam equation. Springer-Verlag London, 2016. URL: researchgate.net/publication/294736245 Approximation of the controls for the linear beam equation.
12. Verzhbitsky V.M. Fundamentals of numerical methods. Moscow: High school, 2002; 840. (In Russ)
13. Ilyin V.P., Karpov V.V., Maslennikov A.M. Numerical methods of solving problems of structural mechanics. - Moscow: Publishing house ASV; Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University of Civil Engineering and Architecture, 2005; 425. (In Russ)
14. Kulterbaev Kh. P., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Senov Kh. M. About a High-Precision Graphoanalytical Method of Determination of Critical Forces of an Oblate Rod. Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24-28, 2018. St. Petersburg. Russia 2018; 794-796. (In Russ)
15. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A. About realization of the problem of eigenvalues of a compressed-stretched rod on computer. Computer Technology in Construction: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. DSTU. - Makhachkala: Alef (IP Ovchinnikov), 2012; 90-94. (In Russ)
16. Shogenova M.M., Shogenov O.M., Baragunova L.A. Solving the Euler problem on the stability of a rod with non-classical boundary conditions. *Engineering Herald of the Don*. 2021, №11. URL: <http://go.microsoft.com/fwlink/?LinkId=69157>. (In Russ)
17. Litvinov S.V., Yazyev B.M., Beskopylny A.N., Ananyev I.V. Calculation of Stability of Rods from EDT-10 with Initial Death of Rod as S-Curve. *Engineering Herald of the Don* 2012, 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/620/.
18. Baragunova L.A. Stability of pre-compressed reinforcement in reinforced concrete beams. *Engineering Herald of the Don* 2016, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3797/. (In Russ)
19. Baragunova L.A. On the effect of elasticity of supports on the stability of compressed rods. *Science. Technique. Technology (Polytechnic Bulletin)*. LLC "Publishing House-Yug", Kuban State University, 2013;1 – 2: 49 - 54. (In Russ)
20. Baragunova L.A., Shogenova M.M. Stability loss of a rod under unevenly distributed load. *Engineering Herald of the Don*. 2018;1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4810/. (In Russ)

Сведения об авторах:

Барагунова Лялюся Адальбиевна, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и механики; baragunoval@mail.ru

Шогенова Марьяна Мухарбиевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и механики; shogenova_mar@mail.ru

Information about the authors:

Lyalyusya A. Baragunova, Senior Lecturer, Department Building Structures and Mechanics; baragunoval@mail.ru

Maryana M. Shogenova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department Building Structures and Mechanics; shogenova_mar@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.07.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 21.08.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.08.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-123-132

Оригинальная статья / Original Paper

Сочетание динамических и кинематических векторных возмущений балок
А.М. Казиев, З.Р. Лихов, А.Я. Джанкулаев, И.Ю. Кумышев, Г.А. Шигалугов
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия.

Резюме. Цель. Целью исследования является изучение работы балок при одновременном влиянии сочетанных воздействий: моменты на концах, кинематические гармонические перемещения обоих опор, распределённой нагрузки с разными амплитудами, частотами, фазами, наличии вязкого трения. **Метод.** Исследование основано на решении краевой задачи и моделировании. **Результат.** Исследованы вынужденные поперечные колебания балок постоянного сечения с учётом демпфирования. Рассмотрены непериодические, периодические и гармонические колебания балки от векторных возмущений. Приведены примеры решения для различных условий закреплений балки. **Вывод.** Авторскую разработку можно адаптировать к колебаниям стержней переменного сечения, к колебаниям континуально-дискретных стержней. Полученные передаточные функции позволяют рассчитывать элементы зданий в виде стержней на случайные процессы, учитывая их корреляцию.

Ключевые слова: балка, вязкое трение, частота, динамические и кинематические возмущения

Для цитирования: А.М. Казиев, З.Р. Лихов, А.Я. Джанкулаев, И.Ю. Кумышев, Г.А. Шигалугов. Сочетание динамических и кинематических векторных возмущений балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-123-132

Combination of dynamic and kinematic vector perturbations of beams
A.M. Kaziev, Z.R. Likhov, A.Ya. Dzhanakulaev, I.Yu. Kumyshev, G.A. Shigalugov
H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
173 Chernyshevskogo Str., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to study the operation of beams under the simultaneous influence of combined actions: moments at the ends, kinematic harmonic displacements of both supports, a distributed load with different amplitudes, frequencies, phases, and the presence of viscous friction. **Method.** The study is based on solving a boundary value problem and modeling. **Result.** Investigated the forced transverse vibrations of beams with constant cross-section subject to damping. Considered non-periodic, periodic and harmonic oscillations of the beams from vector perturbations. Examples of solutions for various conditions bearings beams. **Conclusion.** The author's development can be adapted to vibrations of bars of variable cross section, to vibrations of continuous-discrete bars. The resulting transfer functions make it possible to calculate building elements in the form of rods for random processes, taking into account their correlation.

Keywords: beam, viscous friction, frequency, dynamic and kinematic disturbances

For citation: A.M. Kaziev, Z.R. Likhov, A.Ya. Dzhanakulaev, I.Yu. Kumyshev, G.A. Shigalugov. Combination of dynamic and kinematic vector perturbations of beams. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3): 123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-123-132.

Введение. Колебание балки от различных видов нагрузок динамических и кинематических в отдельности хорошо изучены [1, 5, 7]. В данной работе ставилась задача изучения работы балок при одновременном влиянии пяти воздействий: моменты на концах, кинематические гармонические перемещения обоих опор, распределённой нагрузки с разными амплитудами, частотами, фазами, наличии вязкого трения [2, 3, 4].

Постановка задачи. Рассмотрим вынужденные установившиеся колебания балки при гармонических возмущениях в общем случае. Колебания балки рассмотрим на известных при-
мерах.

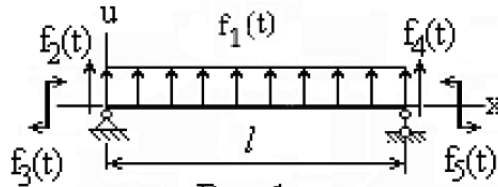


Рис. 1. Вынужденные установившиеся колебания балки при гармонических возмущениях
 Fig. 1. Forced steady oscillations of the beam under harmonic disturbances

1. Шарнирно опертая балка

Математическая модель задачи имеет вид

$$u^{IV} + \gamma \ddot{u} + \varepsilon \dot{u} = f_1(t), \quad f_1(t) = q(t)/EJ, \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty, \quad (1)$$

$$u(0, t) = f_2(t), \quad EJ u''(0, t) = f_3(t), \quad u(l, t) = f_4(t), \quad EJ u''(l, t) = f_5(t). \quad (2)$$

Здесь $\gamma = m/EJ$, $\varepsilon = \eta m/EJ$, $m = \rho S$ – погонная масса балки, η – коэффициент демпфирования, EJ – жёсткость балки на изгиб, $f_1(t)$ – соответствует распределённой нагрузке, $f_2(t)$, $f_4(t)$ – функции вертикальных перемещений левого и правого концов балки, $f_3(t)$, $f_5(t)$ – моментные нагрузки, приложенные к левому и правому концам балки.

Поскольку система является линейной с пятью входными воздействиями, целесообразно воспользоваться принципом суперпозиции

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^5 u_j(x, t),$$

где $u_j(x, t)$ – функция перемещений при автономном действии возмущения $f_j(t)$. Пусть внешние возмущения представлены векторным гармоническим процессом

$$f_k(t) = a_k e^{i(\Omega_k t + \psi_k)} = A_k e^{i\Omega_k t}, \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (3)$$

где

$$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}, \quad A_k = a_k e^{i\psi_k}, \quad e(t) = \{e^{i\Omega_1 t}, e^{i\Omega_2 t}, \dots, e^{i\Omega_5 t}\}, \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

a_k, A_k – вещественные и комплекснозначные амплитуды, ψ_k – начальные фазы или сдвиги фаз. С учётом (3), задача (1), (2) становится конкретной краевой задачей без начальных условий.

Вопрос далее будет состоять в том, чтобы отыскать её решение $u(x, t)$. Выходной процесс $u(x, t)$ в общем случае не будет гармоническим и, даже, периодическим. В то же время он будет суммой пяти гармоник с разными частотами Ω_k . Периодическими такие колебания будут лишь в том случае, если отношения Ω_j / Ω_k окажутся рациональными числами. Если все частоты возмущений одинаковые, т. е. $\Omega_1 = \Omega_2 = \dots = \Omega_5 = \Omega$, то выходной процесс будет гармоническим. Для этой задачи можно и амплитуду колебаний. Для вынужденных колебаний рассмотрим три варианта установившихся режимов: непериодические негармонические колебания; периодические негармонические колебания; гармонические колебания.

В первом и втором случаях покажем графики изменения перемещений во времени, в третьем случае найдём функцию амплитуды колебаний и построим формы её распределения вдоль оси. Реализацию принципа суперпозиции будем осуществлять в следующем порядке:

решим автономные задачи, когда на систему действует лишь одно из воздействий с единичной амплитудой $e^{i\Omega_k t}$.

В результате найдём гармоники $v_k(x, t)$, $k = 1, 2, \dots, 5$. Решение задачи от векторного воздействия будет суммой (скалярным произведением векторов)

$$u(x, t) = (A, v). \quad (4)$$

Применяя метод разделения переменных решение $v_k(x, t)$ будем искать в виде

$$v_k(x, t) = H_k(x, i\Omega_k) e^{i\Omega_k t}, \quad (5)$$

Рассмотрим автономные задачи.

1) Задача о колебаниях от поперечной нагрузки (рис. 2) имеет вид

$$v_1^{IV} + \gamma \ddot{v}_1 + \varepsilon \dot{v}_1 = e^{i\Omega_1 t}, \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty, \quad (6)$$

$$v_1(0, t) = 0, \quad v_1''(0, t) = 0, \quad v_1(l, t) = 0, \quad v_1''(l, t) = 0. \quad (7)$$

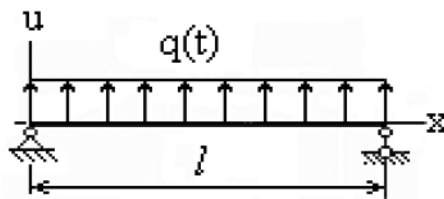


Рис. 2. Колебания от поперечной нагрузки
 Fig. 2. Transverse load vibrations

Подстановка (5) в (6), (7) при $k = 1$ даёт краевую задачу относительно передаточной функции H_1 при $a_1=1$

$$H_1^{IV} - b_1^4 H_1 = 1, \quad b_1^4 = -\gamma(i\Omega_1)^2 - \varepsilon(i\Omega_1), \quad x \in (0, l),$$

$$H_1(0, i\Omega_1) = 0, \quad H_1''(0, i\Omega_1) = 0, \quad H_1(l, i\Omega_1) = 0, \quad H_1''(l, i\Omega_1) = 0, \quad (8)$$

Решение неоднородного обыкновенного дифференциального уравнения состоит из суммы решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения

$$H_1(x, i\Omega_1) = C_1 \sin b_1 x + C_2 \cos b_1 x + C_3 \operatorname{sh} b_1 x + C_4 \operatorname{ch} b_1 x - b_1^{-4}. \quad (9)$$

Здесь C_i – неизвестные постоянные интегрирования. Для использования граничных условий (8), продифференцируем (9) дважды

$$H_1''(x, i\Omega_1) = b_1^2 (-C_1 \sin b_1 x - C_2 \cos b_1 x + C_3 \operatorname{sh} b_1 x + C_4 \operatorname{ch} b_1 x). \quad (10)$$

(6)-(8) дают систему линейных уравнений относительно C_i

$$C_2 + C_4 - b_1^{-4} = 0, \quad -C_2 + C_4 = 0,$$

$$C_1 \sin b_1 l + C_2 \cos b_1 l + C_3 \operatorname{sh} b_1 l + C_4 \operatorname{ch} b_1 l = b_1^{-4},$$

$$-C_1 \sin b_1 l - C_2 \cos b_1 l + C_3 \operatorname{sh} b_1 l + C_4 \operatorname{ch} b_1 l = 0.$$

Имеем решение

$$C_2 = C_4 = \frac{1}{2b_1^4}, \quad C_1 = \frac{1}{2b_1^4} \frac{1 - \cos b_1 l}{\sin b_1 l}, \quad C_3 = \frac{1}{2b_1^4} \frac{1 - \operatorname{ch} b_1 l}{\operatorname{sh} b_1 l}.$$

Следовательно, получено первое искомое уравнение

$$H_1(x, i\Omega_1) = \frac{1}{2b_1^4} \left(\frac{1 - \cos b_1 l}{\sin b_1 l} \sin b_1 x + \cos b_1 x + \frac{1 - \operatorname{ch} b_1 l}{\operatorname{sh} b_1 l} \operatorname{sh} b_1 x + \operatorname{ch} b_1 x - 2 \right). \quad (11)$$

Она описывает гармонические колебания, амплитуда которых определяется как модуль комплексной функции

$$a_u(x) = |A_1 H_1(x, i\Omega_1)|.$$

2) Правый конец стержня совершает гармонические колебания, остальные возмущения отсутствуют (рис. 3).

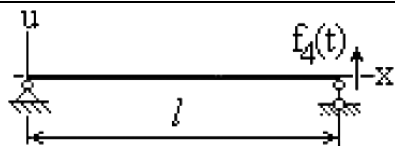


Рис. 3. Гармонические колебания стержня

Fig. 3. Harmonic vibrations of the rod

Соответствующие функции задачи принимают вид

$$f_1(t) = 0, \quad f_2(t) = 0, \quad f_3(t) = 0, \quad f_4(t) = e^{i\Omega_4 t}, \quad f_5(t) = 0.$$

Ищется функция $v_4(x, t)$ из задачи, составленной как в предыдущих случаях

$$v_4^{IV} + \gamma \ddot{v}_4 + \varepsilon \dot{v}_4 = 0 \quad x \in (0, l) \quad (12)$$

$$v_4(0, t) = 0, \quad v_4''(0, t) = 0, \quad v_4(l, t) = e^{i\Omega_4 t}, \quad v_4''(l, t) = 0, \quad t > -\infty. \quad (13)$$

По процедуре метода разделения переменных $v_4(x, t)$ представляется как произведение

$$v_4(x, t) = H_4(x, i\Omega_4) e^{i\Omega_4 t}. \quad (14)$$

Его подстановка в основное уравнение (12) и граничные условия (13) приводит к краевой задаче для передаточной функции

$$H_4^{IV} - b_4^4 H_4 = 0, \quad b_4^4 = -\gamma(i\Omega_4)^2 - \varepsilon(i\Omega_4), \quad x \in (0, l), \\ H_4(0, i\Omega_4) = 0, \quad H_4''(0, i\Omega_4) = 0, \quad H_4(l, i\Omega_4) = 1, \quad H_4''(l, i\Omega_4) = 0. \quad (15)$$

Её решение имеет вид (16)

$$H_4(x, i\Omega_4) = C_1 \sin b_4 x + C_2 \cos b_4 x + C_3 \operatorname{sh} b_4 x + C_4 \operatorname{ch} b_4 x. \quad (16)$$

$$H_4''(x, i\Omega_4) = b_4^2 (-C_1 \sin b_4 x - C_2 \cos b_4 x + C_3 \operatorname{sh} b_4 x + C_4 \operatorname{ch} b_4 x). \quad (17)$$

Подставим (16), (17) в граничные условия (15)

$$C_2 + C_4 = 0, \quad -C_2 + C_4 = 0, \\ C_1 \sin b_4 l + C_2 \cos b_4 l + C_3 \operatorname{sh} b_4 l + C_4 \operatorname{ch} b_4 l = 1, \\ -C_1 \sin b_4 l - C_2 \cos b_4 l + C_3 \operatorname{sh} b_4 l + C_4 \operatorname{ch} b_4 l = 0.$$

Отсюда имеем

$$C_2 = C_4 = 0, \quad C_1 = \frac{1}{2 \sin b_4 l}, \quad C_3 = \frac{1}{2 \operatorname{sh} b_4 l}.$$

Значит

$$H_4(x, i\Omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin b_4 x}{\sin b_4 l} + \frac{\operatorname{sh} b_4 x}{\operatorname{sh} b_4 l} \right). \quad (18)$$

Таким образом, $v_4(x, t)$ по (14) стала известной.

