

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 50, № 3, 2023.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 50, No.3, 2023.

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 тех-нологий 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», 2023.

The research journal is registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Commu-nications (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 in-ternational system of bibliographic references: CrossRef; Google Scholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Re-search Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); ROAD; Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Socionet; CyberLeninca, Mi-crosoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

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

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 50, № 3, 2023

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

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

Заместитель главного редактора:

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

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

Редакционная коллегия:

Научная рубрика «Энергетика и электротехника»

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная рубрика «Строительство и архитектура»

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

Группы научных специальностей

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

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

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

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

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

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

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки)

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки)

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 50, № 3 Махачкала, 2023. 205с.

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

Адрес учредителя и издателя 367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Тел./факс (8722)623715; (8722)623964

e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника.....	6
О.В. Евдулов, Д.А. Магомедов, Р.М. Магомедов, К.А. Шихабидов. Исследование термоэлектрического нуля-термостата.....	6
М.П. Кузнецов. Моделирование системы низкотемпературной подготовки газа.....	14
И.Е. Лобанов. Моделирование течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами вязких теплоносителей в ламинарной области, а также в области перехода к турбулентному течению.....	24
Ю.В. Шипулина, М.Ф. Руденко, В.Н. Саинова. Технические аспекты развития гелиоэнергетической холодильной техники на твердых сорбентах.....	37
Информационные технологии и телекоммуникации.....	46
К.Н. Власов, О.В. Толстых, О.В. Исаев. Использование биометрических данных для защиты информации.....	46
В.А. Воеводин, В.С. Черняев, И.В. Виноградов. Рекомендации по применению методики оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло.....	57
Д.А. Елизаров, А. В. Катков. Практический анализ вредоносного программного обеспечения.....	66
А.О. Ефимов, С.А. Мишин, Е.А. Рогозин. Прогнозирование количества выявляемых уязвимостей информационной безопасности на основе теории «серых систем».....	72
Р.А. Жилин. Экспресс – метод формирования представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы.....	83
Р.М. Клеблеев. Дополнительные функции и дополнительные краевые условия в задачах теплопроводности для многослойных тел.....	92
И.А. Лоскутов, В.А. Репенко. Защита верхней полусферы объекта критической информационной инфраструктуры...100	
Д.А. Мачуева, Д.Р. Бараев, Т.М.-А. Бечуркаев. Анализ и комплексная оценка развития и применения нейросетевой диалоговой системы ChatGPT.	110
А.У. Мендиев, Т.Г. Айгумов, Э.М. Абдулмукуминова. Анализ и обучение модели нейронной сети распознавания дорожных знаков.....	118
В.В. Никулин, П.А. Мишин, П.А. Мишина. Коррекция оптимального регулятора на основе решения обратной задачи оптимальной стабилизации с векторным управлением.....	124
О.Д. Окладникова, А.В. Буков, Н.Н. Жуков. Разработка клиентских приложений на блокчейн.....	132
А.Ф. Рогачев, И.С. Белоусов. Моделирование процесса обучения нейросети DeepLabv3 для сегментации сельскохозяйственных полей.....	142
Л.П. Скрипко, А.А. Скрипко. Автоматизированные системы управления в тепличных хозяйствах.....	150
А.Г. Якунин. Применение сжатия данных для систем технического мониторинга.....	156
А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, О.И. Бокова, С.Б. Ахлостин. Алгоритмизация расчета оценки защищенности операционных систем АИС ОВД, разработанного на основе анализа требований безопасности ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз.....	167
Строительство и архитектура.....	172
Э.Р. Бареева. Конструктивные решения крупнотоннажных резервуаров для хранения сжиженных природных газов.....	172
В.Т. Федоров, М.Н. Кокоев. Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел.....	181
Г.Н. Хаджишалапов, П.Д. Батаева, А.Д. Батаев. Технологии и материалы для ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры.....	190
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Адаптивные сейсмостойкие системы.....	197
Требования к оформлению статей.....	203

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»

HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 5 0 , N o . 3 , 2 0 2 3 .

<p>Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121</p> <p>Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507</p> <p>Editorial Board:</p> <p>Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering»</p> <p>Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;</p> <p>Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications»</p> <p>Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p> <p>Scientific rubric «Building and architecture»</p> <p>Executive editor: Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, 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; Muhtaridin 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 NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Editorial council</p> <p>Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p>The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;</p>	<p>Research areas</p> <p>2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences),</p> <p>2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences),</p> <p>2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences),</p> <p>2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences),</p> <p>1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p> <p>2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p> <p>2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences)</p> <p>2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p> <p>2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences),</p> <p>2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences),</p> <p>2.1.10. Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences),</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 50, No.3 Makhachkala, 2023–205p.</p> <p>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</p>
---	---

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
O.V. Evdulov, D.A. Magomedov, R.M. Magomedov, K.A. Shikhabidov. Research of thermoelectric null-thermostat.	6
M.P. Kuznetsov. Modeling of a low-temperature gas treatment system.....	14
I.E. Lobanov. Modeling of the flow and heat exchange in pipes with turbulators of viscous heat carriers in the laminar region, as well as in the transition to turbulent flow.	24
Y.V. Shipulina, M.F., Rudenko, V.N. Sainova. Technical aspects of the development of solar energy refrigeration technology on solid sorbents.....	37
Information Technology and Telecommunications	46
K.N. Vlasov, O.V. Tolstykh, O.V. Isaev. The use of biometric data to protect information.....	46
V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, I.V. Vinogradov. Recommendations for using a methodology for assessing the security of an automated control system for critical information infrastructure from DDoS attacks based on Monte Carlo simulation.	57
D.A. Elizarov, A.V. Katkov. Practical Malware Analysis..	66
A.O. Efimov, S.A. Mishin, E.A. Rogozin. Forecasting the number of identified information security vulnerabilities based on the theory of “Gray Systems”.....	72
R.A. Zhilin. Express is a method of forming a representative expert coalition based on an extended correlation matrix.....	83
R.M. Klebleev. Additional functions and additional boundary conditions in heat conduction problems for multilayer bodies.	92
I.A. Loskutov, V.A. Repenko. Protection of the upper hemisphere of a critical information infrastructure facility.....	100
D.A. Machueva, D.R. Baraev, T. M.-A. Bechurkaev. Analysis and comprehensive assessment of the development and application of the neural network dialogue system ChatGPT.....	110
A.U. Mentsiev, T.G. Aigumov, E.M. Abdulkumminova. Analysis and training of a traffic sign recognition neural network model.....	118
V.V. Nikulin, P.A. Mishin, P.A. Mishina. Correction of the optimal regulator based on solving the inverse problem of optimal stabilization with vector control.....	124
O.D. Okladnikova, A.V. Bukov, N.N. Zhukov. Development of client applications on Block-chain.....	132
A. F. Rogachev, I. S. Belousov. Simulation of the of the DeepLabv3 neural network learning process for the agricultural fields segmentation.....	142
L.P. Skripko, A.A. Skripko. Automated Control Systems in Greenhouses..	150
A. G. Yakunin. Research and development of data compression methods for technical monitoring systems.....	156
A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, O.I. Bokova, S.B. Akhlyustin. Algorithmization for calculating the security assessment of AIS operating systems of internal affairs bodies, developed on the basis of an analysis of security requirements GOST R ISO/IEC 15408 and possible threats.....	167
Building and Architecture	172
E.R. Bareeva. Design solutions of large-capacity storage tanks for liquefied natural gases.....	172
V.T. Fedorov, M.N. Kokoev. Surface Energy in the Processes of Disintegration of Sol-ids.....	181
G.N. Khadzhishalapov, P.D. Bataeva, A.D. Bataev. Technologies and materials for the repair, restoration and restoration of historical and cultural monuments.....	190
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Adaptive Earthquake-resistant Systems.....	197
Formatting requirements for papers	203

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13



Оригинальная статья /Original article

Исследование термоэлектрического нуля-термостата

О.В. Евдулов, Д.А. Магомедов, Р.М. Магомедов, К.А. Шихабидов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка и исследование конструкции термоэлектрического нуля-термостата, отличающейся малым энергопотреблением, в которой высокая точность стабилизации температуры опорных спаев дифференциальных термопар достигается за счет размещения их непосредственно вблизи границы раздела вода - лед. **Метод.** Исследование проводилось на экспериментальной модели термоэлектрического нуля-термостата. Для исследования процессов теплообмена осуществлялось визуальное наблюдение за перемещением границы раздела фаз лед-вода в камере нуля-термостата. Регистрировались значения температур у нижнего и верхнего оснований камеры, а также, на горячем и холодном спае термоэлектрического модуля (ТЭМ) с помощью термопар. **Результат.** Получены зависимости изменения температуры верхнего и нижнего основания рабочей камеры, а также границы раздела фаз во времени, продолжительности времени полного проплавления льда от тока питания ТЭМ, разности температур, соответственно, между поверхностью холодного спая ТЭМ и нижнего основания рабочей камеры, поверхностью горячего спае термомодуля и верхнего основания рабочей камеры. **Вывод.** Установлено, что скорость перемещения границы раздела фаз сильно зависит от величины тока питания термоэлектрической батареи, что соответствует тепловому потоку на верхнем и нижнем основании рабочей камеры. Как следует из приведенных данных, изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего. При токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуля - термостата при изменении тока питания ТЭМ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$.

Ключевые слова: термоэлектрический нуля-термостат, дифференциальная термопара, термоэлектрический модуль, граница фазового перехода, эксперимент, измерение, температура.

Для цитирования: О.В. Евдулов, Д.А. Магомедов, Р.М. Магомедов, К.А. Шихабидов. Исследование термоэлектрического нуля-термостата. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13

Research of thermoelectric null-thermostat

O.V. Evdulov, D.A. Magomedov, R.M. Magomedov, K.A. Shikhabidov

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop and study the design of a thermoelectric null-thermostat, characterized by low power consumption, in which high accuracy of temperature stabilization of the reference junctions of differential thermocouples is achieved by placing them directly near the water-ice interface. **Method.** The study was carried out on an experimental model of a thermoelectric null-thermostat. To study heat transfer processes, visual observation of the movement of the ice-water interface in the null-thermostat chamber was carried out. Temperature values were recorded at the lower and upper bases of the chamber, as well as at the hot and cold junctions of the thermoelectric module (TEM) using thermocouples. **Result.** The dependences of the change in temperature of the upper

and lower base of the working chamber, as well as the phase boundary over time, the duration of time for complete ice penetration on the TEM supply current, and the temperature difference, respectively, between the surface of the cold junction of the TEM and the lower base of the working chamber were obtained, the surface of the hot junction of the thermal module and the upper base of the working chamber. **Conclusion.** It has been established that the speed of movement of the phase boundary strongly depends on the value of the supply current of the thermoelectric battery, which corresponds to the heat flow at the upper and lower base of the working chamber. As follows from the data presented, the change in temperature of the upper base is more noticeable than the lower one. At a current of 2, 4 and 6 A, the speed of movement of the phase boundary is 0.007 m/h, 0.01 m/h and 0.013 m/h, respectively. In this case, the duration of complete melting of ice, corresponding to the duration of operation of the null thermostat, when the TEM supply current changes from 2 to 7 A, is reduced from $1,91 \cdot 10^4$ s to $1,38 \cdot 10^4$.