Амплитуда вынужденных гармонических колебаний определяется как модуль комплексной функции

$$a_u(x) = |A_4 H_4(x, i\Omega_2)|.$$

3) К правому концу приложена моментная нагрузка (рис. 4), остальные возмущения нулевые.

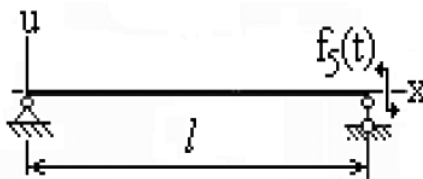


Рис. 4. Моментная нагрузка

Fig. 4. Torque load

Поэтому $f_1(x, t) \equiv f_2(t) \equiv f_3(t) \equiv f_4(t) \equiv 0$, $f_5(t) = e^{i\Omega_5 t}$,

$$v_5(0, t) = 0, \quad v_5''(0, t) = 0, \quad v_5(l, t) = 0, \quad EJ v_5''(l, t) = e^{i\Omega_5 t}.$$

Сначала, как и в предыдущих случаях, получим краевую задачу относительно передаточной функции $H_5^{IV} - b_5^4 H_5 = 0$, $b_5^4 = -(i\Omega_5)^2 - \varepsilon(i\Omega_5)$, $x \in (0, l)$,

$$H_5(0, i\Omega_5) = 0, \quad H_5''(0, i\Omega_5) = 0, \quad H_5(l, i\Omega_5) = 0, \quad EJ H_5''(l, i\Omega_5) = 1. \quad (19)$$

Нетрудно показать, что её решение имеет вид

$$H_5(x, i\Omega_5) = C_1 \sin b_5 x + C_2 \cos b_5 x + C_3 \operatorname{sh} b_5 x + C_4 \operatorname{ch} b_5 x. \quad (20)$$

$$H_5''(x, i\Omega_5) = b_5^4 (-C_1 \sin b_5 x - C_2 \cos b_5 x + C_3 \operatorname{sh} b_5 x + C_4 \operatorname{ch} b_5 x). \quad (21)$$

Подстановка (20), (21) в граничные условия (19) даёт

$$C_2 + C_4 = 0, \quad -C_2 + C_4 = 0,$$

$$C_1 \sin b_5 l + C_2 \cos b_5 l + C_3 \operatorname{sh} l b_5 + C_4 \operatorname{ch} l b_5 = 0,$$

$$EJ b_5^2 (-C_1 \sin b_5 l - C_2 \cos b_5 l + C_3 \operatorname{sh} l b_5 + C_4 \operatorname{ch} b_5 l) = 1.$$

Отсюда имеем

$$C_2 = C_4 = 0, \quad C_1 = -\frac{1}{2 EJ b_5^2 \sin b_5 l}, \quad C_3 = \frac{1}{2 EJ b_5^2 \operatorname{sh} b_5 l}.$$

$$\text{Значит, } H_5(x, i\Omega_5) = \frac{1}{2 EJ b_5^2} \left(\frac{\operatorname{sh} b_5 x}{\operatorname{sh} b_5 l} - \frac{\sin b_5 x}{\sin b_5 l} \right). \quad (22)$$

Функция $v_5(x, t)$ и амплитуда колебаний стали известны.

Недостающие передаточные функции $H_2(x, i\Omega_2)$, $H_3(x, i\Omega_3)$, могут быть выписаны заменив в (18) и (22) x на $l-x$, а именно

$$H_2(x, i\Omega_2) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin b_2(l-x)}{\sin b_2 l} + \frac{\operatorname{sh} b_2(l-x)}{\operatorname{sh} b_2 l} \right), \quad b_2^4 = -\gamma(i\Omega_2)^2 - \varepsilon(i\Omega_2), \quad (23)$$

$$H_3(x, i\Omega_3) = \frac{1}{2 EJ b_3^2} \left(\frac{\operatorname{sh} b_3(l-x)}{\operatorname{sh} b_3 l} - \frac{\sin b_3(l-x)}{\sin b_3 l} \right), \quad b_3^4 = -\gamma(i\Omega_3)^2 - \varepsilon(i\Omega_3). \quad (24)$$

При равенстве частот, т. е. $\Omega_1 = \Omega_2 = \dots = \Omega_5 = \Omega$, суммарные колебания будут гармоническими, и формула (2) примет вид

$$u(x, t) = [A, H(x, i\Omega)] e^{i\Omega t},$$

причём компоненты вектора $H(x, i\Omega)$ определяются по (11), (18), (22), (23), (24). Соответствующая амплитуда выписывается легко

$$a_u(x) = | [A, H(x, i\Omega)] |. \quad (25)$$

2. Балка с заделанным левым и шарнирно опертым правым концом.

Теперь, математическая модель задачи примет вид

$$u^{IV} + \gamma \ddot{u} + \varepsilon \dot{u} = f_1(t), \quad f_1(t) = q(t)/EJ, \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty. \quad (26)$$

$$u(0, t) = f_2(t), \quad u'(0, t) = f_3(t), \quad u(l, t) = f_4(t), \quad EJ u''(l, t) = f_5(t).$$

Решение этой задачи осуществляем точно в такой же последовательности, как и в предыдущей задаче. Применяя принцип суперпозиции, решаем пять автономных задач от каждого возмущения в отдельности при единичной амплитуде $e^{i\Omega_k t}$.

После решения пяти автономных задач получены передаточные функции

$$H_1(x, i\Omega_1) = \frac{(1 - H_2(x, i\Omega_1) - H_4(x, i\Omega_1))}{b_1^4},$$

$$H_2(x, i\Omega_2) = \frac{\text{ch} b_2 l \cdot \sin b_2(l-x) + \cos b_2 l \cdot \text{sh} b_2(l-x)}{B_2},$$

$$H_3(x, i\Omega_3) = -\frac{\text{sh} b_3 l \cdot \sin b_3(l-x) - \sin b_3 l \cdot \text{sh} b_3(l-x)}{B_3 \cdot b_3},$$

$$H_4(x, i\Omega_4) = \frac{(\text{ch} b_4 l + \cos b_4 l) \cdot (\text{sh} b_4 x - \sin b_4 x) + (\sin b_4 l + \text{sh} b_4 l) \cdot (\cos b_4 x - \text{ch} b_4 x)}{2 \cdot B_4},$$

$$H_5 = \frac{(\text{ch} b_5 l - \cos b_5 l) \cdot (\text{sh} b_5 x - \sin b_5 x) + (\sin b_5 l - \text{sh} b_5 l) \cdot (\cos b_5 x - \text{ch} b_5 x)}{2 \cdot B_5 \cdot b_5^2 \cdot EJ},$$

где $B_j = \text{ch} b_j l \cdot \sin b_j l - \cos b_j l \cdot \text{sh} b_j l$, $b_j = -\gamma(i\Omega_j)^2 - \varepsilon(i\Omega_j)$, $j = 1, 2, 3, 4, 5$.

Алгоритм процесса нахождения этих функций в точности совпадает с предыдущей задачей, поэтому представляем только полученные результаты.

Искомые гармоники представляются в форме (25), тогда решение задачи (26) при векторных возмущениях можно найти по формуле (4).

Обсуждение результатов. Возьмём стальную балку ($\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $E = 200 \text{ ГПа}$, $\eta = 1 \text{ с}^{-1}$) из двутавра № 14 ($J = 572 \text{ см}^4$, $S = 17,4 \text{ см}^2$), со свободно опертыми концами пролётом $l = 6 \text{ м}$.

Определим погонную массу и коэффициент

$$m = \rho S = 7800 \cdot 17,4 \cdot 10^{-4} = 13,57 \text{ кг/м}, \quad \gamma = \frac{m}{EJ} = \frac{13,57}{200 \cdot 10^9 \cdot 572 \cdot 10^{-8}} = 11,86 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2 / \text{м}^4$$

Первые элементы спектра собственных частот которого, имеют значения

$$\{ 79,59, 318,39, 716,37, \dots \} \text{ с}^{-1}.$$

Пусть характеристики возмущений будут следующими

$$a_q = 700 \text{ Н/м}, \quad a_2 = 5 \text{ мм}, \quad a_3 = 4900 \text{ Нм}, \quad a_4 = 10 \text{ мм}, \quad a_5 = 980 \text{ Нм}.$$

Значения воздействий подобраны так, чтобы перемещения, вызванные ими, были соизмеримы. Сначала рассмотрим негармонические непериодические колебания, когда частоты и начальные фазы имеют значения

$$\Omega = \{ 5, 5\sqrt{2}, 5\pi, 23,4, 33,32 \} \text{ с}^{-1}, \quad \psi = \{ 0, 0, \pi, 0, \pi \}.$$

Обратим внимание на то, что выбранные начальные фазы соответствуют идеально синфазным возмущениям, т. е. имеющим направления, одновременно способствующие прогибу балки вверх или вниз.

Для середины балки ($x = \frac{l}{2} = 3 \text{ м}$) проведены вычисления по формуле (4) для интервала времени $t \in [0; 2] \text{ с}$, и результаты представлены кривой рис. 5.

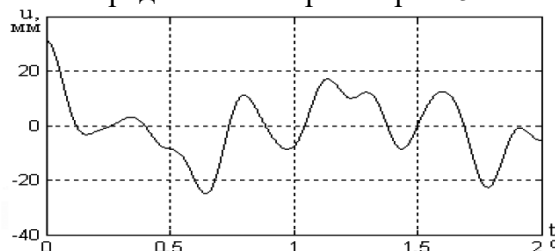


Рис. 5. Негармонические непериодические колебания
Fig. 5. Non-harmonic non-periodic vibrations

Видно, что колебания носят негармонический непериодический характер и представляют сумму гармоник с разными частотами и амплитудами.

С теми же данными, но при частотах возмущений $\Omega = \{ 85, 68, 51, 34, 17 \} \text{ с}^{-1}$ колебания будут периодическими, так как они кратны 17 с^{-1} .

Вычисления, проведённые при амплитудах возмущений $a_1 = 700 \text{ Н/м}$, $a_2 = 5 \text{ мм}$, $a_3 = 2900 \text{ Нм}$, $a_4 = 10 \text{ мм}$, $a_5 = 980 \text{ Нм}$, дали результаты, представленные графиками рис. 6.

Легко заметить, что вновь кривая является суммой гармоник, но уже колебания носят периодический характер. Период колебаний определяется по Ω_5 , а именно

$$T = \frac{2\pi}{\Omega_5} = \frac{2 \cdot 3,141}{17} = 0,3695 \text{ с}^{-1}.$$

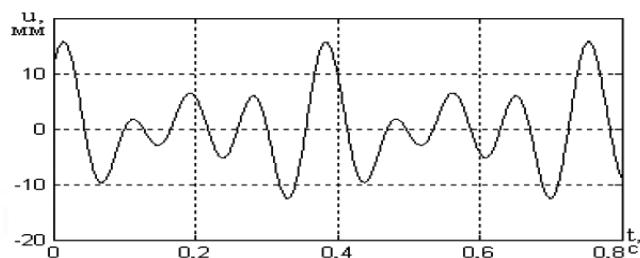


Рис. 6. Периодические колебания
Fig. 6. Periodic fluctuations

Теперь обратимся к гармоническим колебаниям, когда все частоты возмущений равны между собой

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \dots = \Omega_5 = \Omega.$$

Пусть при этом начальные фазы будут такими же, как прежде.

По формулам (25) проведены вычисления для амплитуд колебаний, результаты которых представлены графиками рис. 7.

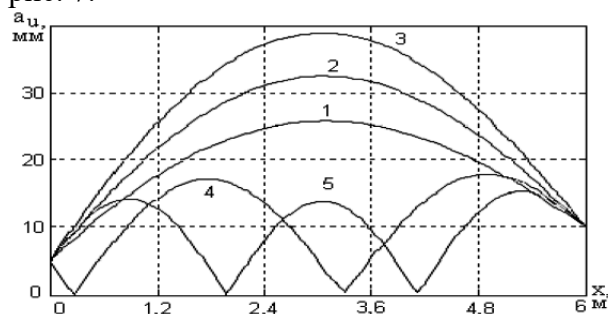


Рис. 7. Амплитуды колебаний
Fig. 7. Oscillation amplitude

Показаны кривые, полученные при возрастающих значениях частот $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ (кривая 1), 36 с^{-1} (2), 45 с^{-1} (3), 307 с^{-1} (4), 625 с^{-1} (5), и амплитуд возмущений $a_1 = 700 \text{ Н/м}$, $a_2 = 5 \text{ мм}$, $a_3 = 2900 \text{ Нм}$, $a_4 = 10 \text{ мм}$, $a_5 = 980 \text{ Нм}$ при сохранении остальных параметров.

Анализ кривых обнаруживает следующее. При сравнительно небольшой частоте возмущений (кривая 1) отклонения близки к статическим (например, в середине пролёта $u_{\text{стат}} \approx 25,6 \text{ мм}$). При росте частоты возмущений, она приближается к первой собственной частоте, и потому постепенно амплитуды увеличиваются (кривые 2, 3). Форма колебаний совпадает с первой собственной формой.

При дальнейшем возрастании частот возмущений достигается первая собственная частота балки, т. е. имеет место равенство $\Omega = 79,59 \text{ с}$, колебания становятся резонансными с весьма большими амплитудами (они здесь не показаны).

При частотах возмущений, превышающих первую собственную частоту, но меньших второй собственной частоты, сначала первая собственная форма в основном сохраняется, затем

появляется и играет основную роль вторая собственная форма (кривая 4). Дальнейший рост частот возмущений приводит к появлению высших форм колебаний (кривая 5).

Исследуем влияние сдвига фаз возмущений на вынужденные колебания. С этой целью проведены вычисления по той же формуле (25), и результаты представлены кривыми рис. 8.

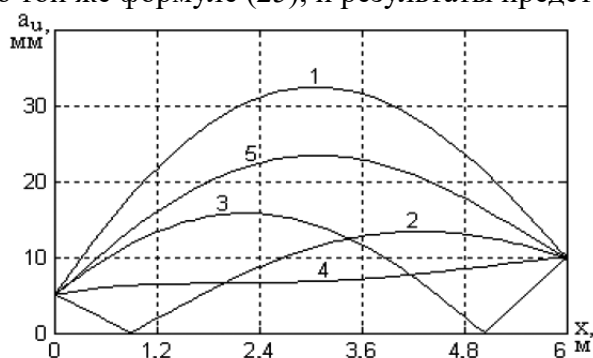


Рис. 8. Влияние сдвига фаз возмущений на вынужденные колебания
Fig. 8. Influence of phase shift of perturbations on forced oscillations

При фиксированной частоте возмущений Ω и предыдущих значениях других параметров рассмотрены четыре случая различных сочетаний начальных фаз

$$\begin{aligned} \Omega = 35 \text{ с}^{-1}, \quad \psi = \{ 0, 0, \pi, 0, \pi \} & \text{(кривая 1)}, \quad \psi = \{ 0, \pi, 0, 0, \pi \} & \text{(кривая 2)}, \\ \psi = \{ 0, 0, \pi, \pi, 0 \} & \text{(кривая 3)}, \quad \psi = \{ 0, \pi, 0, \pi, 0 \} & \text{(кривая 4)}, \\ \psi = \{ 0, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2, \pi/2 \} & \text{(кривая 5)}. \end{aligned} \quad (27)$$

Кривая 1 соответствует идеально синфазным возмущениям, одновременно имеющим направления, способствующие прогибу балки вверх или вниз. Поэтому амплитуды являются наибольшими по всей серии вычислений.

Кривая 2 изображает колебания в том случае, когда перемещения левого конца и моментная нагрузка здесь же находятся в идеальной противофазе с остальными возмущениями. Поэтому недалеко от левого конца появилась нулевая точка, и, вообще, значения амплитуд заметно уменьшились.

Аналогичные эффекты имеют место и в том случае, когда возмущения на правом конце находятся в противофазе с остальными возмущениями (кривая 3).

Наименьшие отклонения отмечены для случая, когда концевые возмущения находятся в идеальной противофазе с поперечной нагрузкой (кривая 4).

Кривая 5 построена для возмущений, которые занимают промежуточное положение между случаями 1 и 4. Естественно, соответствующие амплитуды принимают также промежуточные значения.

Вывод. Поперечные колебания стержней, являются опасными для их прочности и устойчивости. Особенно опасны резонансы, когда частоты близки к собственным частотам балок.

Данную разработку можно адаптировать к колебаниям стержней переменного сечения, к колебаниям континуально-дискретных стержней.

Реальные сооружения подвергаются одновременному действию динамических и кинематических воздействий, имеющие разные параметры. Кроме того, многие воздействия являются случайными.

Полученные передаточные функции позволяют рассчитывать элементы зданий в виде стержней на случайные процессы, учитывая их корреляцию.

Приведённые здесь примеры свидетельствуют о необходимости расширения такой тематики исследований с включением и других типов колебаний: комбинаций продольных с поперечными, угловыми, крутильными, параметрическими и т.д.

Библиографический список:

1. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа. 1979. – 416 с.
2. Джанкулаев А.Я., Казиев А.М. Вынужденные колебания стержней при комбинированных возмущениях // Избранные труды научного семинара «Механика». Вып. 1. Нальчик: Каб.-Балк. гос. сель. акад., 2002. С.195-199.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 560 с.
4. Казиев А. М. Колебания однородных и континуально-дискретных балок при векторных гармонических и случайных возмущениях: Дис. канд. техн. наук : 05.23.17 Нальчик, 2005 130 с. РГБ ОД, 61:05-5/3003.
5. Культербаев Х.П. Кинематически возбуждаемые колебания континуально-дискретной многопролётной балки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. Труды X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 2011. №4, часть 2. С. 198-200.
6. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
7. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
8. Клаф З., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
9. I.V. Kudinov, V.A. Kudinov. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015; 88(2): 406-422.
10. Amabili, M., *Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates*. Cambridge University Press, New York, USA. (2008)
11. Refined beam elements with arbitrary cross-section geometries / E. Carrera, G. Giunta, P. Nali [and others] // *Computers and Structures*. 2010. V. 88, No 5-6. pp. 283-293.
12. Elishakoff I. *Eigenvalues of Inhomogeneous Structures: Unusual Closed-form Solutions*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
13. Hsu J.C., Lai H.Y., Chen C.K. Free vibration of non-uniform EulerBernoulli beams with general elastically end constraints using Adomian modified decomposition method. *Journal of Sound and Vibration*. 2008;318: 965-981.
14. Free vibration behavior of exponential functionally graded beams with varying cross-section / A.A Haasen, T. Abdelouahed, A.M. Sid [and others.] // *Journal of Vibration and Control*. 2011. V. 17, No 2. pp. 311-318.
15. Maurini C., Pofiri M., Pouget J. Numerical methods for modal analysis of stepped piezoelectric beams // *Journal of Sound and Vibration*. 2006. V. 298, No 4-5. pp. 918-933.
16. Zheng T. X., Ji T. J. Equivalent representations of beams with periodically variable crosssections // *Engineering Structures*. 2011. V. 33, No 3. pp. 706-719.
17. Tejada A. A Mode-Shape-Based Fault Detection Methodology for Cantilever Beams: Tech. Rep.: CR-2009-215721: NASA, 2009.
18. Alshorbagy A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F. Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method // *Applied Mathematical Modelling*. 2011. V. 35, No 1. pp. 412-425.
19. Huang Y., Li X. F. A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section // *Journal of Sound and Vibration*. 2010. V. 329, No 11. pp. 2291-2303.
20. Mohanty S.C., Dash R.R., Rout T. Free vibration of a functionally graded rotating Timoshenko beam using FEM // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2013. V. 16, No 2. pp. 405-418.
21. Ke L.L., Yang J., Kitipornchai S. An analytical study on the nonlinear vibration of functionally graded beams // *Mechanica*. 2010. V. 45, No 6. pp. 743-752.
22. Simsek M., Cansiz S. Dynamics of elastically connected doublefunctionally graded beam systems with different boundary conditions under action of a moving harmonic load. *Composite Structures*. 2012; 94(9): 2861-2878.

References:

1. Biderman V.L. Applied theory of mechanical oscillations. M.: *Higher school*. 1979; 416. (In Russ)
2. Dzhankulaev A.Ya., Kaziev A.M. Forced vibrations of rods under combined perturbations. *Selected works of the scientific seminar "Mechanics"*. Nalchik: Kab.-Balk. State village acad., 2002;(1):195-199.
3. Babakov I.M. Theory of vibrations. M.: *Nauka*. 1968; 560. (In Russ)
4. Kaziev A. M., Oscillations of Homogeneous and Continuum-Discrete Beams under Vector Harmonic and Random Perturbations, Cand. cand. tech. Sciences: 05.23.17 Nalchik, 2005; 130. RSL OD, 61:05-5/3003. (In Russ)
5. Kulterbaev Kh.P. Kinematically excited vibrations of a continuous-discrete multi-span beam // *Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Proceedings of the X All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics*. 2011; 4 (2): 198-200. (In Russ)
6. Timoshenko S.P. *Fluctuations in engineering*. M.: *Nauka*. 1967; 444. (In Russ)
7. Verzhbitsky V.M. Fundamentals of numerical methods. M.: *Higher school*; 2002; 840. (In Russ)
8. Clough Z., Penzien J. *Dynamics of structures*. M.: *Stroyizdat*. 1979; 320. (In Russ)
9. I.V. Kudinov, V.A. Kudinov. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015; 88(2):406-422.
10. Amabili M. *Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates*. Cambridge University Press, New York, USA. 2008.
11. Refined beam elements with arbitrary cross-section geometries. E. Carrera, G. Giunta, P. Nali [and others]. *Computers and Structures*. 2010;88(5-6): 283-293.
12. Elishakoff I. *Eigenvalues of Inhomogeneous Structures: Unusual Closed-form Solutions*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
13. Hsu J.C., Lai H.Y., Chen C.K. Free vibration of non-uniform Euler Bernoulli beams with general elastically end constraints using Adomian modified decomposition method. *Journal of Sound and Vibration*. 2008;318: 965-981.
14. Free vibration behavior of exponentially functionally graded beams with varying cross-section. A.A Haasen, T. Abdelouahed, A.M. Sid [and others.] *Journal of Vibration and Control*. 2011;17(2):311-318.

15. Maurini C., Pofiri M., Pouget J. Numerical methods for modal analysis of stepped piezoelectric beams. *Journal of Sound and Vibration*. 2006; 298(4-5): 918-933.
16. Zheng T. X., Ji T. J. Equivalent representations of beams with periodically variable crosssections. *Engineering Structures*. 2011; 33(3): 706-719.
17. Tejada A. A Mode-Shape-Based Fault Detection Methodology for Cantilever Beams: Tech. Rep.: CR-2009-215721: NASA, 2009.
18. Alshorbagy A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F. Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method. *Applied Mathematical Modelling*. 2011; 35(1): 412-425.
19. Huang Y., Li X. F. A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section. *Journal of Sound and Vibration*. 2010; 329(11): 2291-2303.
20. Mohanty S. C., Dash R. R., Rout T. Free vibration of a functionally graded rotating Timoshenko beam using FEM. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2013;16(2): 405-418.
21. Ke L. L., Yang J., Kitipornchai S. An analytical study on the nonlinear vibration of functionally graded beams. *Meccanica*. 2010; 45(6): 743-752.
22. Simsek M., Cansiz S. Dynamics of elastically connected doublefunctionally graded beam systems with different boundary conditions under action of a moving harmonic load. *Composite Structures*. 2012; 94(9):2861-2878.

Сведения об авторах:

Казиев Аслан Мугазович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; kaziev1969@mail.ru

Лихов Залим Русланович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; zalimhan@mail.ru

Джанкулаев Амирхан Яхьяевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; dzhankulaevaj@yandex.ru

Кумышев Ислам Юрьевич, магистрант; dzhankulaevaj@yandex.ru

Шигалугов Герман Арсенович, магистрант; dzhankulaevaj@yandex.ru

Information about the authors:

Aslan M. Kaziev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; kaziev1969@mail.ru

Zalim R. Likhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Strength of Materials, Theoretical and Structural Mechanics; zalimhan@mail.ru

Amirkhan Ya. Dzhankulaev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; dzhankulaevaj@yandex.ru

Islam Yu. Kumyshev, Undergraduate; dzhankulaevaj@yandex.ru

German A. Shigalugov, Undergraduate; dzhankulaevaj@yandex.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.08.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 03.09.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 03.09.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 625.85

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-133-139

Обзорная статья / Review article

Мобильный комплекс для производства керамзита для северных дорог

М.Н. Кокоев¹, В.Т. Федоров²

¹Российская академия архитектуры и строительных наук,

¹107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, 24, стр. 1, Россия,

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

¹360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

²Концерн «Наноиндустрия»,

¹19334, г. Москва, ул. Бардина, 4, к.1, Россия

Резюме. Цель. Зарубежный опыт показывает эффективность применения керамзита при строительстве дорог в сложных геотехнических и климатических условиях. В Сибири и на Крайнем Севере существуют особые условия для дорожного строительства - большой дефицит материала для строительства дорог при наличии во многих местах залежей глин, пригодных для производства керамзитового гравия. Кроме того, в районах строительства промышленных и региональных дорог есть месторождения нефти, дающих попутный нефтяной газ, который можно использовать в производстве керамзита как топливо, более выгодное, чем привозной мазут. Целью исследования является разработка нового подхода для обеспечения керамзитом строительства северных дорог. **Метод.** Модернизация оборудования заключается в том, чтобы каждый агрегат, входящий в комплекс, можно было транспортировать на существующих грузовых машинах, а затем смонтировать в линию для производства керамзита в полевых условиях. **Результат.** Разработан мобильный комплекс для производства керамзитового гравия, серийное и модернизированное оборудование для производства керамзита. **Вывод.** Крупногабаритные агрегаты - сушильные барабаны и вращающиеся печи для сушки и обжига гранул следует разбить на сборные секции, например, диаметром 2 м и длиной 5-7 м. Для электропривода агрегатов в комплект оборудования должен входить дизель-генератор достаточной мощности. Производительность одного комплекса от 15 тысяч кубометров керамзита в год и выше.

Ключевые слова: северные автодороги, керамзит, мобильный комплекс, попутный нефтяной газ

Для цитирования: М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров. Мобильный комплекс для производства керамзита для северных дорог. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 133-139. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-133-139

Mobile Complex for the Production of Expanded Clay for the Northern Roads

M.N. Kokoev¹, V.T. Fedorov²

¹Russian Academy of Architecture and Building Sciences

¹107031, Moscow, st. Bolshaya Dmitrovka, 24, building 1, Russia,

¹H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

¹73 Chernyshevskogo Str., Nalchik 360004, Russia

²Concern "Nanoindustry", Moscow

119334, Moscow, Str. Bardina, 4, building 1, Russia

Abstract. Objective. International practices demonstrate advantages of expanded clay in road construction in difficult climatic and geotechnical conditions. The clay is present in abundance in Siberia and in the Far North which is suitable for the production of expanded clay gravel. At the same time there is a strong deficit of the road construction materials in these regions. The aim of the study is to develop a new approach for providing claydite for the construction of northern roads. **Method.** The

modernization of the equipment means that each unit included in the complex can be transported on existing trucks, and then mounted in a line for the production of expanded clay in the field. **Result.** A mobile complex for the production of expanded clay gravel, serial and modernized equipment for the production of expanded clay has been developed. **Conclusion.** Large units - drying drums and rotary kilns for drying and firing pellets should be divided into prefabricated sections, for example, with a diameter of 2 m and a length of 5-7 m. For the electric drive of the units, a diesel generator of sufficient power must be included in the equipment set. The productivity of one complex is from 15 thousand cubic meters of expanded clay per year and above.

Keywords: northern roads, expanded clay, mobile complex, oil well gas

For citation: M.N. Kokoev, V.T. Fedorov. Mobile Complex for the Production of Expanded Clay for the Northern Roads. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3): 133-139. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-133-139.

Введение. Один из лучших материалов для строительства оснований автодорог через болота и торфяники - это керамзит, которого в настоящее время производится в России во много раз меньше, чем в 1980-е годы. Так, в 2018 всеми предприятиями России произведено около 2 млн. куб. м керамзита [1,2]. Для сравнения, в 1986 в СССР производили 34 млн. куб. м керамзитового гравия, при мировом производстве керамзита 72 млн. куб. м. Если отнять от этой цифры вклад союзных республик, то и тогда будет видно катастрофическое падение производства керамзита.

В последние годы снова растет интерес к использованию керамзита в строительстве. В том числе, благодаря увеличению применения огнестойких теплоизоляторов взамен вспененных полимеров. Немалая роль в росте популярности керамзитов принадлежит новаторским технологиям на основе использования этого материала в строительстве и ужесточение норм по теплоизоляции зданий [3,4].

Из всех арктических стран, у России самое протяженное северное побережье - более 11 тысяч км. Однако на этом трансконтинентальном пути очень мало портов: Нарьян-Мар, Амдерма, Сабетта, Игарка, Дудинка, Диксон и Тикси. Для эффективной работы Северного морского пути нужны порты и береговая инфраструктура, обеспечивающая навигацию и безопасное плавание в высоких широтах и нормальный грузооборот. К сожалению, не северные порты большие и далеко не все имеют круглогодичную транспортную связь с остальной частью суши и получателями грузов. Например, от морского порта Нарьян-Мар до ближайшей станции Усинск Северной железной дороги расстояние 350 км. Добраться из порта Нарьян-Мар до Усинска можно только по зимнику, который действует 4 месяца в году.

Масштабные транспортные проблемы существуют и на сухопутных территориях Крайнего Севера. Например, самый большой регион на северо-востоке страны - это Якутия. По территории и богатству природных ресурсов Якутию можно сравнить с Красноярским краем. Здесь очень суровый климат, пересеченная местность, тысячи озер, болот и рек, вечная мерзлота и мало дорог. Промысловые дороги, которых в Сибири и на Крайнем Севере тысячи километров, способны работать преимущественно в зимние месяцы.

Постановка задачи. Сложность строительства круглогодичных дорог в северных условиях общеизвестна - заболоченная местность, торфяники, сильная обводненность и морозное пучение грунтов, ограниченный по времени строительный сезон, а самое главное - дефицит щебня, гравия, крупно- и среднезернистого песка для возведения основания дороги. Поэтому в дорожном строительстве начинают применять керамзит не только как заменитель щебня, а для снижения риска появления оползней, деформаций дорожного полотна и преодоления обводненных торфяников.

В теплое время работают хорошие теплозащитные свойства керамзита (в зависимости от плотности теплопроводность керамзита составляет 0,09... 0,12 Вт/м·К.), что предупреждает подстилающий грунт от повышения температуры, а зимой этот материал защищает от обледенения.

нения дорожный слой. Есть случаи использования щебеночно-керамзитовой композиции в качестве крупного заполнителя [5,6]. Такая смесь устраняет недостатки керамзита, связанные с его недостаточной прочностью, а, с другой стороны, добавка керамзита повышает тепловое сопротивление щебеночно-керамзитового наполнителя. Увеличение этого параметра полезно для уменьшения толщины промерзания дорожных одежд и вероятность морозного пучения.

Методы исследования. При использовании битумоминеральных смесей на основе керамзита в работе [7] было показано, что снижения расхода битума можно получить введением в состав заполнителя фракций недробленого керамзитового гравия.