Keywords: thermoelectric null thermostat, differential thermocouple, thermoelectric module, phase transition boundary, experiment, measurement, temperature.

For citation: O.V. Evdulov, D.A. Magomedov, R.M. Magomedov, K.A. Shikhabidov. Research of thermoelectric null-thermostat. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-6-13

Введение. Развитие современной измерительной техники требует совершенствования методов и средств контроля различных физических величин при проведении экспериментальных исследований, лабораторных испытаниях новых устройств или в области управления технологическими процессами на производстве. Как правило, прецизионному контролю могут подлежать самые различные параметры, однако, одной из наиболее часто измеряемых физических величин является температура.

Важным элементом любой системы измерения температуры является температурный преобразователь - датчик, параметры и схема включения которого во многом определяют точность всей системы. Известны различные типы датчиков температуры, из них на практике чаще всего применяются различные разновидности резистивных и полупроводниковых датчиков и др., а также дифференциальные термопары [1]. Причем, последние выделяются некоторыми своими положительными качествами, основными из которых являются высокая достижимая точность измерений, широкий диапазон рабочих температур, возможность длительной эксплуатации в условиях агрессивных внешних сред с сохранением основных параметров. К их недостаткам при проведении точных измерений можно отнести необходимость в термостабилизации опорных спаев при определенном значении температуры, чаще всего, при нуле градусов по Цельсию.

Среди наиболее распространенных устройств, применяемых для термостабилизации опорных спаев при данной температуре выделяется сосуд Дьюара и его различные модификации, которые, в общем, представляют собой сосуд, заполненный тающим льдом [2, 3]. Недостатки подобных конструкций заключаются в необходимости частой замены рабочего вещества, больших размерах, а также наличии неравномерности распределения температуры в сосуде, снижающей точность термостатирования опорных спаев термопар. Известны также конструкции [4], принцип работы которых основан на применении датчика температуры, который включен в схему двухпозиционного регулирования. При этом точность термостабилизации зависит от точности используемого датчика, что является их существенным недостатком.

В [5] предложен подход с применением термоэлектрической системы для термостатирования рабочего вещества, где контрольный спай дифференциальной термопары при помощи поплавковой конструкции размещается на границе раздела твердой и жидкой фазы вещества, положение которой регулируется с помощью стандартного термоэлектрического модуля (ТЭМ). Применение ТЭМ для целей стабилизации температуры является обоснованным и доказанным в работах [6-14], что обусловлено такими их достоинствами, как малые габаритные размеры, возможность работы как в режиме охлаждения, так и нагрева, бесшумность и экологичность [15-19].

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка и исследование конструкции термоэлектрического нуля-термостата, отличающейся малым энергопотреблением, в которой высокая точность стабилизации температуры опорных спаев дифференциальных термопар достигается за счет размещения их непосредственно вблизи границы раздела вода - лед.

Методы исследования. Исследование проводилось на экспериментальной модели термоэлектрического нуля-термостата (рис.1), состоящего из цилиндрической камеры 3, имеющей прозрачные стенки с низкой теплопроводностью и заполненной рабочим веществом 4 - дистиллированной водой, изначально находящейся в твердой фазе (лед). ТЭМ 2 закреплен между двумя теплопроводящими пластинами 6 и 7, выполненными из алюминия, причем, пластина 6 закреплена у верхнего основания (горячего спаю) термомодуля, пластина 7 – находится в хорошем тепловом контакте с его нижним основанием (холодный спай). Конструкция выполнена таким образом, что тепло от горячего спаю ТЭМ 2 подводится посредством теплопроводящей пластины 6 к верхнему основанию цилиндрической камеры 3, а посредством холодного спаю ТЭМ 2 через теплопроводящую пластину 7 производится охлаждение нижнего основания цилиндрической камеры 3.

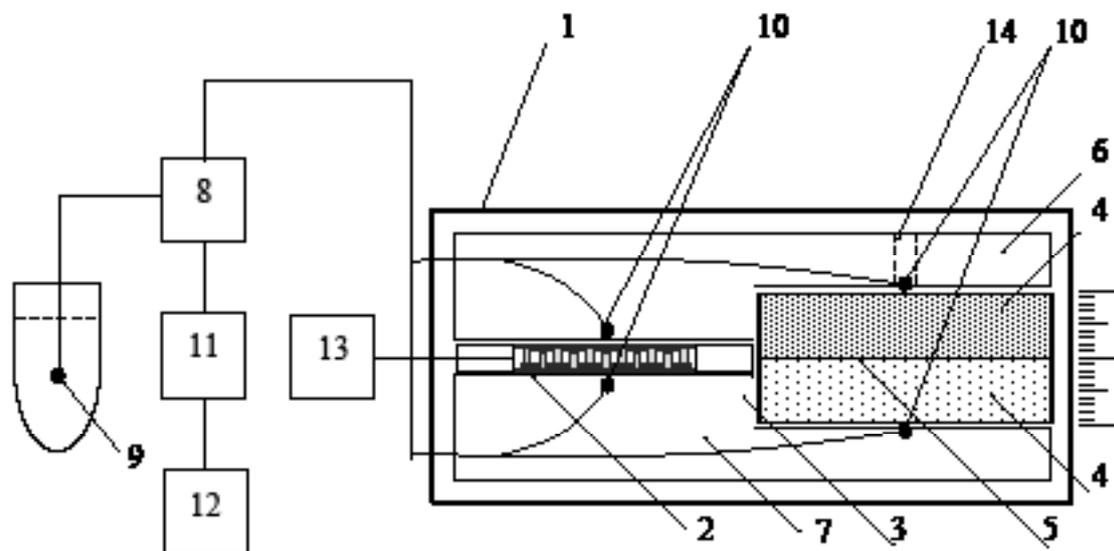


Рис.1. Схема экспериментального стенда для изучения процессов теплообмена в термоэлектрическом нуле-термостате

Fig.1. Scheme of an experimental stand for studying heat transfer processes in a thermoelectric null-thermostat

Для снижения влияния внешних факторов, в том числе уменьшения теплообмена с окружающей средой, конструкция размещается в теплоизоляционном кожухе 1. Для компенсации изменений в объеме при фазовых переходах рабочего вещества используется отводная трубка 14.

Для проведения замеров значений температуры в характерных точках конструкции, использовались медь-константановые термопары 10, опорные спаи которых размещены в сосуде Дьюара 9, заполненном тающим льдом. Сигналы с термопар через многоканальный переключатель 8 поступали на измерительный комплекс 11, значения измеренного сигнала с которого передавались на персональный ЭВМ 12 посредством интерфейса связи RS-232. ТЭМ питается от управляемого источника электрической энергии 13, величина силы тока и напряжения в цепи контролируется с помощью встроенного в источник электрической энергии 13 вольтметра и амперметра. Для исследования процессов теплообмена, осуществлялось визуальное наблюдение за перемещением границы раздела фаз 5, образующейся в результате плавления рабочего вещества 4, изначально находящегося в твердой фазе (лед) в цилиндрической камере 3. Регистрировались значения температур у нижнего и верхнего ос-

нований цилиндрической камеры 3, а также, на горячем и холодном спае ТЭМ 2 с помощью термопар 10. Сила токи питания ТЭМ варьировались в пределах от 2 до 6 А.

Обсуждение результатов. На основе разработанного макета были проведены экспериментальные исследования термоэлектрического нуля-термостата на эффекте пограничного слоя плавления.

Исследования проводились при использовании в качестве рабочего вещества дистиллированной воды с теплотой плавления $335 \cdot 10^3$ Дж/кг, теплоемкостью 4200 Дж/К·кг и плотностью 1000 кг/м³.

Визуальное наблюдение за процессами плавления и затвердевания в исследуемой полости с веществом выявило наличие четкой поверхности раздела твердой и жидкой фаз. При этом поверхность раздела фаз перемещалась в плоскости, параллельной поверхности нагрева и охлаждения. Это позволяет утверждать, что граничные условия, принятые в математическом описании соответствуют физической картине процесса превращения.

На рис.2-5 приведены данные, полученные при экспериментальном исследовании опытного образца термоэлектрического нуля-термостата.

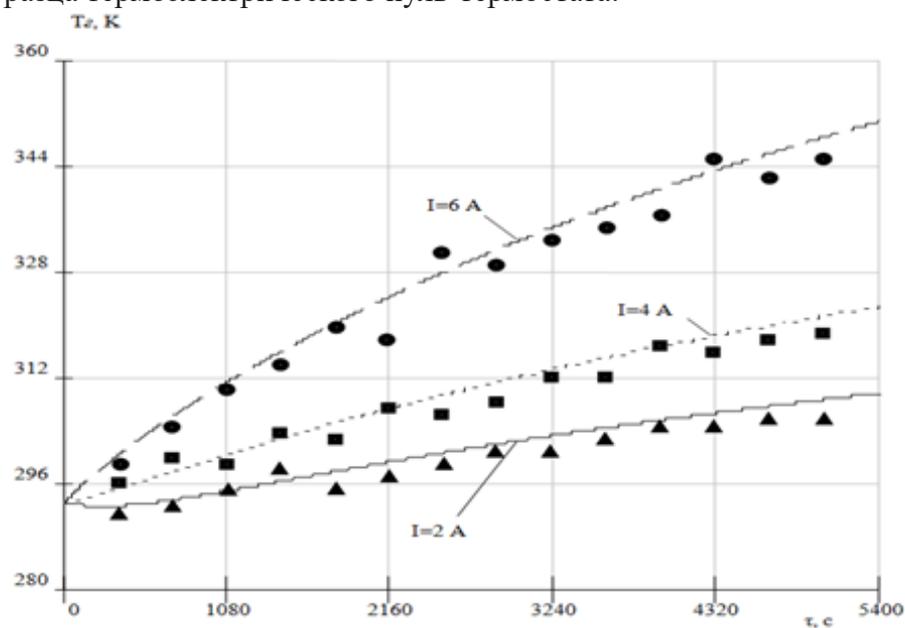


Рис.2. Зависимость температуры верхнего основания цилиндрической камеры от времени при различных токах питания ТЭМ

Fig.2. Dependence of the temperature of the upper base of a cylindrical chamber on time at different TEM supply currents

Представлены зависимости изменения температуры верхнего и нижнего основания рабочей камеры, а также границы раздела фаз во времени, продолжительности времени полного проплавления льда от тока питания ТЭМ, разности температур соответственно между поверхностью холодного спае ТЭМ и нижнего основания рабочей камеры и поверхностью горячего спае термомодуля и верхнего основания рабочей камеры.