Другим направлением решения этой задачи, по мнению этих авторов, может явиться использование битумного вяжущего с добавками, например гудронов. Добавка менее вязких компонентов гудрона в битумное вяжущее будет способствовать замедлению интенсивности процессов старения битума. Замена части дорогостоящего битума на фракции гудрона позволит снизить себестоимость композиций.

Интересен практический опыт использования керамзита в Германии при строительстве обьездной дороги возле Эберсберга, в том числе через старые торфяники ледникового периода [8]. На протяжении 2 км обьездную дорогу пересекала болотистая территория. Торфяник Лауфингер Моос по толщине состоял из девяти метров мягкого и насыщенного водой торфа, под которым находится слой ила толщиной около двух метров, а ниже лежал щебень и осыпь с растаявших ледников. Так как торфяник с точки зрения экологии и строительной физики является очень чувствительной системой, никакие строительные вмешательства в основание были недопустимы. Было необходимо построить дорожную насыпь, которая бы уменьшила давление на площадь торфяника.

Дорожная насыпь из керамзитового заполнителя решила проблему. Для этого потребовалось около 17 000 куб. метров керамзита фракцией 4/16 мм. Насыпь керамзита высотой от 0,3 до 1,8 метра со всех сторон была покрыта геотекстилем, который был снизу и сверху горизонтально ограничен слоями щебня толщиной от 0,3 до 0,5 м. С боков насыпь была ограничена слоем грунта толщиной 0,3 м, который был покрыт завершающим слоем гумуса и озеленен.

Конструкция и состав насыпи обеспечили требуемую стабильность, что подтверждено проведенными испытаниями. Применение насыпи из керамзита позволяет заменить другие дорогостоящие решения, такие как замена грунта или устройство свай. Тем самым было сокращено время строительства, а также уменьшено вмешательство в природу. Движение тяжелых строительных машин по новой трассе подтвердили достаточную стабильность керамзитового основания.

Вышеприведенный немецкий опыт применения керамзита интересен для российских дорожников тем, что по нашим северным промысловым дорогам тоже немало перемещается автотранспорта с тяжелым оборудованием. Не только Германия, но и другие европейские страны успешно применяют керамзит в геотехнических и дорожно-строительных проектах уже порядка 15-20 лет. На протяжении этих лет результаты использования керамзита в дорожном строительстве только положительные.

Вообще, история работ по укреплению слабых грунтов в строительстве, в том числе в дорожном, сильным тепловым воздействием на лессовые и глинистые грунты спеканием прямо на месте строительства (*in loco*) насчитывает не один десяток лет. Для нагрева и спекания грунтов использовали сжигание мазута, газа, а также применяли электрические источники высоких температур, вплоть до плазмы [9,10].

Применение в процессах термоупрочнения грунтов высоких температур существенно расширяет область практического применения метода, так как спекать и расплавлять можно практически любые грунты, не разлагающиеся при высоких температурах. Как, например, грунты, содержащие известняк. Несмотря на ряд очевидных и проверенных опытом преимуществ метода термического упрочнения грунтов, его применение всё еще не вышло за рамки экспериментального строительства [11]. В частности, проблема растрескивания спеченного

грунта из-за больших термических напряжений и неравномерного остывания до конца не решена. Технологически проще оказалось дискретное оплавление и вспучивание специально подготовленной глины в виде гранул - получился керамзит (первый патент на этот материал получен в 1918 г. в США), использование которого в строительстве носит почти универсальный характер.

В сложных климатических и геотехнических условиях при воздействии морозного пучения грунтов, таяния вечной мерзлоты, отсутствием во многих регионах щебня, дорожники Норвегии, Швеции, Канады и в северных районах США успешно применяют теплоизолирующие слои легкого пенобетона [12].

В Сибири и на Крайнем Севере существуют особые условия, во многом отличные от приведенных выше, - дефицит щебня и крупнозернистого песка, большие расстояния от баз снабжения при наличии во многих местах местного сырья - залежей глин разного качества. А также то обстоятельство, что в районах строительства промысловых и региональных дорог есть месторождения нефти, дающих попутный нефтяной газ (ПНГ), который часто просто сжигают, можно использовать как эффективное и достаточно дешевое топливо. Затраты топлива в себестоимости производства строительной керамики, в частности керамзита, достигают 40-60 %, поэтому стоимость топлива и электроэнергии играют важную роль [13].

Обсуждение результатов. Анализ вышеизложенного делает возможным новый подход для обеспечения керамзитом строительства северных дорог. Для этого следует разработать мобильные комплексы для производства керамзитового гравия.

Под термином «мобильный комплекс» имеется в виду набор серийного и частично модернизированного оборудования для производства керамзита. Модернизация должна заключаться в том, чтобы каждый агрегат, входящий в комплекс, можно было транспортировать на существующих в регионах грузовых машинах, а затем смонтировать в технологическую линию и запустить в работу в полевых условиях.

На рис.1 показана только часть оборудования.

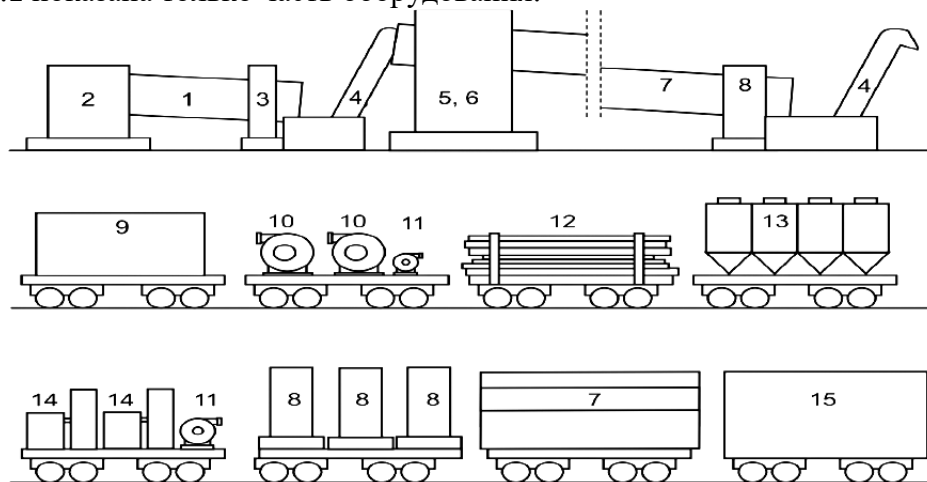


Рис. 1. Схема мобильного комплекса для производства керамзита для строительства северных дорог: 1 - сушильный барабан, 2 - привод сушильного барабана, 3 - роликовые опоры сушильного барабана, 4 - ковшовый элеваторы и транспортеры, 5 и 6 - привод и роликовая опора обжиговой печи, 7 - секции обжиговой печи, 8 - роликовые опоры, 9 - дизель-генератор, 10 и 11 - вентиляторы и водяные насосы, 12 - трубные детали, 13 - циклоны и рукавные фильтры, 14 - дробилки и грохоты, 15 - пускорегулирующая аппаратура и КИПиА

Fig. 1. Scheme of a mobile complex for the production of expanded clay for the construction of northern roads: 1 - dryer, 2 - dryer drive, 3 - dryer roller bearings, 4 - bucket elevators and conveyors, 5 and 6 - kiln drive and roller bearing, 7 - kiln sections, 8 - roller bearings, 9 - diesel generator, 10 and 11 - fans and water pumps, 12 - pipe parts, 13 - cyclones and bag filters, 14 - crushers and screens, 15 - ballasts and instrumentation

Самое крупногабаритное оборудование - сушильные барабаны и вращающиеся печи для сушки и обжига гранул можно разбить на сборные секции, например, диаметром 2 м и длиной 5-7 м. Важно, чтобы при монтаже комплекса для работы, отдельные секции должны быть состыкованы с заданным углом наклона, который предписывается регламентом для нормальной работы наклонных печей в промышленности строительных материалов [14]. Для электропривода в комплект оборудования мобильного комплекса должен входить дизель-генератор достаточной мощности.

Время работы комплекса на одном месте задают по двум основным параметрам - до исчерпания местной залежи подходящей легкоплавкой глины или при увеличении плеча доставки керамзита к перемещающимся потребителям (дорожникам) выше экономической целесообразности. Производительность одного комплекса от 15 тыс. куб. м керамзита в год и выше. Для работы печей использовать мазут, а где возможно, использовать ПНГ, доставляемый по временному газопроводу от ближайшего месторождения нефти с ПНГ. Содержание попутного газа в месторождениях с высоким газовым фактором иногда достигает нескольких тысяч куб. м на каждую тонну добытой нефти.

Вообще, ПНГ добывается при разработке нефтяных месторождений и самый дешевый способ избавиться от него для промысловиков - сжечь газ на факеле. Но сжигание ПНГ наносит серьезный ущерб экологии. Достичь высоких объемов утилизации ПНГ и направлять его в магистральные газопроводы много лет требует Минэнерго и министерство природных ресурсов. Однако для нефтяников это сложно из-за хлопот по очистке попутного газа на специальном оборудовании. Строить газохимические комплексы, даже на крупном месторождении, для промысловиков слишком дорого.

На небольших месторождениях, удаленных от основных мест добычи, это тем более невыгодно [15]. Несмотря на то, что цены на ПНГ растут, как и цены на нефть, использование ПНГ в печах по производству керамзита вблизи месторождений нефти должно обходиться дешевле, чем работа печей на привозном мазуте.

Основное сырье для керамзита - подходящая по содержанию примесей легкоплавкая глина. Следует заметить, что в прошлые годы небольшие месторождения глины в удаленных местах, хотя и брались на заметку геологами, но без особого интереса. Некоторые залежи глины отмечались геологами на картах, как компонент для буровых растворов. Но в Сибири и Якутии есть достаточно крупные месторождения глин, пригодных для производства керамзита [16]. Например, в прежние годы в Якутии разведано 17 месторождений глинистого сырья для развития керамзитового производства. Опыт в производстве этого стройматериала здесь накоплен достаточный - в конце 1980-х на 5 предприятиях Якутии производилось около 250 тысяч куб. м керамзитового гравия в год [17].

Для производства керамзита наиболее пригодны монтмориллонитовые и гидрослюдистые глины, содержащие не более 30 % кварца. Общее содержание SiO_2 должно быть не более 70 %, Al_2O_3 - не менее 12 % (желательно около 20 %), $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ - до 10 %, органических примесей - 1-2 %. В отдельных случаях для корректировки состава глин могут использоваться буровой шлам с высоким содержанием глины и подходящие по составу техногенные отходы [18,19], в частности при обогащении сланцев и угля.

Выбор мест дислокации передвижных комплексов по производству керамзита в интересах строительства региональных и промысловых дорог не прост. Он должен учитывать геотехнические условия будущих трасс и их географию, места, качество и объем местных месторождений глин; расположение источников и возможность снабжения производства керамзита углеводородами - кондиционным газом, попутным нефтяным газом или, в крайнем случае, сырой нефтью или привозным мазутом.

Исходя из этих данных, ЗАО «НИИКерамзит» (г. Самара) может внести существенный вклад в виде технического участия и сопровождения программы «Мобильный комплекс для производства керамзита», а также строительства автодорог в Сибири и на Крайнем Севере. Это

важная задача, с учетом перспектив развития Северного морского пути, нефтегазовой отрасли и развития добывающей промышленности и общей экономики Севера.

Вывод. Модернизировать оборудование нужно так, чтобы каждый агрегат, входящий в комплекс, можно было транспортировать на существующих в регионах машинах, а затем смонтировать для производства в полевых условиях. Крупногабаритные агрегаты - сушильные барабаны и вращающиеся печи для обжига гранул следует разбить на сборные секции, например, диаметром 2 м и длиной 5-7 м. Для электропривода агрегатов в комплект оборудования должен входить мощный дизель-генератор.

Библиографический список:

1. Анализ рынка керамзита в России. DISCOVERY Research Group. 2018. С. 10-11. https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo.408.PDF (Retrieved March 30, 2022).
2. Семенов А.А. Состояние российского рынка керамзита // Строительные материалы. 2010. N 8. С. 4-5.
3. Бикбау М.Я. Капсимэт – современная технология быстровозводимых зданий // Строительные материалы. 2004. No 3. С. 12–13.
4. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Авок Пресс. 2006. 256 с.
5. Mehdiratta G., Rai Noggle, Michael O. Geotechnical properties and engineering applications of lightweight aggregate / Mehdiratta G., Rai Noggle, Michael O. // Texas Civil Engineer. 1986. Vol. 56 (3). p. 16-20.
6. Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко О.А., Гордиенко Е.В. Пути снижения битумоемкости битумо-минеральных композиций с наполнителем на основе керамзита // Строительные материалы. 2013. No 5. С. 24-26.
7. Борисенко Ю.Г., Лынный В.В., Борисенко О.А. Повышение качества легких битумо-минеральных композиций путем совершенствования подбора их минеральных составов // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 54-55.
8. Иванов С. И. Керамзит - будущее дорожного строительства. Зарубежный опыт. https://www.keramzit.by/press/articles/expanded_clay_the_future_of_road_construction_foreign_experience/ (Retrieved March 30, 2022). (In Russian).
9. Юрданов А.П. Термическое упрочнение грунтов в строительстве. Москва: Стройиздат. 1990. 128 с.
10. Сиротюк В.В. Процессы структурообразования при плазменной термообработке грунтов до стадии силикатного расплава // Огнеупоры и техническая керамика. 2000. (1), С. 33-36.
11. Сиротюк В.В. Основы плазменной технологии укрепления грунтов в условиях строительной площадки (монография). Омск: Изд-во СибАДИ, 1999. 228 с.
12. Медрес Е.П. Современный подход к строительству дорожных насыпей на слабых грунтах с пенобетоном // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4.
13. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Строительная керамика: проблема энергообеспечения // Строительные материалы. 1996, N 12. С. 9-11.
14. Банит Ф.Г., Несвижский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с.
15. Попутный газ растет в цене. 2015. *Poputnyi gaz rastet v tsene*. 2015. <http://rngoil.ru/news/associated-gas-shows-price-increase/> (Доступ март 30, 2022).
16. Глины и глинистые минералы Сибири. Редактор: Казанский Ю.П. М: Наука, 1965. 140 с.
17. Уваров П.П., Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Качественный керамзит и керамзитобетон для стройкомплекса Якутии // Наука и техника в Якутии. 2006 N 2 (11). С. 19-23.
18. Гурьева В.А., Дорошин А.В. К вопросу о производстве керамзита из техногенных отходов западного Оренбуржья // Молодой ученый. 2017. № 21.1. С. 123-127.
19. Дубинский В. В., Гурьева В. А., Вдовин К. М. Буровой шлам в качестве добавки в керамический кирпич // Молодой ученый. 2015. № 11.1. С. 137-139.

References:

1. Analysis of the expanded clay market in Russia. DISCOVERY Research Group. 2018; 10-11. https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo.408.PDF (Retrieved March 30, 2022). (In Russ).
2. Semenov A.A. State of the Russian expanded clay market. *Building materials*. 2010; 8: 4-5. (In Russ).
3. Bikbau M.Ya. Kapsimet - modern technology of prefabricated buildings. *Construction materials*. 2004;3: 12–13. (In Russ).
4. Fokin K.F. Construction heat engineering of enclosing parts of buildings. Moscow: Avok Press. 2006; 256. (In Russ).
5. Mehdiratta G., Rai Noggle, Michael O. Geotechnical properties and engineering applications of lightweight aggregate. *O. Texas Civil Engineer*. 1986; 56(3): 16-20.
6. Borisenko Yu.G., Lyyunik V.V., Borisenko O.A., Gordienko E.V. Ways to reduce the bitumen content of bitumen-mineral compositions with aggregate based on expanded clay. *Building materials*. 2013;5: 24-26. (In Russ).
7. Borisenko Yu.G., Lyyunik V.V., Borisenko O.A. Improving the quality of light bitumen-mineral compositions by improving the selection of their mineral compositions. *Building materials*. 2011; 8:54-55. (In Russ).
8. Ivanov S.I. Expanded clay - the future of road construction. Overseas experience. https://www.keramzit.by/press/articles/expanded_clay_the_future_of_road_construction_foreign_experience/ (Retrieved March 30, 2022). (In Russ).
9. Yurdanov A.P. Thermal strengthening of soils in construction. Moscow: *Stroyizdat*. 1990; 128. (In Russ).