Согласно полученным зависимостям увеличение силы тока питания ТЭМ, связанное с возрастанием величины тепловых потоков на нижнем и верхнем основании рабочей камеры приводит соответственно к увеличению температуры верхнего и нижнего основания камеры. Так увеличение тока питания ТЭМ с 2 до 4 А через 1,5 ч увеличивает значение температуры верхнего основания камеры с 309 до 324 К, а нижнего основания камеры снижает с 267 до 258 К. Причем как следует из приведенных данных изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего.

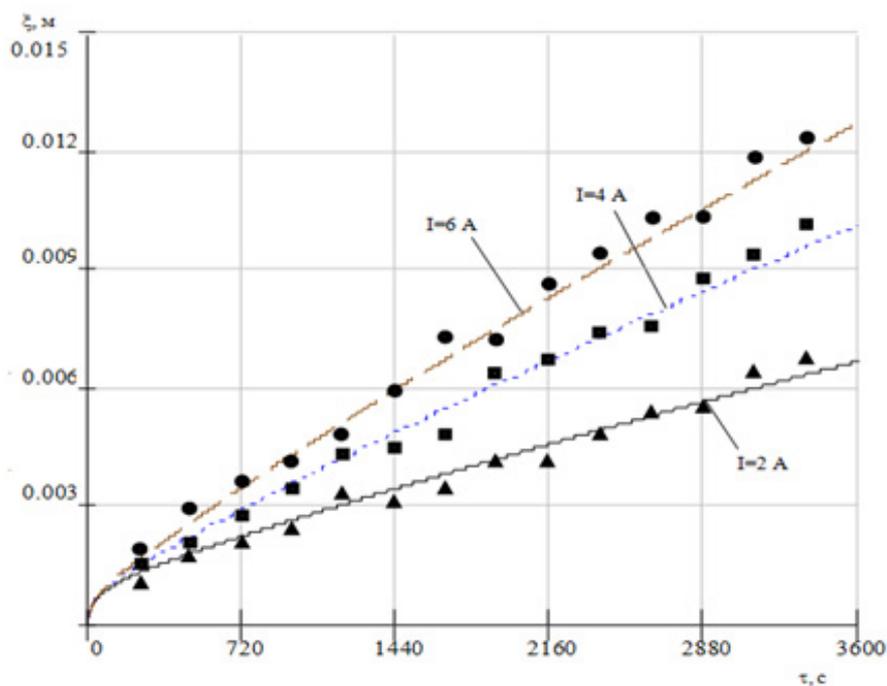


Рис.3. Зависимость изменения координаты границы раздела фаз во времени при различных значениях тока питания ТЭМ
Fig.3. Dependence of the change in the coordinates of the phase interface over time at different values of the TEM supply current

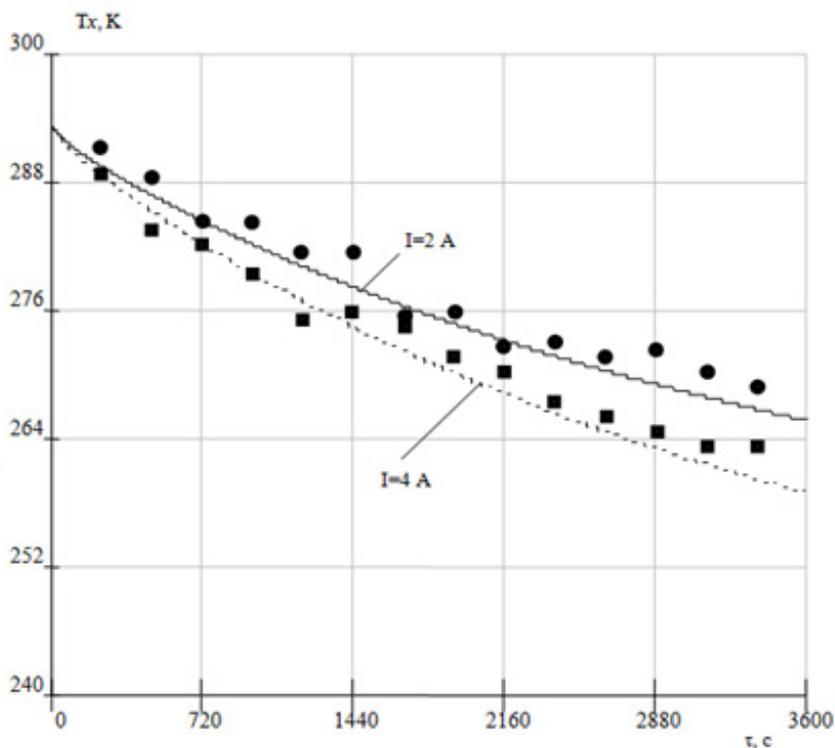


Рис.4. Зависимость температуры нижнего основания цилиндрической камеры от времени
Fig.4. Dependence of the temperature of the lower base of a cylindrical chamber on time

Данное обстоятельство связано с более значительным ростом величины тепловыделений на горячем спае ТЭМ (теплопроизводительности) по сравнению с ростом ее холодопроизводительности при увеличении энергопотребления. Поэтому увеличение тока питания ТЭМ ускоряет процесс проплавления льда.

Согласно полученным данным при токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуль-термостата при изменении тока питания ТЭБ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$. Отсюда следует необходимость ограничения силы тока питания ТЭМ верхним пределом, соответствующим необходимой продолжительности нуль-термостата.

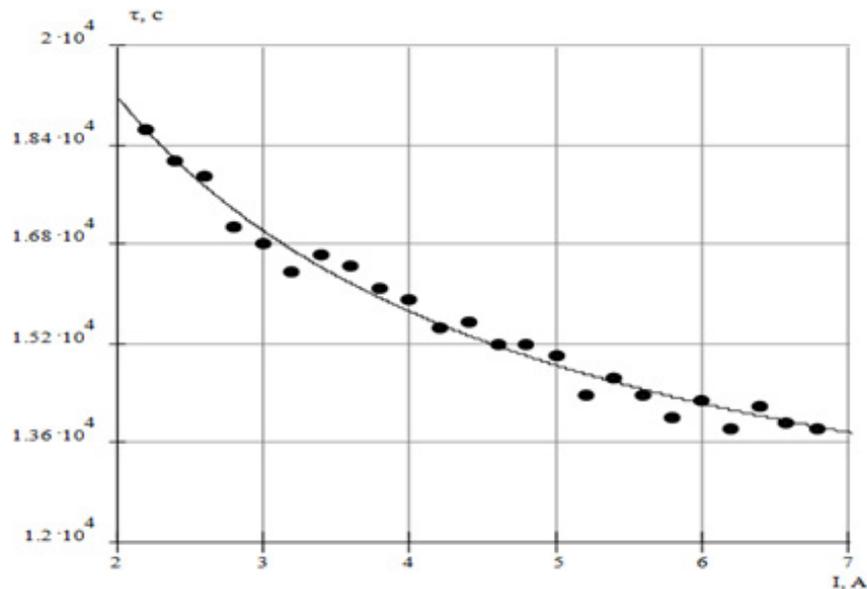


Рис.5. Зависимость изменения времени полного проплавления рабочего вещества от тока питания ТЭМ

Fig.5. Dependence of change in time of complete penetration working substance from the TEM supply current

Для оценки потерь теплоты на теплопроводящих пластинах получены данные, где представлено изменение во времени разности температур соответственно горячего спае ТЭМ и верхнего основания рабочей камеры и нижнего основания рабочей камеры и холодного спае ТЭМ. Как следует из представленных графиков в первом и втором случаях в начальный момент времени после включения прибора (подвода тока к термомодулю) данные разности при токах 4 и 6 А для верхнего основания составляют 10,5 и 11,5 К, а для нижнего 12 и 14,5 К. Далее, их величина уменьшается и при выходе системы на стационарный тепловой режим разности температур между верхним и нижним основанием рабочей камеры и горячим и холодным спаем ТЭМ при токах питания 4 и 6 А составляют соответственно 4 и 5 К. Результаты сравнения расчетных [20] и экспериментальных значений, приведенные на рис.2-5 показывают их удовлетворительную сходимость. Отличие результатов расчета от экспериментальных данных не превышает 7 %.

Вывод. Разработана конструкция термоэлектрического нуль-термостата. Она реализована в виде емкости, заполненной рабочим веществом (лед, вода), находящемся в состоянии фазового перехода. При этом на нижней поверхности осуществляется отток тепла за счет ее сопряжения с холодными спаями ТЭМ, а на верхней поверхности имеет место подвод тепла. Величина теплового потока на нижней поверхности емкости соответствует холодопроизводительности ТЭМ, а тепловой поток на верхней поверхности зависит от теплопроизводительности ТЭМ и рассеянии тепла с боковой поверхности емкости.