10. Sirotyuk V.V. Processes of structure formation during plasma heat treatment of soils up to the stage of silicate melt. *Refractories and technical ceramics*. 2000; (1): 33-36. (In Russ).
11. Sirotyuk V.V. Fundamentals of plasma technology for strengthening soils in a construction site (monograph). Omsk: *SibADI Publishing House*. 1999; 228. (In Russ).
12. Madrasah E.P. Modern approach to the construction of road embankments on soft soils with foam concrete. *Modern problems of science and education*. 2012; 4. (In Russ).
13. Fedorov V.T., Kokoev M.N. Building ceramics: the problem of energy supply. *Building materials*. 1996; 12: 9-11. (In Russ).
14. Banit F.G., Nesvizhsky O.A. Mechanical equipment of cement plants. M.: *Mashinostroenie*. 1975; 318 (In Russ).
15. Associated gas is growing in price. 2015. *Poputnyi gaz rastet v tsene*. 2015. <http://rngoil.ru/news/associated-gas-shows-price-increase/> (Accessed March 30, 2022). (In Russ).
16. Clays and clay minerals of Siberia. Editor: Kazansky Yu.P. M: *Nauka*, 1965; 140. (In Russ).
17. Uvarov P.P., Gorin V.M., Tokareva S.A., Kabanova M.K. High-quality expanded clay and expanded clay concrete for the construction complex of Yakutia. *Science and technology in Yakutia*. 2006; 2 (11):19-23. (In Russ).
18. Gur'eva V.A., Doroshin A.V. On the issue of the production of expanded clay from man-made waste of the western Orenburg region. *Young scientist*. 2017; 21(1): 123-127. (In Russ).
19. V. V. Dubinetsky, V. A. Gur'eva, and K. M. Vdovin, "Drill cuttings as an additive in ceramic bricks," *Molodoy ucheny*. 2015; 11(1):137-139. (In Russ).

Сведения об авторах:

Кокоев Мухамед Нургалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра организации строительного производства, советник РААСН, kbagrostroy@yandex.ru

Федоров Виктор Тихонович, доктор технических наук, профессор, советник; fedorovsteer@gmail.com

Information about authors:

Mukhamed N. Kokoev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Organization of Construction Production, Advisor to RAASN, kbagrostroy@yandex.ru

Viktor T. Fedorov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Advisor; fedorovsteer@gmail.com

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.06.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 21.07.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.07.2022.

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 628.971

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-140-145

Оригинальная статья /Original Paper

**Проблематика формирования комфортного освещения пешеходных зон
по ул. Кубанская в г. Астрахань**

Т.К. Курбатова, Н.А. Рактович, Р.А. Петров

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия

Резюме. Цель. Поставлена задача провести анализ существующей ситуации в отношении количественного и качественного состояния комфортной городской среды в ночное время суток, а именно, освещение пешеходной зоны вдоль ул. Кубанская в г. Астрахань. **Метод.** Исследование основано на аналитическом и проектном методах. **Результат.** При проведении расчётов были выявлены участки, не соответствующие нормам освещения городской среды в ночное время суток. Для достижения поставленной цели разработан проект по организации комфортного и безопасного освещения зон. Приведено описание методик расчета осветительных приборов по функциональным зонам. Полученные данные по расчетам сведены в таблицу и представляют собой проект–решения по организации комфортного освещения. **Вывод.** Разработанный комплекс практических мер обосновывает необходимость введения дополнительных световых приборов.

Ключевые слова: организация освещения пешеходных зон, искусственное освещение, освещение пешеходных переходов, особенности освещения внутридворовых территорий, безопасная среда

Для цитирования: Т.К. Курбатова, Н.А. Рактович, Р.А. Петров. Проблематика формирования комфортного освещения пешеходных зон по ул. Кубанская в г. Астрахань. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 140-145. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-140-145

**Problems of formation of comfortable lighting of pedestrian zones
on Kubanskaya Str. in Astrakhan**

T.K. Kurbatova, N.A. Raktovich, R.A. Petrov

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The task was set to analyze the current situation in relation to the quantitative and qualitative state of a comfortable urban environment at night, namely the lighting of the pedestrian zone along the Kubanskaya Street in Astrakhan. **Method.** The study is based on analytical and design methods. **Result.** During the calculations, areas were identified that did not meet the standards for lighting the urban environment at night. To achieve this goal, a project has been developed to organize comfortable and safe lighting for areas located along. A description of the methods for calculating lighting fixtures by functional zones is given. The data obtained from the calculations are summarized in a table and represent a project solution for organizing comfortable lighting. **Conclusion.** The developed set of practical measures justifies the need to introduce additional lighting devices along.

Keywords: organization of pedestrian zone lighting, artificial lighting, pedestrian crossing lighting, features of courtyard lighting, safe environment

For citation: T.K. Kurbatova, N.A. Raktovich, R.A. Petrov. Problems of formation of comfortable lighting of pedestrian zones on Kubanskaya Str. in Astrakhan. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(3): 140-145. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-140-145.

Введение. Световая среда пешеходных улиц - один из важнейших факторов, формирующих образ города. Так как в ночное время всё выглядит иначе, чем днем, должна сохраняться читаемость и узнаваемость среды, ее элементов и деталей. Ощущение зрительного комфорта и возможность незатрудненного ориентирования в пространстве являются ключевыми факторами, влияющими на ее привлекательность для человека. Улучшение качества среды является приоритетной задачей для любого «дневного» урбанистического и «вечернего» свето-урбанистического проекта, в частности - «оживление» вечерних улиц, культивирование отношения к городу как к общественной ценности, а не как к препятствию движения между точками А и В.

Таким образом, поиск и формулирование комплексного подхода к организации функциональной и эстетической световой среды пешеходных зон в условиях искусственного освещения является не только оправданным, но и необходимым.

Постановка задачи. На сегодняшний день актуальна проблема организации искусственного освещения пешеходных зон именно в ночное время суток. В подавляющем количестве случаев наблюдается хаотичное, несистематизированное и недостаточное освещение. Это приводит к тому, что городской облик теряет свой замысел, нарушается восприятие общего вида ночной панорамы.

Цель исследования – анализ существующего искусственного ночного освещения пешеходных зон. В процессе анализа выявить некорректные структуры освещения и сформировать предложения по улучшению облика панорамы города Астрахань.

Методы исследования. Для исследования была рассмотрена территория по улице Кубанская в г. Астрахань. Выбранный участок территориально важен в общей структуре города, так как включает в себе пешеходные направления, прилегающие к ЧУЗ МСЧ (Частное учреждение здравоохранения «Медико-санитарная часть») и МБОУ «Гимназия №2» (рис.1).



Рис. 1. Пешеходное направление, связывающее Частное учреждение здравоохранения «Медико-санитарная часть» и МБОУ «Гимназия №2»

Fig. 1. Pedestrian direction connecting the Private Healthcare Institution "Medical and Sanitary Unit" and MBOU "Gymnasium No. 2"

Прослеживая пешеходное направление, мы также затрагиваем освещенность пешеходных переходов, остановок общественного транспорта и внутридворовых территорий. В условиях искусственного освещения пешеходных улиц, в вечернее время, существуют предпочтительные для зрительного восприятия свето-композиционные качества архитектурно-световой среды, которые определяются экспериментально и выражаются в виде определенных светотехнических величин и их соотношений. Данный прием служит основой в систематизации и формировании искусственной световой среды, благоприятной для пешехода, используется в расчетных методиках свето-дизайнерского проектирования и при создании научно-методических рекомендаций.

Устройство освещения городов для пешеходов значительно сложнее привязать к загруженности улиц. Поэтому требования по освещенности обычно привязываются к значению населенного пункта, а также отдельных улиц в нём.

При организации освещения пешеходных направлений следует учитывать так же рекреационные зоны, детские площадки школьного и дошкольного возрастов, хозяйственные площадки, придомовые территории и парковочные зоны.

Особое внимание при расчете освещения отводится пешеходным зонам, прилегающим к автодорогам. На центральных улицах освещенность должна быть не меньше 10лк. На территориях отделённых от автомагистралей допускается освещённость до 4лк, а для улиц местного значения до 2лк. Для остановок и других мест посадки и высадки пассажиров норма освещенности составляет 10лк. Такая же норма действует для пешеходных мостиков, а вот для пешеходных переходов освещенность днем должна составлять 100лк, в вечернее и ночное время она должна снижаться до 50лк. Это делается с целью исключения слепящего эффекта.

Что касается освещения территории микрорайонов, то основные пути должны иметь освещенность не менее 4лк. Второстепенные подходы всего 2 лк. А вот детские площадки должны иметь нормальное освещение не менее 10лк.

При работе с результатами проведенного анализа, указанными на (рис.2), были рассмотрены следующие нормативные требования по утилитарному наружному освещению. Проектирование освещения пешеходных зон происходит в комплексе с разработкой освещения пешеходных переходов и внутридворовых территорий.

В процессе используют следующие нормативные документы:[1], а также [2].

Нормы освещения пешеходных пространств. В зависимости от класса объекта по освещению должны соответствовать нормам, указанным в табл.1.

Таблица 1. Нормы освещения пешеходных пространств в зависимости от классов объектов
Table 1. Lighting standards for pedestrian spaces depending on object classes

Класс объекта по освещению	$\bar{E}_h$, лк, не менее	U_h , не менее
П1	20	0,3
П2	10	0,3
П3	6	0,2
П4	4	0,2
П5	2	0,1
П6	1	0,1

Средняя освещенность E_h на покрытии тротуара, примыкающего к проезжей части улицы или дороги, должна быть не менее половины средней освещенности на покрытии ближайшей к тротуару полосы движения. Равномерность освещенности U_h на покрытии тротуара должна быть не менее 0,3. Для пешеходных улиц среднее значение полуцилиндрической освещенности E_{sc} должно быть не менее 6 лк, а минимальное $E_{sc, \min}$ – 2 лк.

Слепящее действие венчающих ОП, используемых для освещения пешеходных улиц, парковых зон, скверов, бульваров и т. д., определяет отношение $I_{85}/A^{0,5}$, где I_{85} – сила света ОП под углом 85о к вертикали, максимальная по всем азимутальным углам пешеходного пространства; A – площадь проекции светящей поверхности ОП на плоскость, перпендикулярную направлению силы света I_{85} , м2. Значение $I_{85}/A^{0,5}$, кд/м, должно быть не более: - 4000 – при высоте установки ОП до 4,5 м включительно; - 5500 – то же св. 4,5 до 6 м включительно; - 7000– » » св.6м.

Нормы освещения пешеходных переходов. Освещение наземных пешеходных переходов должно обеспечивать пешеходам безопасное пересечение проезжей части и возможность видеть препятствия и дефекты дорожного покрытия. Для обозначения зоны перехода применяют источники света с цветностью, контрастной по отношению к цветности источников света основного освещения улицы. На пешеходных переходах в одном уровне с проезжей частью улиц и дорог категорий А и Б норма средней освещенности E_h должна быть в 1,5 раза выше, чем на пересекаемой проезжей части. Повышение уровня освещенности достигают уменьшением шага опор, установкой дополнительных или более мощных ОП.

Светораспределение ОП и их ориентация относительно наземного пешеходного перехода должны обеспечивать контраст пешехода с фоном (проезжей частью) и не вызывать ослепле-

ния водителей. Размещают ОП перед переходом по отношению к приближающемуся транспорту, направляя свет на пешехода со стороны водителя.

На дорогах с двусторонним движением ОП устанавливают перед перекрестком относительно обоих направлений движения. Для снижения слепимости водителей рекомендуется использовать ОП с асимметричным светораспределением (кососветы).



Рис. 2. Анализ существующих ОП на территории и предложение проектируемых ОП

Fig. 2. Analysis of existing SPs on the territory and proposal of designed SPs

Обсуждение результатов. На основании проведенного анализа были выполнены расчеты при работе с данной территорией, благодаря которым мы смогли выявить ряд проблем: отсутствие освещения пешеходного тротуара вблизи с ЧУЗ МСЧ; недостаточное освещение пешеходных переходов; недостаточное освещение детских, хозяйственных, рекреационных, спортивных, парковочных площадок во внутриворотовой территории.

Выявив основные конфликты и противоречия ночного освещения, рассмотренной территории в г. Астрахань, и изучив нормативную документацию, был предложен проект-решения сбалансированной структуры освещения данного фрагмента города (табл. 2).

Таблица 2. Проект-решения

Table 2. Project decisions

№	Наименование/ Name study area	Фактическое кол-во ОП Actual number	Требуемое кол-во ОП (по расчету)/ Required number	Считать удовлетворительно/ неудовлетворительно Count satisfactorily/ unsatisfactory	Предложение Sentence
1.	Хозяйственная площадка / Economic platform	1	0	считать удовлетворительным/ satisfactorily	поддерживать в рабочем состоянии, проводить обслуживание / keep in working order, carry out maintenance
2.	Парковочная зона / Parking zone	1	4	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол. 3 шт./ introduce additional OP in the amount of 3 pcs.
3.	Детская площадка школьного возраста /School age playground	1	3	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол. 2 шт. / introduce additional OP in the amount of 2 pcs.
4.	Спортивная площадка / Sports ground	1	5	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол.4 шт./ introduce additional OP in the amount of 4 pcs.
5.	Детская площадка дошкольного возраста/Preschool playground	1	2	считать удовлетворительным/ satisfactorily	ввести дополнительные ОП в кол.1 шт. / introduce additional OP in the amount of 1 pc.
6.	Рекреационная зона recreational area	0	1	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в количестве 1 шт./introduce additional OP in the amount of 1.

7.	Рекреационная зона Recreational area	0	1	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол. 1 шт. /introduce additional OP in the amount of 1 pc.
8.	Хозяйственная площадка Economic platform	0	1	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол.1 шт./ introduce additional OP in the amount of 1 pc.
9.	Рекреационная зона Recreational area	0	2	считать удовлетворительным/ satisfactorily	ввести дополнительные ОП в кол. 2 шт./ introduce additional OP in the amount of 2 pcs.
10.	Ул. Михаила Луко- нина/ Mikhail Lu- konin St.	2	10	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол. 8 шт./ introduce additional OP in the amount of 8 pcs.
11.	Ул. Кубанская/ Kubanskaya St.	1	1	считать удовлетворительным/ satisfactorily	поддерживать в рабочем состоянии, проводить обслуживание / keep in working order, carry out maintenance
12.	Пешеходный тротуар №12 Pedestrian sidewalk №12	0	11	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол.11шт. / introduce additional OP in the amount of 11pcs
13.	Пешеходный тротуар №13 Pedestrian sidewalk №13	11	11	считать удовлетворительным/ satisfactorily	поддерживать в рабочем состоянии, проводить обслуживание/ keep in working order, carry out maintenance
14.	Пешеходный тротуар №14 Pedestrian sidewalk No. 14	8	10	считать неудовлетворительным/ unsatisfactory	ввести дополнительные ОП в кол. 2 шт. / introduce additional OP in the amount of 2 pcs.

В данном исследовании производился методический расчет осветительных приборов в соответствии с классом объекта и нормами освещения пешеходных пространств.

Произведен фактический расчет осветительных приборов, который в последствие был сравнен с расчетом норм требуемого количества осветительных приборов.

В ходе сравнения выявлены неблагоустроенные участки, а именно 50% от всей территории не соответствует нормам по количеству осветительных приборов в зонах детских, спортивных, парковочных и хозяйственных площадок.