Установлено, что скорость перемещения границы раздела фаз сильно зависит от величины тока питания термоэлектрической батареи, что соответствует тепловому потоку

на верхнем и нижнем основании рабочей камеры. Причем, как следует из приведенных данных, изменение температуры верхнего основания ощутимее, чем нижнего. При токе 2, 4 и 6 А скорость перемещения границы раздела фаз составляет соответственно 0,007 м/ч, 0,01 м/ч и 0,013 м/ч. При этом длительность полного проплавления льда, соответствующая продолжительности функционирования нуля - термостата при изменении тока питания ТЭМ с 2 до 7 А сокращается с $1,91 \cdot 10^4$ с до $1,38 \cdot 10^4$.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правомочность разработанной математической модели. Отличие расчетных данных от экспериментальных не превышает 7 % во всем диапазоне измерений.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедов Р.А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
2. Теория тепломассообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 464 с.
3. Александров А.А., Архаров А.М., Архаров И.А., [и др.]. Теплотехника. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 880 с.
4. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
5. Прецизионный малогабаритный ноль-термостат. Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. Патент на изобретение RU 2215270 С1, 27.10.2003. Заявка № 2002130184/28 от 11.11.2002.
6. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Магомедова С.Г. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны // Медицинская техника. 2020. № 1. С. 40-43.
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // Chemical engineering journal. 2022. Vol. 437. P.135268.
8. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement // Nano energy. 2021. Vol. 90. P. 106572.
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. 240 p.
10. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx // Journal of Thermoelectricity. 2015. № 2. P. 86-94.
11. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 419-430
12. Дашевский З.М., Константинов П.П., Скипидаров С.Я. Новое направление применения термоэлектрических преобразователей энергии // Физика и техника полупроводников. 2019. № 7. С.875-878.
13. Драбкин И.А., Ершова Л.Б. Гибридные режимы работы термоэлектрических модулей // Физика и техника полупроводников. 2022. № 1. С.13-17.
14. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices // Chemical reviews. 2020. Vol. 15. P.7399-515.
15. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D., [et al.] Distributed and localized cooling with thermoelectrics // Future energy. 2021. Vol. 5. P.748-51.
16. Ssenoga T., Jie Z., Yuying A., Bo L. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. 2016. Vol. 65. P.114-121.
17. Zhang L., Shi X.-L., Yang Y.-L., Chen Z.-G. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications // Materials today. 2021. Vol. 46. P.62-108.
18. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Абдулхакимов У.И., Евдулов Д.В. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур на лице // Медицинская техника. 2017. № 4. С.38-42.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Казумов Р.Ш. Экспериментальные исследования термоэлектрических теплообменных аппаратов проточного типа с тепловыми мостиками // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 5-7.
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Губа А.А. Математическая модель термоэлектрического нуля-термостата // Известия вузов. Пищевые технологии. 2007. №4. С. 99-102.

References

1. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. Cooling systems based on high-current thermo-electric semiconductor converters. St. Petersburg: Politekhnik, 2020; 285. (In Russ)
2. Theory of heat and mass transfer. Sub. ed. A.I. Leontyev. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2018; 464. (In Russ)

3. Aleksandrov A.A., Arkharov A.M., Arkharov I.A., [etc.]. Heat engineering. M: MSTU im. N.E. Bauman, 2017; 880. (In Russ)
4. Abouellail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for monitoring the contact resistance. *Defectoscopy*. 2022; 12: 70-78. (In Russ)
5. Precision small-sized null thermostat. Ismailov T.A., Aminov G.I., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A. Patent for invention RU 2215270 C1, 10/27/2003. Application No. 2002130184/28 dated November 11, 2002. (In Russ)
6. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Nabiev N.A., Magomedova S.G. Model of a thermoelectric device for thermal influence on reflexogenic zones. *Medical technology*. 2020; 1: 40-43. (In Russ)
7. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
8. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021; 90: 106572.
9. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013; 240.
10. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-94.
11. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers of a thermoelectric cooling unit. *Thermal physics and aeromechanics*. 2022; 29(3): 419-430 (In Russ)
12. Dashevsky Z.M., Konstantinov P.P., Skipidarov S.Ya. New direction of application of thermoelectric energy converters. *Physics and technology of semiconductors*. 2019; 7:875-878. (In Russ)
13. Drabkin I.A., Ershova L.B. Hybrid operating modes of thermoelectric modules. *Physics and technology of semiconductors*. 2022; 1:13-17. (In Russ)
14. Shi X.-L., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices. *Chemical reviews*. 2020; 15:7399-515.
15. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D., [et al.] Distributed and localized cooling with thermoelectrics. *Future en-ergy*. 2021; 5:748-51.
16. Ssenoga T., Jie Z., Yuying A., Bo L. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016; 65:114-121.
17. Zhang L., Shi X.-L., Yang Y.-L., Chen Z.-G. Flexible thermoelectric materials and devices: from materials to applications. *Materials today*. 2021; 46:62-108.
18. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Abdulkhakimov U.I., Evdulov D.V. Thermoelectric system for carrying out thermal cosmetic procedures on the face. *Medical technology*. 2017; 4:38-42. (In Russ)
19. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Kazumov R.Sh. Experimental studies of flow-type thermoelectric heat exchangers with thermal bridges. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2010; 4: 5-7. (In Russ)
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Aminov G.I., Guba A.A. Mathematical model of a thermoelectric null-thermostat. *News of universities. Food technologies*. 2007; 4: 99-102. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

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

Шихабидов Камал Асхабович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; shixabidov17@mail.ru.

Information about authors:

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

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

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

Kamal A. Shikhabidov, Graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; shixabidov17@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 28.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reved 19.08.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.08.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362:537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-14-23



Оригинальная статья /Original article

Моделирование системы низкотемпературной подготовки газа

М.П. Кузнецов

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование влияния изменения технологических параметров на эффективность процесса сепарации и определение оптимальных технологических режимов работы УНТС газового месторождения X в процессе сепарации. **Метод.** Задача решена в компьютерной программе KBC Petro-SIM и была построена модель УНТС. Была построена модель УНТС в компьютерной программе KBC Petro-SIM. **Результат.** При текущем составе газа с понижением температуры на каждые 2 °С при прочих равных технологических показателях, удельный выход конденсата увеличивается в пределах от 15 до 30 %, причем, чем ниже температура, тем выше данный процент. При понижении давления на дросселе на каждые 0,4 МПа выход конденсата увеличивается; если давление опустится ниже 1,8 МПа, удельный выход конденсата начнет уменьшаться, что объясняется падением давления ниже линии максимальной конденсации фазовой диаграммы. Изменение расхода газа в пределах проектных значений не оказало влияния на работу низкотемпературной сепарации. Наиболее высокая эффективность УНТС достигается при поддержании давления после дросселя в пределах 1,8 - 1,9 МПа. Максимальный удельный выход газоконденсата (48,21 %) был получен при давлении на входе в УНТС 5,1 МПа, температуре после теплообменника минус 2 °С и перепаде давления на дросселе 3,05 МПа. При увеличении давления на входе в УНТС изменение удельного выхода газоконденсата незначительно, но с помощью этого параметра возможно создавать больший перепад давления на дросселе; при уменьшении температуры газа на выходе из теплообменника, удельный выход газоконденсата увеличится; при увеличении перепада давления на дросселе удельный выход газоконденсата увеличивается до момента, когда давление после дросселя достигает интервала значений 1,8 – 1,9 МПа. В этом интервале достигается максимальный удельный выход конденсата. При дальнейшем увеличении перепада давлений на дросселе удельный выход газоконденсата уменьшается. Это объясняется явлением ретроградной конденсации, поскольку линия максимальной конденсации находится в интервале данных давлений. **Вывод.** Для решения возникающих серий задач можно использовать разработанный программный модуль. Результаты работы показывают пригодность предлагаемого метода для практических целей.

Ключевые слова: моделирование, природный газ, газоконденсат, теплообменник, низкотемпературная сепарация, оптимизация, газовое месторождение, фазовое равновесие.

Для цитирования: М.П. Кузнецов. Моделирование системы низкотемпературной подготовки газа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):14-23. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-14-23

Modeling of a low-temperature gas treatment system

M.P. Kuznetsov

Ufa State Petroleum Technological University,
1 Kosmonavtov St., Ufa 450064, Russia

Abstract. Objective. The main purpose of the work is: investigation of the effect of changes in technological parameters on the efficiency of the separation process and determination

of optimal technological modes of operation of gas field X CNTS in the separation process. **Method.** The problem was solved in the KBC Petro-SIM computer program and the LTS model was built. To conduct the study, a model of the LTS was built in the KBC Petro-SIM computer program. **Result.** The results obtained with the help of it showed: with the current composition of the gas with a decrease in temperature for every 2 °C, with other technological indicators being equal, the specific condensate yield increases in the range from 15 to 30%, and the lower the temperature, the higher this percentage. When the pressure on the throttle decreases by every 0.4 MPa, the condensate output increases, if the pressure drops below 1.8 MPa, the specific condensate output will begin to decrease, which is explained by the pressure drop below the maximum condensation line of the phase diagram. The change in gas flow within the design values did not affect the operation of low-temperature separation. At any available low temperature and high pressure at the inlet to the ILTS, the most optimal mode will be when the pressure after the throttle is maintained within 1.8 - 1.9 MPa. The maximum specific yield of gas condensate (48.21%) was obtained at a pressure at the inlet to the ILTS of 5.1 MPa, a temperature after the heat exchanger of minus 2 °C and a pressure drop at the throttle of 3.05 MPa. As part of the numerical research, the following results were obtained: with an increase in the pressure at the inlet to the ILTS, the change in the specific output of the gas condensate is insignificant, but with this parameter it is possible to create a larger pressure drop on the throttle; with a decrease in the gas temperature at the outlet of the heat exchanger, the specific yield of the gas condensate will increase; with an increase in the pressure drop at the throttle, the specific output of the gas condensate increases until the pressure after the throttle reaches the range of values of 1.8 – 1.9 MPa. In this interval, the maximum specific condensate yield is achieved. With a further increase in the pressure drop on the throttle, the specific output of the gas condensate decreases. This is explained by the phenomenon of retrograde condensation, since the maximum condensation line is in the range of these pressures. **Conclusion.** Based on the results of the work, it was found that the developed software module can be used to solve the emerging series of problems. The results of the work show the suitability of the proposed method for practical purposes.

Keywords: modeling, natural gas, gas condensate, heat exchanger, low-temperature separation, optimization, field, phase equilibrium.

For citation: M.P. Kuznetsov. Modeling of a low-temperature gas treatment system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):14-23. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-14-23

Введение. Со второй половины 20 века природный газ становится наиболее эффективным экологически чистым природным топливом. В настоящее время мировое потребление природного газа по сравнению с другими видами энергии растёт интенсивными темпами. В России, за последние 50 лет доля природного газа в топливно-энергетическом балансе страны увеличилась с 1 до 50 %. Несмотря на снижение общего объёма добычи газа, энергетическая стратегия России, предусматривает в будущем его увеличение удельного веса в производстве первичных энергоресурсов. В последние годы в эксплуатацию были введены гигантские газовые и газоконденсатные месторождения с высокопроизводительными установками комплексной подготовки газа (УКПГ) к транспорту, которые расположены в районах Сибири и Крайнего Севера: Медвежье, Уренгойское, Заполярное, Ямбургское, Юбилейное, Комсомольское и другие [1]. При промышленной подготовке газов чаще всего используется технология низкотемпературной сепарации (НТС). Данная технология хорошо изучена, на практике широко применяется и является экономически обоснованной [2]. В связи с повышенными требованиями к качеству предназначенного для продажи газа, технология сепарации и, применяемое для этой цели, оборудование постоянно совершенствуются.

Постановка задачи. Объектом исследования является система низкотемпературной подготовки газа на месторождении X. Основной целью работы является моделирование и определение технологических режимов процесса низкотемпературной сепарации на месторождении X с наибольшим удельным выходом газового конденсата.

Методы исследования. Для достижения этой цели были исследованы технологические режимы работы низкотемпературной сепарации. При проведении исследований варьировались значения температуры на сепараторах, давления на входе в систему подготовки газа и перепада давлений на дросселе относительно текущего режима работы промышленной установки. По проведенным расчетам был предложен наиболее эффективный режим работы для извлечения наибольшего удельного объема стабильного газоконденсата. Компонентный состав и основные физико-химические свойства природного газа представлен в табл. 1.

Таблица 1. Компонентный состав и основные физико-химические свойства природного газа

Table 1. Component composition and main physical and chemical properties of natural gas

Наименование компонента/ Component name	Содержание, % объема газа из месторождения/ Content, % volume of gas from the field
Метан/ methane	91,732
Кислород/ oxygen	0,005
Диоксид углерода/ carbon dioxide	0,547
Азот/ nitrogen	0,830
Этан/ethane	4,060
Пропан/ propane	1,564
И-бутан/ i-butane	0,421
Н-бутан/ n-butane	0,448
Нео-пентан/ neo-pentane	0,006
И-пентан/ i-pentane	0,145
Н-пентан/ n-pentane	0,093
Гексан/ hexane	0,149
Плотность относительная /Relative density	0,620
Плотность газа, кг/м ³ /Gas density, kg/m ³	0,746

Система подготовки газа предназначена для замера газа, очистки газа от капельной жидкости и сбора конденсата путем низкотемпературной сепарации.

Технология процесса заключается в ступенчатой сепарации газожидкостной смеси с применением низких температур на последней ступени сепарации и рекуперацией холода. Для предотвращения гидратообразования в скважинах учтён дозированный ввод метанола на регулирующем дросселе фонтанной арматуры и в газопроводах от скважин.

Пластовый газ с узла входа шлейфов поступает по трубопроводу на первую ступень сепарации в вертикальный сепаратор С-1, где под воздействием сил гравитации происходит предварительное отделение из газового потока мехпримесей и капельной жидкости. Отсепарированная жидкая фаза (газовый конденсат, метанольная вода) и мехпримеси отводятся в разделитель жидкости Р-1. Отчасти отсепарированный газовый поток подаётся по трубопроводу из сепаратора С-1 в трубное пространство двухсекционного теплообменника «газ-газ» Т-1, там он охлаждается холодным обратным потоком осушенного газа, который проходит по межтрубному пространству теплообменника Т-1.

Для предотвращения гидратообразования учтена подача метанола по метанолопроводу сквозь узел ввода метанола в трубном пространстве Т-1, где выполняется учёт и дозирование расхода метанола. По трубопроводу прямой поток газа охлажденный в теплообменнике Т-1 поступает в сепаратор второй ступени С-2, где совершается отделение капельной жидкости, которая конденсируется вследствие понижения температуры в теплообменнике Т-1. Отсепарированные в сепараторе С-2 газовый конденсат, влага и метанол выводится в разделитель жидкости Р-2. Освобожденный от капельной жидкости основной газовый поток из С-2 поступает на регулирующей клапан давления К-2, где дросселируется и охлаждается за счет дроссель-эффекта. Данный клапан обеспечивает стабильное давление газа на входе в низкотемпературный сепаратор С-3. После клапана газовый поток направляется в сепаратор С-3. В низкотемпературном сепараторе С-3 происходит отделение капельной

жидкости. Отсепарированная жидкость выводится через клапан-регулятор К-3 с понижением давления до 0,6 МПа в разделитель Р-2.

Осушенный от влаги и углеводородного конденсата природный газ из низкотемпературного сепаратора С-3 после оперативного замера расхода газа на быстросъемной диафрагме поступает в межтрубное пространство теплообменника Т-1, где нагревается прямым потоком сырого газа.

Осушенный природный газ направляется на пункт коммерческого замера газа. Жидкая фаза из сепаратора первой ступени С-1 направляется в разделитель жидкости Р-1, где происходит разделение на углеводородный конденсат, газ и пластовую воду. Пластовая вода из Р-1 направляется в канализацию. Углеводородный конденсат из Р-1 подается в емкость дегазации Р-3 по уровню через регулирующий клапан под давлением. Газ дегазации из Р-1 подается в газопровод среднего давления.

Углеводородный конденсат и метанольная вода из сепараторов С-2 и С-3 поступают в Р-2. В разделителе жидкости происходит разделение жидкой фазы на метанольную воду и углеводородный конденсат за счёт разности плотностей и дегазации жидкой фазы.

Углеводородный конденсат из разделителя жидкости Р-2 через замерное устройство и регулирующий клапан уровня К-4 с понижением давления до 0,3 МПа направляется в емкость дегазации Р-3. Газ дегазации из Р-2 подается в газопровод среднего давления.

Стабильный углеводородный конденсат из разделителя жидкости Р-3 через замерное устройство и в технологическую емкость. Газ дегазации из Р-2 подается в котельную в качестве топлива. Водометанольная смесь из Р-2 и Р-3 направляется в канализацию.

Обсуждение результатов. Расчет низкотемпературной сепарации. Фактические данные эксплуатации установки низкотемпературной сепарации газа месторождения Х.

Технологические данные теплообменника находящегося перед сепаратором С-2 и после сепаратора С-3, температуры воздуха, расхода газа в замерных узлах, давления на входе и выходе из системы установки низкотемпературной сепарации (УНТС) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Фактические технологические данные месторождения Х

Table 2. Actual technological data of field X

№ замера/ Measurement No.	1	2	3	4	5
Температура газа на входе в трубное пространство теплообменника, °С / Gas temperature at the pipe inlet heat exchanger space, °С	19	20	19	21	20
Температура газа на выходе из трубного пространства теплообменника, °С / Gas temperature at the pipe outlet heat exchanger space, °С	6	5	1	5	2
Охлаждение газа в теплообменнике, °С / Gas cooling in heat exchanger, °С	13	15	18	16	18
Температура газа на входе в межтрубное пространство теплообменника, °С / Gas temperature at the inlet to the annulus heat exchanger space, °С	-5	-6	-6	1	-2
Температура газа на выходе из межтрубного пространства теплообменника, °С / Gas temperature at the exit from the annulus of the heat exchanger, °С	16	18	17	17	18
Нагрев газа в теплообменнике, °С / Gas heating in the heat exchanger, °С	21	24	23	16	20
Давление на входе в УНТС, атм / Pressure at the inlet to the CNT, atm	52	47	43	37	36
Давление на входе в УНТС, атм / Pressure at the inlet to the CNT, atm	22	23	27	29	27
Разность давлений, атм / Pressure difference, atm	30	24	16	8	9

Для анализа работы УНТС была смоделирована и построена схема в компьютерной программе КВС Petro-SIM, представленная на рис. 1.

Для исследования варьировались три параметра: давление газа на входе в УНТС (поток «сырой газ»), от 5,1 до 3,5 МПа; давление газа после дросселя (поток 7), до 1,5 МПа; температура газа на выходе из трубного пространства теплообменника (поток 4), от 6 до минус 2 °С. Расчеты проводились при расходе газа в 1 млн м³/день. Потери давления на оборудовании до дросселя составили 0,15 МПа. Ограничения по исследованию: давление газа не ниже 1,5 МПа, температура газа не ниже минус 20 °С на всей УНТС.

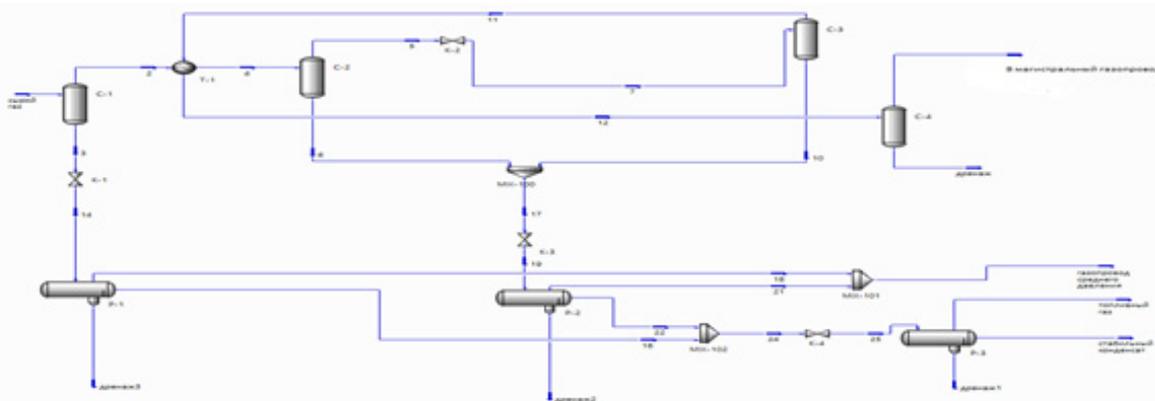


Рис. 1. Принципиальная схема УНТС месторождения X, построенная в программе KBC Petro-SIM

- 1) C-1 – первичный сепаратор; 2) T-1 – теплообменник ‘газ-газ’ C-2, C-3 – низкотемпературные сепараторы;
- 3) K-1, K-2, K-3, K-4 – краны-регуляторы (изоэнтальпийные клапаны);
- 4) MIX-100, MIX-101, MIX-102 – смесители; 5) P-1, P-2, P-3 – ёмкости выветривания

Fig. 1. Schematic diagram of CTS of deposit X, built in the KBC Petro-SIM program

- 1) S-1 – primary separator; 2) T-1 – gas-to-gas heat exchanger C-2, C-3 – low-temperature separators;
- 3) K-1, K-2, K-3, K-4 – regulator valves (isenthalpy valves); 4) MIX-100, MIX-101, MIX-102 – mixers;
- 5) R-1, R-2, R-3 – weathering tanks

Полученные в ходе исследования результаты представлены в табл. 3 – 7.