Выявлено недостаточное количество осветительных приборов вдоль основных пешеходных направлений, ведущих к общественным учреждениям данного района.

Данные исследования показали частично неудовлетворительную ситуацию в организации благоустройства световой среды вдоль ул. Кубанская в г. Астрахань. Меры и общие рекомендации по решению проблем освещения представлены в виде расчета количества осветительных приборов в зависимости от класса территории (табл. 2).

Вывод. Организация искусственного освещения пешеходных тротуаров и переходов, придомовых территорий с различными типами площадок очень важна, так как от этого зависит комфорт и безопасность людей.

Хорошая освещённость позволяет снизить уровень травматизма, вероятность возникновения различных типов происшествий, обеспечивает сохранность имущества, в том числе припаркованных автомобилей, оборудования детских и спортплощадок, урн и скамей.

Библиографический список:

- ГОСТ Р 55706-2013 «Освещение наружное утилитарное». [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200105703>
- СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение». [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001026>
- Азизян, И.А. Световая композиция города / И.А. Азизян // Декоративное искусство. — 1972. — №11.
- Бартез Э. Освещение и программирование окружающей среды// Современная архитектура (пер. с фр.) 1972. №2.
- Боос, Г.В. Программный комплекс Light - in - Night для расчета архитектурного освещения / Г.В.Боос, А.А.Коробко // Светотехника — 1997. — №5.
- Матовников, Г.С. Освещение новых пешеходных улиц / Г.С. Матовников // Световой дизайн: Тезисы докладов научно-практической конференции 9-10 октября. - СПб: Университет ИТМО. — 2014.

7. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. - М.: ГП ЦПП, 1995.
8. МГСН 2.06-99. Естественное, искусственное и совмещенное освещение. -М.:ГУП «НИАЦ», 1999.
9. МГСН 2.01-99. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплосащите и тепловодозэлектроснабжению. - М.:ГУП «НИАЦ », 1999.
10. ГОСТ 24940-96. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности.
11. ГОСТ 17677-82. Светильники. Общие технические условия.
12. ГОСТ 8607-82. Светильники для освещения жилых и общественных зданий. Общие технические условия.
13. ВСН 59-88. Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования. М: Стройиздат, 1990.
14. Кузякина А.В. Свет и его влияние на восприятие рекреационного пространства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 2 (28). С. 7-13. URL: <https://arasy.pf/journal/wp-content/uploads/2019/11/isvp>
15. Цитман Т.О., Поташова М.Д., Петунина С.М. Благоустройство дворовых территорий в районах жилой застройки //Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. № 2 (20). С. 103-114. URL: <https://arasy.pf/journal/wp-content/uploads/2017/07/i..>

References:

1. GOST R 55706-2013 "Outdoor utilitarian lighting". [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200105703> (In Russ)
2. SNiP 23-05-95 "Natural and artificial lighting". [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/871001026> (In Russ)
3. Azizyan, I.A. Light composition of the city..Decorative art. 1972; 11. (In Russ)
4. Bartes E. Lighting and programming of the environment. *Modern architecture (translated from French)*. 1972; 2.
5. Boos, G.V. Boos G.V., Korobko A.A. Light-in-Night software package for calculating architectural lighting. *Lighting engineering* - 1997. - No. 5. (In Russ)
6. Matovnikov G.S. Lighting of new pedestrian streets. *Lighting design: Abstracts of the scientific-practical conference* October 9-10. - St. Petersburg: ITMO University. 2014. (In Russ)
7. SNiP 23-05-95. Natural and artificial lighting. М.: GP TsPP, 1995. (In Russ)
8. MGSN 2.06-99. Natural, artificial and combined lighting. М.: GUP "NIATS", 1999. (In Russ)
9. MGSN 2.01-99. Energy saving in buildings. Standards for thermal protection and heat and water supply. М.: SUE "NIAC", 1999. (In Russ)
10. GOST 24940-96. Buildings and constructions. Methods for measuring illumination. (In Russ)
11. GOST 17677-82. Lamps. General specifications. (In Russ)
12. GOST 8607-82. Lamps for illumination of residential and public buildings. General specifications. (In Russ)
13. VSN 59-88. Electrical equipment of residential and public buildings. Design standards. М: *Stroyizdat*. 1990. (In Russ)
14. Kuzyakina A.V. Light and its influence on the perception of recreational space. *Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea*. 2019; (28):7-13. URL: <https://agasu.rf/journal/wp-content/uploads/2019/11/isvp> (In Russ)
15. T.O. Tsitman, M.D. Potashova, and S. M. Petunina, Russ. Landscaping of yard areas in residential areas. *Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea*. 2017;2(20):103-114. URL: <https://agasu.rf/journal/wp-content/uploads/2017/07/i..> (In Russ)

Сведения об авторах:

Курбатова Татьяна Камильевна, член Союза Дизайнеров России, старший преподаватель кафедры «Дизайн, реставрация», старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона, kurbatova.201189@yandex.ru

Рактович Надежда Алексеевна, член Союза Дизайнеров России, доцент кафедры «Дизайн, реставрация», младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона, n.raktovich92@yandex.ru

Петров Роман Андреевич, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона, e-mail: tottenham@bk.ru

Information about the authors:

Tatiana K. Kurbatova, Member of the Union of Designers of Russia, Senior Lecturer of the Department Design, Restoration, Senior Researcher of the Research Laboratory of Priority Research of the region; kurbatova.201189@yandex.ru

Nadezhda A. Raktovich, Member of the Union of Designers of the Russian Federation; Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Research in the Region; Assoc. Prof. of the Department f Design and Restoration; n.raktovich92@yandex.ru

Roman A.Petrov, Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Studies of the Region; tottenham@bk.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.07.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 16.08.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 16.08.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 69.042

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-146-151

Оригинальная статья /Original Paper

Материалы и технологии для восстановления объектов башенного типа

С.Г. Шеина¹, Д.К.-С. Батаев², М.М. Малороев², П.Д. Батаева²

¹Донской государственный технический университет,

¹344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова

Российской академии наук,

²364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка ремонтно-реставрационного состава материалов и технологии восстановления объекта башенного типа. **Метод.** В работе использовались экспериментальный метод разрушающего и неразрушающего контроля качества строительных материалов; комплексное инструментальное техническое обследование зданий и сооружений; визуальное обследование зданий и сооружений. **Результат.** Выполнен ситуационный обзор объекта культурного наследия. Проведены физико-механические испытания с целью подбора реставрационного состава для каменной кладки стен башенных строений. Представлены результаты визуального обследования, на основании которых дана комплексная оценка состояния объекта культурного наследия для проведения на данном объекте ремонтных, восстановительных и реставрационных работ. Составлено заключение комплексного инструментального технического обследования по состоянию объекта. Определен состав материалов для ремонта, восстановления и реставрации объектов культурного наследия башенного типа. **Вывод.** В результате технического обследования установлено, что общее состояние объекта аварийное. Разработан ремонтно-реставрационный состав, который по своим свойствам максимально приближен к оригиналу, более эффективен и способствует повышению качества работ и долговечности объекта культурного наследия.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, боевая башня, восстановление, реставрация, ремонтный состав

Для цитирования: С.Г. Шеина, Д.К.-С. Батаев, М.М. Малороев, П.Д. Батаева. Материалы и технологии для восстановления объектов башенного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):146-151. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-146-151

Materials and technologies for the restoration of tower-type objects

S.G. Sheina¹, D.K.-S. Bataev², M.M. Maloroev², P.D. Bataeva²

¹Don State Technical University,

¹Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

²364051, Grozny, Staropromyslovskoe highway 21, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a repair and restoration composition of materials and a technology for restoring a tower-type object. **Method.** The experimental method of destructive and non-destructive quality control of building materials was used in the work; comprehensive instrumental technical inspection of buildings and structures; visual inspection of buildings and structures. **Result.** A situational review of the object of cultural heritage was carried out. Physical and mechanical tests were carried out in order to select the restoration composition for masonry walls

of tower buildings. The results of a visual inspection are presented, on the basis of which a comprehensive assessment of the state of a cultural heritage object is given for carrying out repair, restoration and restoration work at this object. The conclusion of a comprehensive instrumental technical survey on the condition of the object was drawn up. The composition of materials for the repair, restoration and restoration of tower-type cultural heritage sites has been determined. **Conclusion.** As a result of the technical survey, it was found that the general condition of the facility is emergency. A repair and restoration composition has been developed that, in its properties, is as close as possible to the original, more efficient and contributes to improving the quality of work and the durability of a cultural heritage object.

Keywords: objects of cultural heritage, combat tower, restoration, restoration, repair trains

For citation: S.G. Sheina, D.K.-S. Bataev, M.M. Maloroev, P.D. Bataeva. Materials and technologies for the restoration of tower-type objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(3):146-151. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-146-151

Введение. В Конституции Российской Федерации закреплены обязанности каждого гражданина по сохранению объектов культурного наследия и права народов и иных этнических общностей на сохранение и развитие своей культурно-национальной самобытности, защиту, восстановление и сохранение историко-культурной среды обитания и источников информации о зарождении и развитии культуры [1, 2].

Объекты культурного наследия Северного Кавказа имеют не только историко-культурное значение, но и являются важным фактором социально-экономического развития республик СКФО. Стратегия развития СКФО до 2025 года, утвержденная Правительством Российской Федерации, рассматривает туризм, как одно из важнейших направлений развития северо-кавказского региона, позволяющих задействовать и эффективно использовать социально-культурный, производственный, и рекреационный потенциал. Только в Чечне и Ингушетии имеется большое количество замковых комплексов с сооружениями башенного типа, каждый из которых представляет собой уникальную ценность для развития туристической отрасли. Обеспечение сохранности памятников истории и культуры является важнейшей задачей государства.

В настоящее время в СКФО в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие культуры и туризма» и за счет привлечения средств инвесторов и бюджетов северо-кавказских республик выполняется большой объем ремонтно-реставрационных работ [3]. Указом Президента Российской Федерации №745 от 30 декабря 2021 года «О проведении в Российской Федерации Года культурного наследия народов России» в целях популяризации народного искусства, сохранения культурных традиций, памятников истории и культуры, этнокультурного многообразия, культурной самобытности всех народов и этнических общностей Российской Федерации 2022 год объявлен Годом культурного наследия народов России [1]. Однако, принятые и принимаемые меры по сохранению памятников истории и культуры в СКФО являются недостаточными для обеспечения их сохранности. Предстоит полномасштабная работа по ремонту, восстановлению и реставрации объектов культурного наследия Юга России с соответствующим научно-техническим сопровождением.

Постановка задачи. Обследуемый объект располагается на территории Республики Ингушетия. Первые археологические изыскания на отмеченной территории были произведены в последней четверти XIX в. В 1920-е гг. в данном районе проводил свои исследования Л.П. Семенов. В одной из работ он упоминает широко известное в науке Экажевское городище «Ачим-Боарз», Гамурзиевскую боевую башню, золотоордынский мавзолей Борга-Каш у с. Плиево, а также Барсукинское и Яндырское городища. [8]

В горной зоне Ингушетии на территории современного Джейрахского района располагалось около 150 населённых пунктов. Все они состояли из комплексов каменных жилых башен, за редким исключением в каждом из них имелись полубоевые и боевые башни. Многие

селения представляли собой укрепленные замковые комплексы, включавшие в себя одну или несколько боевых и полубоевых башен, объединенных высокими оборонительными каменными стенами с жилыми постройками [9].

Обследуемый объект культурного наследия Бишт располагается в Джейрахском районе республики Ингушетия. Памятник находится в центральной части Тумгойского ущелья, на склоне, примыкающем к асфальтированной горной дороге, идущей в Джейрахское ущелье. Комплекс состоит из более 88 построек разной степени сохранности, и включает в себя 2 крупных очага жилых сооружений, некрополь, а также обособленные жилые и погребальные сооружения.

Авторами было проведено обследование памятника истории и культуры, входящего в архитектурный комплекс «Бишт» — боевой башни с. Бишт Джейрахского района. Обследуемая башня представлена на рис. 1-3.



Рис. 1. Сохранившийся фрагмент боевой башни с. Бишт (вид сбоку)

Fig. 1. A surviving fragment of a combat tower from Bisht (side view)



Рис. 2. Сохранившийся фрагмент боевой башни с. Бишт (вид спереди)

Fig. 2. A surviving fragment of a combat tower from Bisht (front view)



Рис. 3. Сохранившийся фрагмент боевой башни с. Бишт (вид сверху)

Fig. 3. A surviving fragment of a combat tower from Bisht (top view)

Боевая башня в плане представляет собой квадрат со сторонами 4,2 х 4,2 метров: сохранился фрагмент высотой около одного метра. Сохранившийся фрагмент сложен из хорошо обработанных камней на известковом растворе.

Предварительный визуальный осмотр башенного комплекса показал, что общее состояние башни можно оценить как аварийное: верхние ярусы и кровля отсутствуют, деревянные перекрытия полностью утрачены, наружная поверхность каменной кладки покрыта мхами и лишайниками.

Основные сведения об обследуемом объекте культурного наследия представлены в табл.

1.

Таблица 1. Основные сведения об обследуемом объекте культурного наследия
Table 1. Basic information about the surveyed object of cultural heritage

№ п/п	Назначение/ Purpose	Описание/ Description
1.	Количество этажей/ Number of floors	Сведения отсутствуют/ No information
2.	Год постройки, надстройки и последнего капитального ремонта/ Year of construction, superstructure and last overhaul	Сведения отсутствуют/ No information
3.	Наружные стены/ Exterior walls	Стены сложены из природного камня/ The walls are made of natural stone
4.	Верхние ярусы/ Upper tiers	Отсутствуют/ Missing
5.	Система стропил/ Rafter system	Отсутствует/ Missing
6.	Кровля/ Roof	Отсутствует/ Missing
7.	Состояние кладки/ Masonry condition	Известковый раствор, на котором сложена кладка, выветрен на глубину до 100 мм, имеются многочисленные трещины/ The lime mortar on which the masonry is laid is weathered to a depth of 100 mm, there are numerous cracks
8.	Выступающие элементы/ Protruding elements	Разрушены/ Destroyed

Методы исследования. Подбор ремонтных составов проводился экспериментальным путем с использованием разрушающих и неразрушающих методов контроля качества. Обследование объекта культурного наследия выполнено с использованием классических методов оценки технического состояния зданий и сооружений [5], включающих: сплошное техническое обследование; проведение экспертизы.

Техническое обследование рассматриваемого объекта культурного наследия заключалось в выявлении дефектов и неисправностей конструктивов и оценке их общего физического износа. Техническое обследование производится применением визуальных и инструментальных методов, включающих неразрушающий и разрушающий контроль технического состояния [6].

Сплошное техническое обследование объекта рекомендуется проводить после воздействия на здания и сооружения стихийных факторов (землетрясений, наводнений, военных действий и пр.).

Сплошное техническое обследование на рассматриваемом объекте провели в следующем порядке:

- подготовительный этап;
- обследование наземной части;
- обследование подземной части;
- обследование некропольных объектов;
- оформление результатов обследования [5].

В ходе обследования рассматриваемого объекта выполнены следующие виды работ: визуальный осмотр всех конструкций с фиксацией дефектов и повреждений; сбор исходных данных, необходимых для выполнения исследований по подбору раствора для кладки.

По завершении обследовательских работ для вывода объекта из аварийного состояния и сохранения его целостности было запланировано выполнение следующих работ: инъекционное укрепление кладки стен; реставрация и усиление каменной кладки стен; восполнение утраченных участков стен сооружений и завершения логического объёма стен сооружений.