Таблица 3. Результаты исследования при температуре газа 6 °С на выходе из трубного пространства теплообменника

Table 3. Results of the study at gas temperature of 6 °C at the exit from the tube space of the heat exchanger

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг\ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг\ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
3,5	0,4	2,95	30,31	5,24	0,227	3,9	17,2
3,5	0,8	2,55	37,98	6,56	0,281	1,7	15,3
3,5	1,2	2,15	45,28	7,82	0,327	-0,5	13,3
3,5	1,55	1,8	47,33	8,18	0,33	-2,5	11,5
3,5	1,6	1,75	47,29	8,17	0,328	-2,8	11,2
3,5	1,85	1,5	45,67	7,89	0,307	-4,3	9,9
3,9	0,4	3,35	33,17	5,73	0,259	3,9	17,2
3,9	0,8	2,95	44,33	7,66	0,345	-0,3	15,5
3,9	1,2	2,55	55,92	9,66	0,431	-0,4	13,3
3,9	1,6	2,15	63,16	10,91	0,473	-2,7	11,3
3,9	1,9	1,85	65,28	11,28	0,473	-4,4	9,8
3,9	2	1,75	65,18	11,26	0,466	-5	9,2
3,9	2,25	1,5	62,87	10,86	0,433	-6,5	7,9
4,3	0,4	3,75	34,1	5,89	0,275	3,9	17,2
4,3	0,8	3,35	52,12	9,00	0,389	-0,4	15,5
4,3	1,2	2,95	64,28	11,10	0,523	-0,4	13,4
4,3	1,6	2,55	76,76	13,26	0,615	-2,6	11,4
4,3	2	2,15	85,04	14,69	0,66	-4,9	9,4
4,3	2,3	1,85	87,25	15,07	0,653	-6,7	7,8
4,3	2,4	1,75	87,02	15,03	0,642	-7,3	7,2
4,3	2,65	1,5	83,96	14,50	0,592	-8,8	5,9
4,7	0,4	4,15	33,17	5,73	0,274	3,9	17,2
4,7	0,8	3,75	49,63	8,57	0,416	1,9	15,3
4,7	1,2	3,35	70,2	12,13	0,596	-0,3	13,4
4,7	1,6	2,95	87,57	15,13	0,741	-2,5	11,5
4,7	2	2,55	101,8	17,59	0,848	-4,8	9,5
4,7	2,4	2,15	111,1	19,19	0,895	-7,1	7,4
4,7	2,7	1,85	113,4	19,59	0,877	-8,9	5,8
4,7	2,8	1,75	113	19,52	0,86	-9,5	5,2
5,1	0,4	4,55	30,5	5,27	0,257	4	17,2
5,1	0,8	4,15	49,67	8,58	0,427	1,9	15,3
5,1	1,2	3,75	73,61	12,72	0,646	-0,2	13,4
5,1	1,6	3,35	95,42	16,48	0,845	-2,4	11,5
5,1	2	2,95	115,2	19,90	1,016	-4,6	9,6
5,1	2,4	2,55	131,2	22,66	1,137	-6,9	7,5
5,1	2,8	2,15	141,3	24,41	1,181	-9,3	5,4
5,1	3,05	1,9	143,5	24,79	1,16	-10,8	4,1
5,1	3,2	1,75	143	24,70	1,127	-11,8	3,3

**Таблица 4. Результаты исследования при температуре газа 4 °С
на выходе из трубного пространства теплообменника**

Table 4. Results of the study at gas temperature of 4 °C at the exit from the tube space of the heat exchanger

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг\ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг\ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
3.5	0.4	2.95	43.89	7.58	0.341	1.9	17.3
3.5	0.8	2.55	54.35	9.39	0.42	-0.3	15.4
3.5	1.2	2.15	61.29	10.59	0.465	-2.6	13.4
3.5	1.55	1.8	63.58	10.98	0.47	-4.6	11.6
3.5	1.6	1.75	63.54	10.98	0.467	-4.9	11.4
3.5	1.85	1.5	61.7	10.66	0.443	-6.4	10.1
3.9	0.4	3.35	46.6	8.05	0.377	1.9	17.3
3.9	0.8	2.95	61.92	10.70	0.503	-0.3	15.4
3.9	1.2	2.55	73.79	12.75	0.594	-2.5	13.5
3.9	1.6	2.15	81.96	14.16	0.645	-4.8	11.5
3.9	1.9	1.8	84.38	14.58	0.642	-6.9	9.6
3.9	2	1.75	84.27	14.56	0.638	-7.2	9.4
3.9	2.25	1.5	81.7	14.11	0.6	-8.7	8
4.3	0.4	3.75	48.09	8.31	0.401	1.9	17.3
4.3	0.8	3.35	66.98	11.57	0.565	-0.3	15.4
4.3	1.2	2.95	83.58	14.44	0.706	-2.5	13.5
4.3	1.6	2.55	97.6	16.86	0.816	-4.7	11.5
4.3	2	2.15	106.9	18.47	0.871	-7	9.5
4.3	2.3	1.85	109.5	18.92	0.864	-8.8	7.9
4.3	2.4	1.75	109.2	18.86	0.851	-9.5	7.4
4.3	2.65	1.5	105.9	18.29	0.795	-11	6
4.7	0.4	4.15	47.35	8.18	0.403	1.9	17.3
4.7	0.8	3.75	69.53	12.01	0.604	-0.2	15.4
4.7	1.2	3.35	90.51	15.63	0.795	-2.4	13.5
4.7	1.6	2.95	110	19.00	0.967	-4.6	11.6
4.7	2	2.55	126	21.77	1.094	-6.9	9.6
4.7	2.4	2.15	136.3	23.54	1.15	-9.3	7.6
4.7	2.7	1.85	138.9	23.99	1.132	-11.1	6
4.7	2.8	1.75	138.5	23.92	1.113	-11.7	5.4
5.1	0.4	4.55	44.53	7.69	0.385	1.9	17.2
5.1	0.8	4.15	69.61	12.02	0.619	0.1	15.4
5.1	1.2	3.75	94.53	16.33	0.857	-2.3	13.6
5.1	1.6	3.35	119	20.56	1.089	-4.5	11.7
5.1	2	2.95	141	24.36	1.291	-6.8	9.7
5.1	2.4	2.55	158.7	27.41	1.433	-9.1	7.7
5.1	2.8	2.15	170	29.37	1.488	-11.5	5.6
5.1	3.05	1.9	172.5	29.80	1.466	-13.1	4.3
5.1	3.2	1.75	172	29.71	1.429	-14	3.5

**Таблица 5. Результаты исследования при температуре газа 2 °С
на выходе из трубного пространства теплообменника**

Table 5. Results of the study at gas temperature of 2 °C at the exit from the tube space of the heat exchanger

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг\ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг\ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
3.5	0.4	2.95	43.89	7.58	0.341	1.9	17.3
3.5	0.8	2.55	54.35	9.39	0.42	-0.3	15.4
3.5	1.2	2.15	61.29	10.59	0.465	-2.6	13.4
3.5	1.55	1.8	63.58	10.98	0.47	-4.6	11.6
3.5	1.6	1.75	63.54	10.98	0.467	-4.9	11.4
3.5	1.85	1.5	61.7	10.66	0.443	-6.4	10.1
3.9	0.4	3.35	46.6	8.05	0.377	1.9	17.3
3.9	0.8	2.95	61.92	10.70	0.503	-0.3	15.4
3.9	1.2	2.55	73.79	12.75	0.594	-2.5	13.5
3.9	1.6	2.15	81.96	14.16	0.645	-4.8	11.5
3.9	1.9	1.8	84.38	14.58	0.642	-6.9	9.6
3.9	2	1.75	84.27	14.56	0.638	-7.2	9.4
3.9	2.25	1.5	81.7	14.11	0.6	-8.7	8
4.3	0.4	3.75	48.09	8.31	0.401	1.9	17.3
4.3	0.8	3.35	66.98	11.57	0.565	-0.3	15.4
4.3	1.2	2.95	83.58	14.44	0.706	-2.5	13.5
4.3	1.6	2.55	97.6	16.86	0.816	-4.7	11.5
4.3	2	2.15	106.9	18.47	0.871	-7	9.5
4.3	2.3	1.85	109.5	18.92	0.864	-8.8	7.9
4.3	2.4	1.75	109.2	18.86	0.851	-9.5	7.4
4.3	2.65	1.5	105.9	18.29	0.795	-11	6
4.7	0.4	4.15	47.35	8.18	0.403	1.9	17.3
4.7	0.8	3.75	69.53	12.01	0.604	-0.2	15.4
4.7	1.2	3.35	90.51	15.63	0.795	-2.4	13.5
4.7	1.6	2.95	110	19.00	0.967	-4.6	11.6
4.7	2	2.55	126	21.77	1.094	-6.9	9.6
4.7	2.4	2.15	136.3	23.54	1.15	-9.3	7.6
4.7	2.7	1.85	138.9	23.99	1.132	-11.1	6
4.7	2.8	1.75	138.5	23.92	1.113	-11.7	5.4
5.1	0.4	4.55	44.53	7.69	0.385	1.9	17.2
5.1	0.8	4.15	69.61	12.02	0.619	0.1	15.4
5.1	1.2	3.75	94.53	16.33	0.857	-2.3	13.6
5.1	1.6	3.35	119	20.56	1.089	-4.5	11.7
5.1	2	2.95	141	24.36	1.291	-6.8	9.7
5.1	2.4	2.55	158.7	27.41	1.433	-9.1	7.7
5.1	2.8	2.15	170	29.37	1.488	-11.5	5.6
5.1	3.05	1.9	172.5	29.80	1.466	-13.1	4.3
5.1	3.2	1.75	172	29.71	1.429	-14	3.5

Таблица 6. Результаты исследования при температуре газа 0 °С на выходе из трубного пространства теплообменника**Table 6. Results of the study at gas temperature of 0 °С at the exit from the tube space of the heat exchanger**