Обсуждение результатов. Для реставрации боевой башни разрабатывался экспериментальный состав на основе Аксила М25, белого цемента, сланцевой крошки и доломитовой муки. Экспериментальный состав раствора представлен в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальный состав раствора для каменной кладки стен боевой башни
Table 2. Experimental composition of the mortar for masonry walls of a combat tower

Наименование компонента Component name	Количество частей по объёму Number of parts by volume	Содержание компонента, % Component content
Аксил М25/ Aksil M25	28,00	45,2
Белый цемент/ White cement	6,00	9,7%
Сланцевая крошка/ Slate chips	20,00	32,3
Доломитовый песок/Dolomite sand	8,00	12,9
Всего/Total	62,00	100,0

Для подбора состава раствора для каменной кладки стен боевой башни в стандартных формах были изготовлены образцы-кубы 70,7х70,7х70,7 мм, которые испытывались в строительной лаборатории ООО «ПроектТехноПлюс».

Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора
Table 3. Physical and mechanical properties of the experimental compositions of the solution

№ пп	Плотность отдельных образцов в возрасте 7 суток, кг/м ³ Density of individual samples at the age of 7 days, kg/m ³	Средняя плотность раствора в возрасте 7 суток, кг/м ³ Average den- sity of solu- tion at the age of 7 days, kg/m ³	Разрушающая нагрузка отдель- ных образцов в возрасте 7 суток, кН Breaking load of individual samples at the age of 7 days, kN	Прочность на сжатие в воз- расте суток, МПа (кгс/см ²) Compressive strength at the age of a day, MPa (kgf/cm ²)		Соответствующий класс раствора Corresponding mortar class
				7	28	
1	671	662	19	1,8	2,9	В 2,5
2	652		16	(18)	(29)	
3	664		17			

Вывод. В результате технического обследования было установлено, что общее состояние объекта оценивалось как аварийное.

Данное обстоятельство потребовало незамедлительное выполнение укрепительных работ по выводу рассматриваемого объекта из аварийного состояния к устойчивому.

В результате выполненных физико-механических испытаний установлено, что прочность на сжатие образцов ремонтного состава в возрасте 28 суток соответствует классу В2,5 (М35).

Соответственно, данный ремонтный состав соответствуют предъявляемым требованиям, и может быть использован при реставрации объектов культурного наследия башенного типа.

Разрабатываемый ремонтно-реставрационный состав максимально приближен к оригиналу, более эффективен и способствует повышению качества работ и долговечности объекта.

Библиографический список:

1. Указ Президента Российской Федерации от 30 декабря 2021 года №745 «О проведении в Российской Федерации Года культурного наследия народов России»;
2. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ, от 05.02.2014 N 2-ФКЗ, от 01.07.2020 N 11-ФКЗ) // Собрание законодательства РФ, 01.07.2020, N 31, ст. 4398.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 317 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие культуры»// Собрание законодательства РФ. – 25.04.2014.
4. Баженов Ю. М., Батаев Д. К-С. Материалы и технологии для ремонтно-восстановительных работ в строительстве. Научная монография. – М.: КОМТЕХ, 2000. – 234 с.
5. Баженов Ю.М., Батаев Д.К-С., Муртазаев С-А.Ю. Ресурсо- и энергосберегающие технологии и материалы для ремонта восстановления зданий и сооружений. –М.: «Комтех-Принт», 2006. – 375 с.;
6. Батаев Д.К-С. Техническая экспертиза зданий и сооружений. –М.: Издательство «Комтех-Принт», 2004. – 309 с.;
7. Батаев Д.К-С., Мажиев Х.Н., Хубаев С-М.К., Муртазаев С-А.Ю., Шамилев А.Г. Техническое обследование и экспертиза зданий и сооружений. -М: «Комтех-Принт», 2008г. – 435 с.;
8. Борейша В.М. Минеральные ресурсы Северо-Кавказского края// Природные богатства Северо-Кавказского края. - М.: Пятигорск, 1935. - 43 с.
9. Гольдштейн А.Ф. Средневековое зодчество Чечено-Ингушетии и Северной Осетии. М.: Наука, 1975. 56 с.;
10. Gentilini C., Franzoni E., Bandini S. and Nobile L. Effect of salt crystallization on the shear behavior of masonry walls: An experimental study, Constr. Build. Mater., - Vol. 37, 2012. - p. 181-189.

References:

1. Decree of the President of the Russian Federation of December 30, 2021 No. 745 « On Observance in the Russian Federation of the Year of the Cultural Heritage of the Peoples of Russia» (In Russ)
2. The Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on December 12, 1993) (subject to amendments made by the Laws of the Russian Federation on amendments to the Constitution of the Russian Federation of December 30, 2008 N 6-FKZ, of December 30, 2008 N 7-FKZ, of February 5, 2014 N 2 -FKZ, dated 07/01/2020 N 11-FKZ) // *Collection of Legislation of the Russian Federation*, 07/01/2020, N 31, art. 4398; (In Russ)
3. Decree of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 No. 317 «On approval of the state program of the Russian Federation "Development of Culture". *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 04.25.2014. (In Russ)
4. Bazhenov Yu. M., Bataev D. K-S. Materials and technologies for repair and restoration work in construction. Scientific monograph. *Komtech-Print*, 2000; 234. (In Russ)
5. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu. Resource- and energy-saving technologies and materials for repair, restoration of buildings and structures. M.: "*Komtech-Print*", 2006; 375. (In Russ)
6. Bataev D.K-S. Technical expertise of buildings and structures. M.: *Komtekh-Print Publishing House*, 2004; 309
7. Bataev D.K-S., Mazhiev Kh.N., Khubaev S-M.K., Murtazaev S-A.Yu., Shamilev A.G. Technical inspection and expertise of buildings and structures. -M: "*Komtech-Print*", 2008; 435. (In Russ)
8. Boreisha V.M. Mineral resources of the North Caucasus region// Natural wealth of the North Caucasus region. - M.: Pyatigorsk, 1935; 43. (In Russ)
9. Goldstein A.F. Medieval architecture of Chechen-Ingushetia and North Ossetia. M.: *Nauka*. 1975; 56. (In Russ)
10. Gentilini C., Franzoni E., Bandini S. and Nobile L. Effect of salt crystallization on the shear behavior of masonry walls: *An experimental study, Constr. Build. Mater.*, 2012; 37: 181-189.

Сведения об авторах:

Светлана Георгиевна Шеина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство», rgsu-gsh@mail.ru

Дена Карим-Султанович Батаев, доктор технических наук, профессор, директор, kniiran@mail.ru

Магомет Макшарипович Малороев, инженер, maloroev@gmail.ru

Петимат Денаевна Батаева, инженер, младший научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов, bataeva_ggntu@mail.ru

Information about authors:

Svetlana G. Sheina, Dr.Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Urban Development and Economy, rgsu-gsh@mail.ru

Dena K.-S. Bataev, Dr.Sci. (Eng), Prof., director, kniiran@mail.ru

Magomet M. Maloroev, Engineer; maloroev@gmail.ru

Petimat D. Bataeva, Engineer, Junior Researcher, Laboratory of Metals, Alloys and Composite Materials, bataeva_ggntu@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 30.06.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30.07.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 30.07.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160

Оригинальная статья / Original Paper

Особенности работы балочных 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. В данной статье рассматриваются плоские большепролетные конструкции, приводятся особенности их работы, а также примеры конструирования. Даются формулы для определения генеральных размеров этих конструкций. Показаны особенности работы и конструирования, а также расчётные формулы. Приведены отправочные марки, виды сечений и узлы сопряжения элементов. **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 конструкции, надёжные, легкие, технологичные по изготовлению, транспортировке и монтажу. Изложенные в статье виды сечений и узлы сопряжения находят применение в практике проектирования и строительства. **Вывод.** Предложены рациональные конструктивные решения, которые позволяют уменьшить собственный вес плоских большепролетных конструкций за счёт оптимального выбора их конструктивной и расчётной схемы.

Ключевые слова: плоские конструкции, балочная ферма, рамные системы, арки, расчётная схема, опорные узлы, вид сопряжения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Особенности работы балочных большепролетных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (3):152-160. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160

Features of the work of large-span beam structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, Vishtalov R.I.

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

Abstract. Objective. This article discusses flat large-span structures, provides features of their work, as well as design examples. Formulas are given for determining the general dimensions of these structures. **Method.** Features of work and design, as well as calculation formulas are given. Shipping marks, types of sections and junctions of elements are given. A technique is described that allows 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 us to design long-span flat structures that are reliable, lightweight, technologically advanced in terms of manufacturing, transportation and installation. The types of sections and junctions described in the article are used in the practice of design and construction. **Conclusion.** The article discusses rational design solutions that allow reducing the own weight of flat large-span structures due to the optimal choice of their design and design scheme.

Keywords: flat structures, beam truss, frame systems, arches, design scheme, support units, interface type

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Peculiarities of operation of large-span beam structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(3): 152-160. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-152-160.

Введение. Большепролетные конструкции можно разбить на два больших класса:

1. Плоские большепролетные конструкции. К ним относятся: балочные фермы; рамные системы; арочные конструкции.
2. Пространственные большепролетные конструкции. К ним относятся: оболочечные цилиндрические; оболочечные двоякой кривизы; решетчатые оболочечные конструкции; висячие оболочки (вантовые и мембранные); д) надувные (лёгкие быстрособираемые конструкции) [1, 11, 12].

Плоские большепролетные конструкции с точки зрения технологии изготовления, транспортировки и монтажа относительно просты и находят широкое применение в практике проектирования и строительства.

Пространственные большепролетные конструкции относительно сложны. Эти конструкции по сравнению с плоскими легче по затратам материала примерно на 15-25%.

Из-за сложности изготовления транспортировки и монтажа пространственные конструкции применяются относительно реже. Однако по мере разработки более современных технологических приёмов эти конструкции в будущем найдут широкое применение.

Постановка задачи. С увеличением пролёта покрытия внутренние усилия в сечениях несущей конструкции, а также вертикальные перемещения существенно увеличиваются. В связи с этим возникают проблемы, связанные с уменьшением собственного веса пролётного строения, а также обеспечения его необходимой жёсткости для нормальной эксплуатации всего здания.

В статье рассматриваются конструктивные схемы ферм параболического очертания, а также приёмы их компоновки, которые позволяют уменьшить собственный вес и повысить жёсткость большепролетной конструкции. Приводятся соответствующие конструктивные и расчётные схемы, рассматриваются особенности их расчёта.

С увеличением пролёта покрытия фермы с прямоугольным очертанием становятся не рациональными [1-4, 6-8]. При пролётах более 60 м фермы параболического очертания могут успешно «соперничать» с рамными, с арочными и с оболочечными системами покрытия (рис. 1).

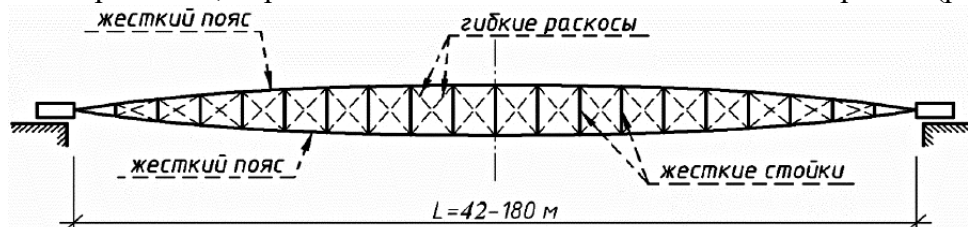


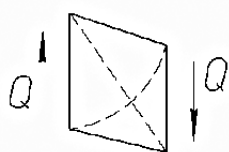
Рис. 1. Поперечный разрез покрытия

Fig. 1. Cross section of the coating

Здесь и далее пунктирными линиями показаны гибкие элементы.

Преимущества покрытия параболического очертания очевидны: очертание, имеющее форму параболы, максимально приближен к эпюре изгибающих моментов от собственного веса покрытия; гибкие раскосы расположены так, что при любой нагрузке один из раскосов растянут, а другой сжат. При этом сжатый раскос теряет устойчивость (рис. 2).

Панель фермы



Панель фермы

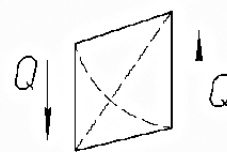


Рис. 2. Схемы работы раскосов

Fig. 2. Schemes of work of braces

Такое конструктивное решение позволяет применять для раскосов высокопрочные и относительно лёгкие прокатные профили малого калибра [5], канаты, полосовую сталь, высокопрочную арматуру и т.д. Всё это приводит к снижению собственного веса покрытия. При больших пролетах возможны и другие варианты расположения гибких раскосов. Например, в варианте, показанном на рис. 3, расчетная длина жестких стоек, работающих на сжатие, уменьшается вдвое, а соответствующая критическая сила увеличивается в 4 раза.

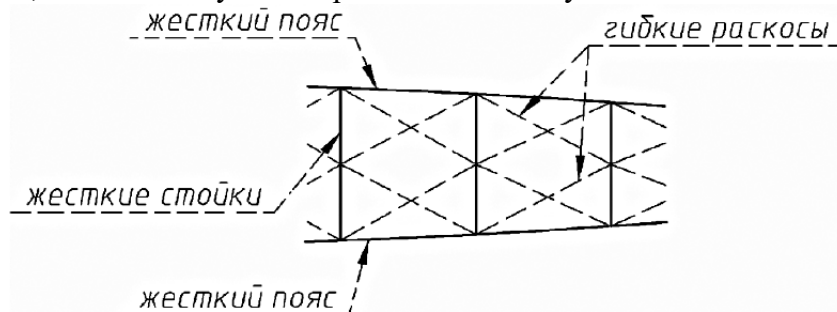


Рис. 3. Фрагмент фермы. Расположение раскосов в двух ярусах.

Пояса и стойки фермы – жесткие, раскосы – гибкие

Fig. 3. Fragment of a farm. Arrangement of braces in two tiers.

Belts and truss racks are rigid, braces are flexible

Фермы параболического очертания могут быть использованы не только в покрытиях зданий, но и в пролетных строениях мостов. При этом необходимо соединять фермы между собой связями, обеспечивающими устойчивость ферм из их плоскости (рис. 4).

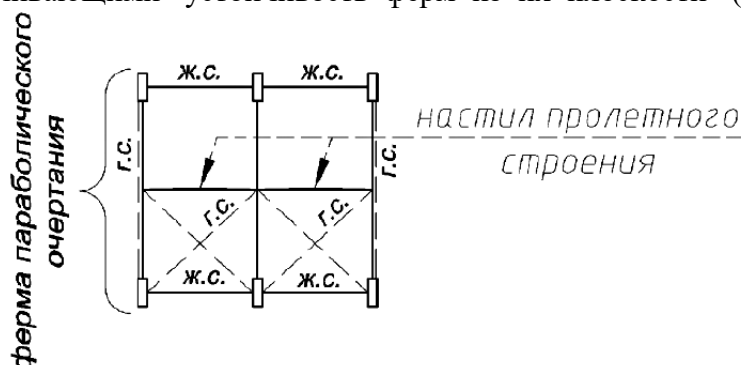


Рис. 4. Расположение в поперечном сечении моста жестких (ж.с.) и гибких (г.с.) связей

Fig. 4. Arrangement in the cross section of the bridge of rigid (l.s.) and flexible (f.s.) connections

Здесь: пояса и стойки ферм жесткие; пунктирами показаны поперечные и продольные гибкие связи. Из основной конструктивной схемы (рис. 1) следуют ещё 2 частных варианта.

Первый вариант

Нижний пояс и стойки – жесткие, верхний пояс и раскосы – гибкие (рис. 5).

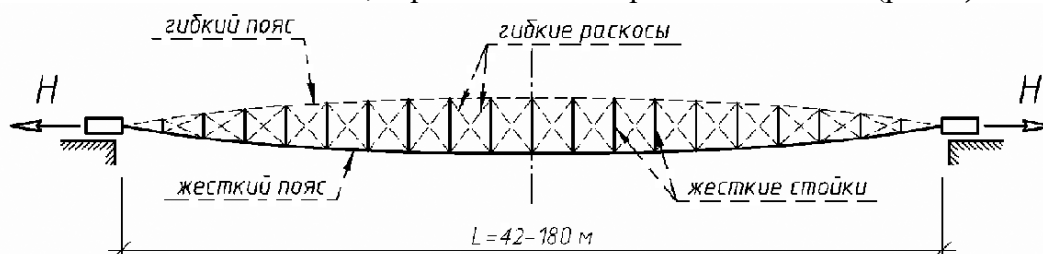


Рис. 5. Ферма - висячая распорная система

Fig. 5. Truss - hanging spacer system

Растянутый нижний пояс представляет собой жесткую нить - это позволяет стабилизировать деформации.