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг/ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг/ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
3.5	0.4	2.95	81.61	14.10	0.688	-2.2	17.61
3.5	0.8	2.55	93.5	16.15	0.786	-4.5	15.7
3.5	1.2	2.15	102.1	17.64	0.848	-6.8	13.7
3.5	1.55	1.8	105.1	18.16	0.856	-8.9	12
3.5	1.6	1.75	105	18.14	0.853	-9.2	11.7
3.5	2	1.35	99.75	17.23	0.79	-11.7	9.6
3.9	0.4	3.35	90.56	15.64	0.795	-2.6	17.6
3.9	0.8	2.95	107.9	18.64	0.951	-4.8	15.7
3.9	1.2	2.55	123	21.25	1.079	-7.1	13.81
3.9	1.6	2.15	133.4	23.04	1.515	-9.5	11.8
3.9	1.9	1.8	136.6	23.60	1.15	-11.6	10
3.9	2	1.75	136.5	23.58	1.144	-11.9	9.8
3.9	2.25	1.5	133.4	23.04	1.093	-13.51	8.4
4.3	0.4	3.75	93.1	16.08	0.84	-2.5	17.6
4.3	0.8	3.35	115	19.87	1.048	-4.7	15.7
4.3	1.2	2.95	135.9	23.48	1.244	-7	13.8
4.3	1.6	2.55	153.4	26.50	1.396	-9.3	11.9
4.3	2	2.15	165	28.50	1.474	-11.7	9.9
4.3	2.3	1.85	168.3	29.07	1.468	-13.6	8.3
4.3	2.4	1.75	168.1	29.04	1.452	-14.2	7.8
4.3	2.65	1.5	164.2	28.36	1.378	-15.8	6.4
4.7	0.4	4.15	92.62	16.00	0.85	-2.4	17.5
4.7	0.8	3.75	118.7	20.50	1.109	-4.64	15.7
4.7	1.2	3.35	145	25.05	1.372	-6.9	13.9
4.7	1.6	2.95	169	29.19	1.607	-9.2	12
4.7	2	2.55	188.5	32.56	1.781	-11.5	10
4.7	2.4	2.15	201.2	34.76	1.861	-14	8
4.7	2.7	1.85	204.5	35.33	1.842	-15.9	6.4
4.7	2.8	1.75	204.1	35.26	1.818	-16.5	5.9
5.1	0.4	4.55	87.86	15.18	0.815	-2.3	17.5
5.1	0.8	4.15	117.4	20.28	1.115	-4.4	15.7
5.1	1.2	3.75	148.4	25.63	1.438	-6.7	13.9
5.1	1.6	3.35	178.2	30.78	1.752	-8.9	12
5.1	2	2.95	204.9	35.39	2.022	-11.2	10.1
5.1	2.4	2.55	226.2	39.07	2.216	-13.64	8.1
5.1	2.8	2.15	239.8	41.42	2.297	-16.2	6.1
5.1	3.05	1.9	243	41.98	2.274	-17.7	4.7
5.1	3.2	1.75	242.5	41.89	2.229	-18.7	3.9

Графики зависимости добычи конденсата от изменяемых параметров представлены на рис. 2 - 6.

P^* - оптимальное для извлечения конденсата давление газа после дросселя, МПа.

Таблица 7. Результаты исследования при температуре газа -2 °С на выходе из трубного пространства теплообменника**Table 7. Results of the study at gas temperature of -2 °С at the exit from the tube space of the heat exchanger**

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг/ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг/ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
3.5	0.4	2.95	104.6	18.07	0.917	-4.3	17.8
3.5	0.8	2.55	117.6	20.31	1.029	-6.55	15.9
3.5	1.2	2.15	127.2	21.97	1.101	-8.9	13.9
3.5	1.55	1.8	130.5	22.54	1.112	-11.1	12.1
3.5	1.6	1.75	130.5	22.54	1.109	-11.4	11.9
3.5	1.85	1.5	128.2	22.15	1.074	-12.94	10.6
3.9	0.4	3.35	111.5	19.26	1.013	-4.2	17.7
3.9	0.8	2.95	129.8	22.42	1.184	-6.5	15.9
3.9	1.2	2.55	145.9	25.20	1.326	-8.8	14
3.9	1.6	2.15	157.1	27.14	1.409	-11.2	12
3.9	1.9	1.8	160.6	27.74	1.412	-13.4	10.2
3.9	2	1.75	160.5	27.72	1.406	-13.7	9.9
3.9	2.25	1.5	157.4	27.19	1.352	-15.3	8.6
4.3	0.4	3.75	114.9	19.85	1.071	-4.2	17.7
4.3	0.8	3.35	138.2	23.87	1.3	-6.5	15.9
4.3	1.2	2.95	160.5	27.72	1.517	-8.7	14
4.3	1.6	2.55	179.1	30.94	1.687	-11.1	12
4.3	2	2.15	191.5	33.08	1.777	-13.6	10.1
4.3	2.3	1.85	195.2	33.72	1.775	-15.4	8.5

Давление на входе в УНТС, МПа	Перепад давления на дросселе, МПа	Давление после дросселя, МПа	Выход стабильного конденсата, кг/ч	Удельный выход конденсата, %	Выход топливного газа, кг/ч	Температура на сепараторе С-3, °С	Температура на сепараторе С-4, °С
4,3	2,4	1,75	195	33,68	1,758	-16,1	8
4,3	2,65	1,5	191,1	33,01	1,68	-17,7	6,6
4,7	0,4	4,15	114,8	19,83	1,098	-4,2	17,7
4,7	0,8	3,75	142,7	24,65	1,374	-6,4	15,9
4,7	1,2	3,35	170,8	29,50	1,666	-8,7	14
4,7	1,6	2,95	196,4	33,93	1,927	-11	12,1
4,7	2	2,55	217,3	37,54	2,123	-13,4	12,2
4,7	2,4	2,15	230,9	39,89	2,217	-15,9	8,2
4,7	2,7	1,85	234,6	40,53	2,201	-17,8	6,6
4,7	2,8	1,75	234,2	40,46	2,176	-18,45	6,1
5,1	0,4	4,55	111,4	19,24	1,067	-4,2	17,62
5,1	0,8	4,15	143,5	24,79	1,405	-6,3	15,8
5,1	1,2	3,75	177	30,58	1,769	-8,6	14
5,1	1,6	3,35	209,1	36,12	2,121	-10,9	12,2
5,1	2	2,95	237,8	41,08	2,426	-13,25	10,3
4,3	2	2,15	191,5	33,08	1,777	-13,6	10,1
4,3	2,3	1,85	195,2	33,72	1,775	-15,4	8,5
4,3	2,4	1,75	195	33,68	1,758	-16,1	8
4,3	2,65	1,5	191,1	33,01	1,68	-17,7	6,6
4,7	2,8	1,75	234,2	40,46	2,176	-18,45	6,1
5,1	0,4	4,55	111,4	19,24	1,067	-4,2	17,62
5,1	0,8	4,15	143,5	24,79	1,405	-6,3	15,8
5,1	1,2	3,75	177	30,58	1,769	-8,6	14
5,1	1,6	3,35	209,1	36,12	2,121	-10,9	12,2
5,1	2	2,95	237,8	41,08	2,426	-13,25	10,3
5,1	2,4	2,55	260,8	45,05	2,647	-15,7	8,3
5,1	2,8	2,15	275,5	47,59	2,744	-18,2	6,3
5,1	3,05	1,9	279,1	48,21	2,724	-19,8	5
5,1	3,2	1,75	278,6	48,13	2,667	-20,8	4,1

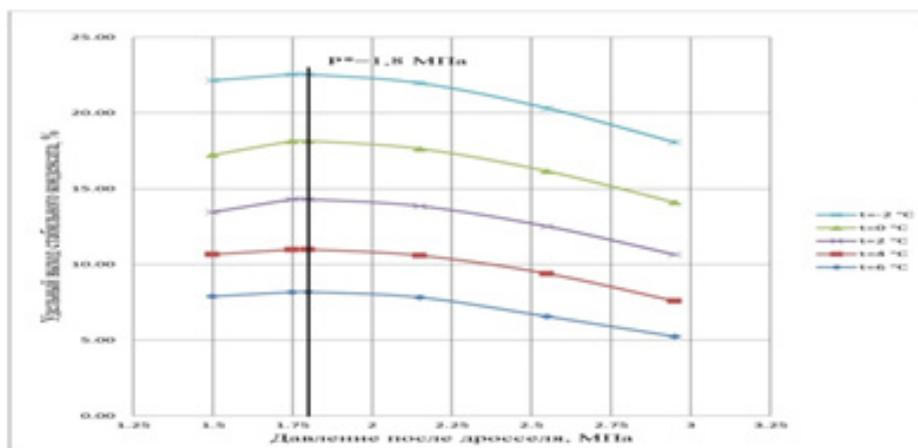


Рис. 2. Графики зависимости удельного выхода стабильного конденсата от давления после дросселя при различных температурах на выходе из теплообменника и давлении на входе в УНТС 3,5 МПа
 Fig. 2. Graphs of the dependence of the specific yield of stable condensate on the pressure after the throttle at various temperatures at the outlet of the heat exchanger and a pressure at the inlet to the CNT of 3.5 MPa

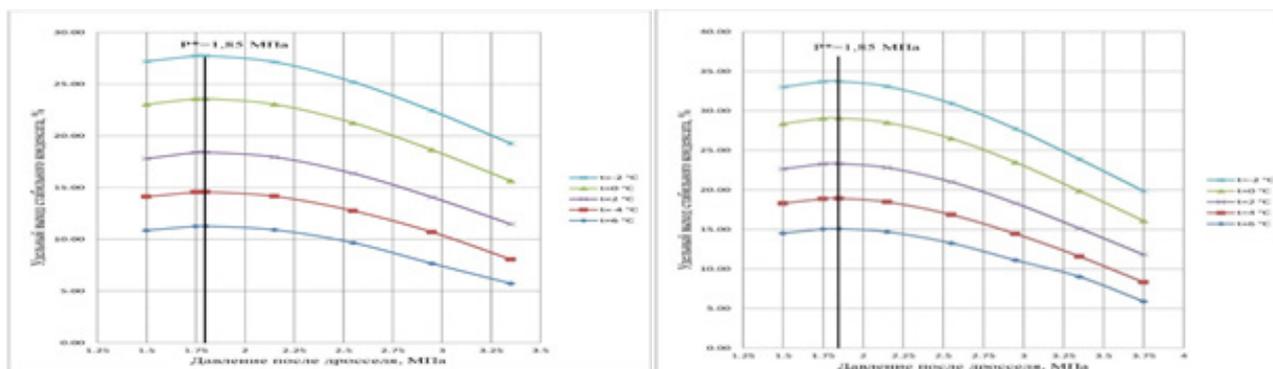


Рис. 3, 4. Графики зависимости удельного выхода стабильного конденсата от давления после дросселя при различных температурах на выходе из теплообменника и давлении на входе в УНТС 3,9 МПа (слева) и 4,3 МПа (справа)
 Fig. 3, 4. Graphs of the dependence of the specific yield of stable condensate on pressure after the throttle at different temperatures at the outlet of the heat exchanger and pressure at the inlet CNTS 3.9 MPa (left) and 4.3 MPa (right)

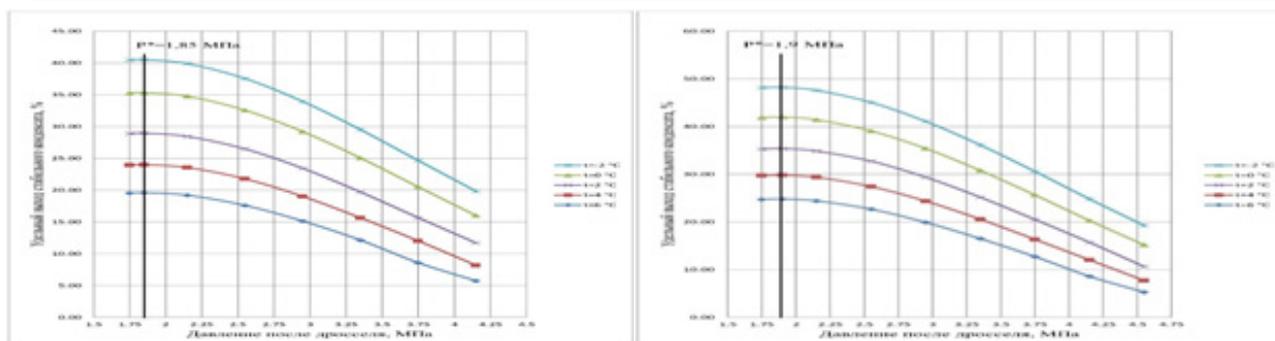


Рис. 5, 6. Графики зависимости удельного выхода стабильного конденсата от давления последресселя при различных температурах на выходе из теплообменника и давлении на входе в УНТС 4,7 МПа (слева) и 5,1 МПа (справа)

Fig. 5, 6. Graphs of the dependence of the specific yield of stable condensate on the pressure after the throttle at various temperatures at the outlet of the heat exchanger and a pressure at the inlet to the CTS of 4.7 MPa (left) and 5.1 MPa (right)

Вывод. При увеличении давления на входе в УНТС изменение удельного выхода стабильного газоконденсата незначительно, но с помощью этого параметра возможно создавать больший перепад давления на дросселе.