Второй вариант

Нижний и верхний пояса – гибкие; стойки – жесткие; раскосы отсутствуют (рис. 6).

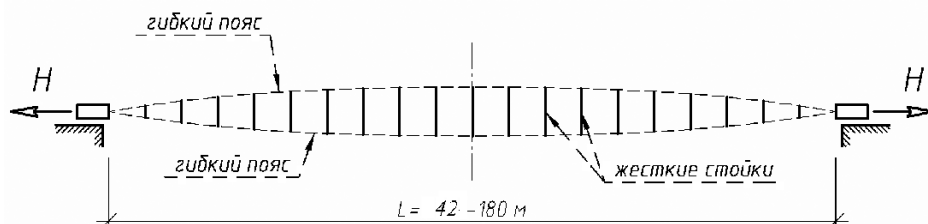


Рис. 6. Ферма превращается в вантовую систему

Fig. 6. The farm turns into a cable-stayed system

Стабилизация деформаций достигается за счёт предварительного напряжения гибких поясов (верхнего и нижнего).

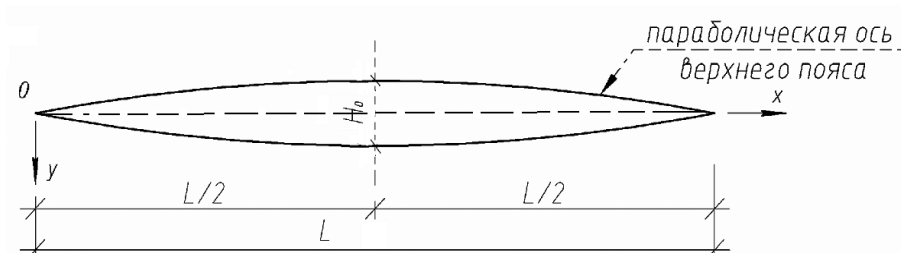


Рис.7. Очертание фермы и система координат

Fig. 7. Truss outline and coordinate system

Методы исследования. Уравнение очертания параболы в координатной системе, принятой на рис. 6, имеет вид:

$$y(x) = -\frac{2H_0}{L^2}x^2 + \frac{2H_0}{L}x. \quad (1)$$

Нижняя парабола определяется зеркальным отражением параболы верхней. Из опыта проектирования можно задаться (рис. 7) отношением:

$$\frac{L}{H_0} = 10 \div 15.$$

После чего, все ординаты фермы вычисляются с помощью функции $y(x)$ (1). Расчетный изгибающий момент от собственного веса покрытия q можно приближенно вычислить по формуле:

$$M(x) = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2}. \quad (2)$$

Условие прочности для поясов фермы также можно приставить приближенно в следующем виде:

$$2 \cdot A_n \cdot R \cdot \gamma \cdot y(x) \geq M(x). \quad (3)$$

Здесь:

A_n – площадь поперечного сечения пояса фермы;

R – расчетное сопротивление металла;

γ – коэффициент условий работы фермы.

Подставляя в выражение (3) функции (1) и (2), получаем:

$$2 \cdot A_n \cdot R \cdot \gamma \cdot \left[-\frac{2H_0}{L^2}x^2 + \frac{2H_0}{L}x \right] \geq \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2}.$$

Это условие выполняется для всех значений x , если принять:

$$A_n \geq \frac{qL^2}{8R\gamma H_0} . \quad (4)$$

Другими словами, здесь обеспечивается равнопрочность во всех сечениях поясов фермы, когда на неё действует нагрузка от собственного веса покрытия.

Поскольку на покрытие, кроме постоянных нагрузок, действуют и временные [9]: сейсмические силы, ветровой напор, снеговой покров, обледенение, технологические воздействия, температурные перепады, – необходимо полученное выше значение площади поясов фермы A_n скорректировать с учетом указанных выше нагрузок и требований статической и динамической устойчивости поясов и стоек.

В большепролетных покрытиях фермы параболического очертания рационально проектировать с предварительным их напряжением.

Обсуждение результатов. Итак, высокая эффективность конструкции обеспечивается четырьмя факторами:

1. Параболическим очертанием фермы;
2. Гибкими раскосами с крестообразным их расположением;
3. Предварительным напряжением фермы;
4. Применением высокопрочных и легких материалов.

Если заменить верхние и нижние гибкие пояса жесткими, то вантовая ферма (рис. 6) превращается в безраскосную ферму. Распор H (рис.6) в этом случае воспринимается верхним жестким поясом фермы.

Далее рассмотрим безраскосную ферму двойного параболического очертания (рис.8). Эта конструкция занимает промежуточное положение между фермой и полой оболочкой.

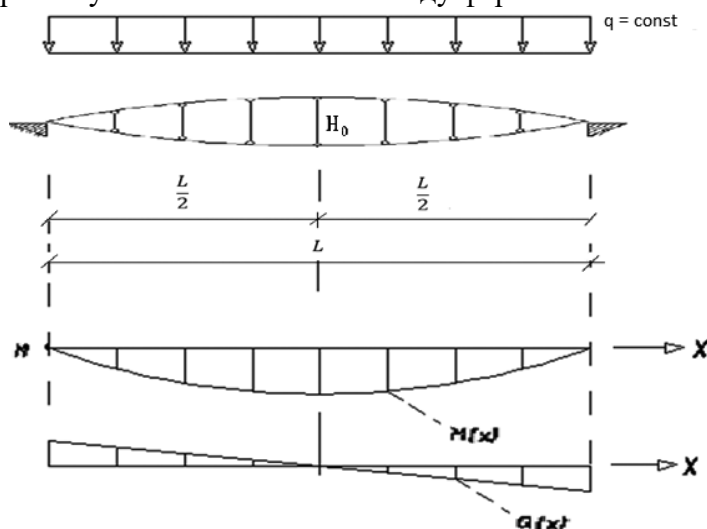


Рис. 8. Конструктивная схема фермы и эпюры M и Q
 Fig. 8. Structural scheme of the truss and diagrams M and Q

В координатной системе, показанной на рис. 8, функция изгибающих моментов имеет вид

$$M(x) = \frac{qL}{2}x - \frac{qx^2}{2} \quad (5)$$

Дифференцируя эту функцию, найдем поперечные силы

$$Q(x) = \frac{qL}{2} - qx , \quad (6)$$

В середине пролета поперечная сила, равна нулю, и пояса работают на восприятие только нормального усилия от изгибающего момента

$$M = \frac{qL^2}{8}.$$

А в других сечениях пояса воспринимают усилия как от изгибающих моментов, так и от поперечных сил. Однако сечения поясов всюду по пролету сохраняют равную прочность.

Далее мы докажем это утверждение. С этой целью рассмотрим сечения пояса с произвольной координатой по x . Из рис.9 следует, что площадь сечения пояса по вертикали A_B больше площади сечения по нормали A_n , то есть

$$A_B = \frac{A_n}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Как известно,

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha}}. \quad (8)$$

В вертикальном сечении пояса рис. (9,б) возникают нормальные и касательные напряжения;

$$\sigma = \frac{N}{A_n}, \tau = \frac{Q}{2A_n}. \quad (9)$$

Здесь коэффициент 2 при τ учитывает, что Q воспринимается 2-мя поясами. Условие прочности по IV-теории пластичности для металлов имеет вид [10]:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \leq \gamma R. \quad (10)$$

Здесь:

R – расчетное сопротивление металла,

γ – коэффициент условий работы.

Подставляя напряжения (9) в условие прочности (10), получаем

$$\frac{1}{A_n} \sqrt{N^2 + \frac{3}{4} Q^2} \leq R \gamma. \quad (11)$$

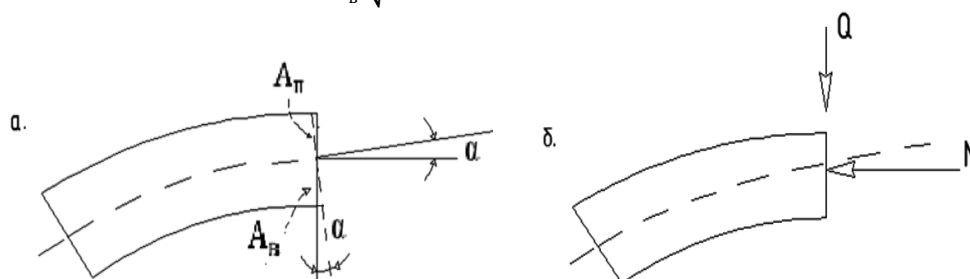


Рис.9. Схемы сечения пояса: а- геометрическая схема; б- расчётная схема

Fig.9. Belt section diagrams: a - geometric scheme; b - calculation scheme

Вертикальную площадь сечения пояса (7) с учетом выражения (9) также представим в удобном виде

$$A_B = A_n \cdot \sqrt{1 + tg^2 \alpha}. \quad (12)$$

Функцию $tg \alpha$, входящую в (12), определим как производную функции очертания пояса фермы:

$$tg \alpha = y'(x) = -\frac{4 H_0}{L^2} x + \frac{2 H_0}{L}. \quad (13)$$

Нормальное усилие N , которое входит в условие прочности (11), можно найти из условия равновесия сечения на восприятие изгибающего момента:

$$N = \frac{M(x)}{2y(x)},$$

или с учетом выражения (1)

$$N = \frac{\left[-\frac{qx^2}{2} + \frac{qL}{2} x \right]}{2 \left[-\frac{2H_0}{L^2} x^2 + \frac{2H_0}{L} x \right]} = \frac{qL^2}{8 H_0}$$

$$\text{или} \quad N = \frac{qL^2}{H_0}. \quad (14)$$

Теперь вернемся к условию прочности (11). С учетом равенств (2), (12), (13), (14) условие (11) запишем так:

$$\frac{q}{A_{\Pi}} \sqrt{\frac{(\frac{L^2}{8H_0})^2 + \frac{3}{4}(\frac{L}{2} - x)^2}{1 + [-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L}]^2}} \leq R\gamma. \quad (15)$$

Неравенство (15) можно упростить:

$$\frac{qL^2}{8H_0A_{\Pi}} \sqrt{\frac{1 + 1,5(-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L})^2}{1 + (-\frac{4H_0}{L^2}x + \frac{2H_0}{L})^2}} \leq R\gamma \quad (16)$$

Для соотношений $\frac{L}{H_0} = 8 \div 15$ корень, входящий в (16), с высокой точностью можно принять равным 1, для всех значений x .

Например, обозначив корень, входящий в формулу (16), можно показать, что

$$\text{— при } x = 0 \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10}$$

$$U = \sqrt{\frac{1 + 1,5 \cdot 0,04}{1 + 0,04}} \approx 1;$$

$$\text{— при } x = \frac{L}{2} \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10} \text{ для всех соотношений}$$

$$\text{— при } x = L \text{ и } \frac{H_0}{L} = \frac{1}{10}$$

$$U = \sqrt{\frac{1 + 1,5 \cdot 0,04}{1 + 0,04}} \approx 1$$

С учетом сказанного, приняв равным единице корень, входящий в формулу (16), условие прочности с высокой точностью можем представить так:

$$\frac{qL^2}{8H_0A_{\Pi}} \leq R\gamma$$

или

$$A_{\Pi} \geq \frac{qL^2}{8H_0R\gamma} \quad (17)$$

Неравенство (17) говорит о равнопрочности сечения пояса по всей длине пролета фермы. Другими словами, сечения поясов, воспринимая как изгибающие моменты, так и поперечные силы, остаются равнопрочными по всей длине пролета фермы. А это естественно приводит к уменьшению затрат металла на изготовление поясов: нормальные сечения поясов по всему пролету остаются постоянными и определяются формулой (17). Говоря иначе, для рассматриваемой фермы, для фермы с поясами параболического очертания, не требуются раскосы для восприятия поперечных сил, когда нагрузка q – равномерно распределенная. Изгибающие моменты и поперечные силы в этом случае воспринимаются исключительно поясами фермы.

Стойки (рис. 9), необходимы для восприятия местной нагрузки от q , а также для фиксации поясов и обеспечения их местной устойчивости поясов в плоскости самой фермы. При этом пояса остаются безмоментными на всем пролете фермы. К такому выводу можно прийти и иначе. На рис. показана равнодействующая F горизонтального усилия $N = \frac{M}{2y}$ и поперечной силы $\frac{1}{2}Q = \frac{1}{2} \frac{dM}{dx}$.

Здесь коэффициент $\frac{1}{2}$ учитывает наличие 2-х поясов. Из рис. 10 следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{1}{2}Q}{N}.$$

Горизонтальное усилие

$$N = \frac{M}{2y}.$$

С учетом этого имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Q y(x)}{M}$$

или

$$M \operatorname{tg} \alpha = Q y(x).$$

Подставляя в это равенство выражения (1), (2), (13), можно убедиться, что оно выполняется точно. Это значит, что кривая пояса – безмоментна для всех значений x .

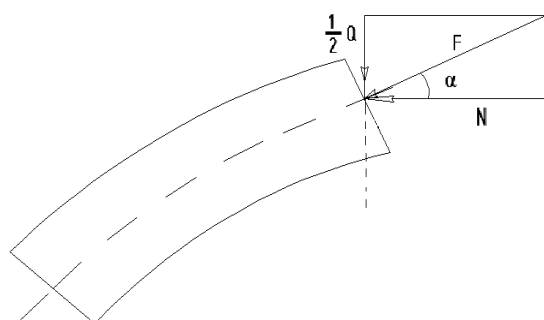


Рис.10. Схема воздействия внутренних усилий в сечении пояса
Fig.10. Scheme of the impact of internal forces in the section of the belt

Выше была рассмотрена фермы параболического очертания. При этом была приведена ферма с гибкими раскосами, а также рассмотрена безраскосная ферма параболического очертания. Фермы параболического очертания имеют минимальный вес, поэтому они позволяют перекрывать достаточно большие пролеты $60 \div 180$ м.

Вывод. Конструктивные схемы большепролетной фермы параболического очертания даются в двух вариантах: раскосная ферма; безраскосная ферма.

Раскосные фермы рациональны, если действующие относительно середины пролёта нагрузки кососимметричны.

Безраскосные фермы рациональны, когда действующие нагрузки относительно середины пролёта симметричны или близки к ним. Эти фермы в отличие от других ферм имеют минимальный вес.

Авторами изложена методика подбора сечения поясов ферм параболического очертания;

1. За счёт параболического вида очертания обеспечивается равнопрочность сечений поясов фермы по всему пролёту, что позволяет уменьшить, собственный вес конструкции;
2. Отсутствие раскосов ферм параболического очертания существенно упрощает технологию изготовления конструкции;
3. Поскольку при вертикальных колебаниях один из поясов фермы всегда растянут, то ферма параболического очертания приобретает высокую сейсмостойкость, что принципиально важно для большепролетных конструкций, возводимых в сейсмоопасных районах.

Библиографический список:

1. «Металлические конструкции» – под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. –2-е изд. – Москва, строойиздат, 1975. – 415 с.

4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, строойиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, строойиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П. – Москва, строй.издат. 1980. – 776с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. «Основы металлических конструкций» – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
12. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.

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)
12. Trofimov V.I., Eremeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" Moscow, Stroyizdat, 1990. (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. of the 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 22.07.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.08.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 20.08.2022.

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 середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (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 направлению журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: 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– №3 – 2022.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 49, No.3 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 01.10.2022г. Сдано в печать 15.10.2022г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 19,05. Уч. изд.л. 19,00

Заказ № 1305.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.