При уменьшении температуры газа на выходе из теплообменника, удельный выход стабильного газоконденсата увеличится. При увеличении перепада давления на дросселе удельный выход стабильного газоконденсата увеличивается до момента, когда давление после дросселя достигает интервала значений 1,8 – 1,9 МПа. В этом интервале достигается максимальный удельный выход конденсата. При дальнейшем увеличении перепада давлений на дросселе удельный выход газоконденсата уменьшается. Это объясняется явлением ретроградной конденсации, поскольку линия максимальной конденсации находится в интервале данных давлений. Наивысший удельный выход конденсата был достигнут при максимальном давлении на входе в УНТС (5,1 МПа) и оптимальном перепаде давления на дросселе (3,05 МПа) и температуре минус 2 °С – 48,21 %.

Изменение расхода сырья в пределах 1 – 8 млн м³/д показало незначительное влияние на удельный процент добычи конденсата, поэтому расход сырого газа во время исследований не менялся. При любой температуре и давлении на входе в УНТС самый оптимальный режим будет при поддержании давления после дросселя в пределах от 1,8 до 1,9 МПа.

Библиографический список:

1. Гуревич Г.Р., Карлинский, Е.Д. Сепарация природного газа на газоконденсатных месторождениях — М.: Недрa, 1982. 197с.
2. Мурин В.И. Технология переработки природного газа и конденсата. Справочник. ч.1 – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002.-517 с.
3. Сидоренко А.В. Геология СССР. Том VIII. Крым. Полезные ископаемые. М., «Недра», 1974. 208 с.
4. Лapidус А.Л. Газохимия Ч.1. Первичная переработка углеводородных газов. М.: РГУ нефти и газа, 2004. 242 с.
5. Твердохлебов В.И. К вопросу о расчете показаний изоэнтропы природных газов. «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений», 1972. – 32 с.
6. Кравцов А.В. Технологические основы и моделирование процессов промышленной подготовки нефти и газа: учебное пособие/А. В. Кравцов, Н.В. Ушева, Е.В. Бешагина, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, А.А. Гавриков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 128 с.
7. Рудаков, Г.Я., Магоматов, А.С. Переработка газа и газового конденсата – М.: Недрa, 1975. –64 с.
8. Персиянцев, М.Н. Совершенствование процессов сепарации нефти от газа в промышленных условиях. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999.- 283с.
9. Багатуров, С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. М.: Химия, 1974. — 439 с.
10. Молоканов, Ю.К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки. М.: Химия, 1980. — 407 с.
11. Скобло, А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. —

677 с.

12. Стабников, В.В. Ректификационные аппараты. М.: Машиностроение, 1965. — 356 с.
13. Арнольд К., Стюарт М. Справочник по оборудованию для комплексной подготовки газа. Промысловая подготовка углеводородов/ Пер. с англ. М.:ООО “Премиум Инжиниринг”, 2009. 630 с.
14. Патент US № 4854955, MKU F25J 3/02. Hydrocarbon gas processing / Roy E. Campbell, John D. Wilkinson. Заявл. 17.08.88 № 194878. Оpubл. 08.08.89 UA.
15. Патент US № 4251249, MKU F25J 3/02. Low temperature process for separating propane and heaving hydrocarbons from a natural gas steam Jerry G. Gulsby. Заявл. 15.12.78 № 969990. Оpubл. 14.10.86 UA.
16. Патент US № 4617039, MKU F25J 3/02. Separating hydrocarbon gases . Loren L. Buck. Заявл. 19.11.84 № 673039. Оpubл. 17.02.81 UA.

References

1. Gurevich G.R., Karlinsky E.D. Separation of natural gas in gas condensate fields. М.: Nedra, 1982; 19
2. Murin, V.I. Technology for processing natural gas and condensate. Directory. Part 1 – М.: Nedra-Business Center LLC, 2002; 517. (In Russ)
3. Sidorenko A.V. Geology of the USSR. Crimea. Mineral resources. М., Nedra, 1974; 8:208 (In Russ)
4. Lapidus, A.L. Gas chemistry part 1. Primary processing of hydrocarbon gases. М.: Russian State University of Oil and Gas, 2004; 242. (In Russ)
5. Tverdokhlebov, V.I. On the issue of calculating the isentropic readings of natural gases. “Development and operation of gas and gas condensate fields,” 1972; 32. (In Russ)
6. Kravtsov A.V., N.V. Usheva, E.V. Beshagina, O.E. Moises, E.A. Kuzmenko, A.A. Gavrikov Technological foundations and modeling of oil and gas field preparation processes: textbook ; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2012; 128. (In Russ)
7. Rudakov, G. Ya., Magomadov, A.S. Processing of gas and gas condensate. М.: Nedra, 1975; 64. (In Russ)
8. Persiyantsev, M.N. Improving oil-gas separation processes in field conditions. М.: Nedra-Business Center LLC, 1999; 283. (In Russ)
9. Bagaturov, S.A. Fundamentals of the theory and calculation of distillation and rectification. М.: Chemistry, 1974; 439. (In Russ)
10. Molokanov, Yu.K. Oil and gas refining processes and apparatus. М.: Chemistry, 1980; 407. (In Russ)
11. Skoblo, A.I., Molokanov Yu.K., Vladimirov A.I., Shchelkunov V.A. Processes and devices of oil and gas refining and petrochemistry. 3rd ed., revised. М.: Nedra-Business Center LLC, 2000; 677. (In Russ)
12. Stabnikov, V.V. Rectifying devices. М.: Mechanical Engineering, 1965; 356. (In Russ)
13. Arnold K., Stuart M. Handbook of equipment for complex gas treatment. Field preparation of hydrocarbons / Per. from English – М.: Premium Engineering LLC, 2009; 630. (In Russ)
14. US Patent No. 4854955, MKU F25J 3/02. Hydrocarbon gas processing / Roy E. Campbell, John D. Wilkinson. Application 08.17.88 No. 194878. Publ. 08.08.89 UA.
15. US Patent No. 4251249, MKU F25J 3/02. Low temperature process for separating propane and heaving hydrocarbons from a natural gas steam. Jerry G. Gulsby. Application 12/15/78 No. 969990. Publ. 14.10.86 UA.
16. US Patent No. 4617039, MKU F25J 3/02. Separating hydrocarbon gases / Loren L. Buck. Application 11/19/84 No. 673039. Publ. 02/17/81 UA.

Сведения об авторе:

Кузнецов Михаил Павлович, инженер, кафедра «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», veles1144@mail.ru

Information about author:

Mikhail P. Kuznetsov, Engineer, Department of “Development and operation of gas and oil-gas-condensate fields”, veles1144@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 18.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.08.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 20.08.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-24-36



Оригинальная статья /Original article

Моделирование течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами вязких теплоносителей в ламинарной области, а также в области перехода к турбулентному течению

И.Е. Лобанов

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

Резюме. Цель. Расчётным методом осуществлено моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами для вязких теплоносителей при числах Рейнольдса, характерных для ламинарного и переходного режимов течения. Рассматривалось решение задачи о теплообмене для турбулизаторов потока полукруглого поперечного сечения на основе многоблочных вычислительных технологий, основанных на решении факторизованным конечно-объёмным методом (ФКОМ) уравнений Рейнольдса (замыкаемых для переходного режима при помощи модели переноса сдвиговых напряжений Ментера) и уравнения энергии (на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках). **Метод.** Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых для переходных режимов с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ). **Результат.** Применённым методом ФКОМ в работе были получены как локальные, так и осреднённые характеристики потока и теплообмена в трубах с турбулизаторами для вязкого теплоносителя для ламинарного и переходного режимов течения теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с существующим экспериментом. **Вывод.** Расчётное относительное гидросопротивление для невысоких турбулизаторов увеличивается довольно незначительно, а для турбулизаторов средних высот оно достигает $2 \div 2,5$ до критического числа Рейнольдса, а впоследствии оно увеличивается до 3 раз; для высоких турбулизаторов относительное гидросопротивление увеличивается до 4 раз ещё до достижения переходного режима течения, после чего оно увеличивается до 4,5 раз. Расчётный относительный изотермический интенсифицированный теплообмен при ламинарном режиме течения вязкого теплоносителя для относительно высоких турбулизаторов увеличивается практически в 2 раза; для относительно средних высот турбулизаторов — почти в полтора, а для низких относительных высот интенсификация теплообмена незначительна.

Ключевые слова: моделирование; численный; канал; труба; конвективный; ламинарный; переходный; турбулизатор; теплообмен; гидравлическое сопротивление.

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами вязких теплоносителей в ламинарной области, а также в области перехода к турбулентному течению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):24-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-24-36

Modeling of the flow and heat exchange in pipes with turbulators of viscous heat carriers in the laminar region, as well as in the transition to turbulent flow

I. E. Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia

Abstract. Objective. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators for viscous heat carriers at Reynolds numbers characteristic of laminar and transient flow regimes is

carried out by the calculation method. The solution of the heat exchange problem for semicircular cross-section flow turbulators based on multiblock computing technologies based on the solution of the Reynolds equations (closed for the transient mode using the Menter shear stress transfer model) and the energy equation (on multi-scale intersecting structured grids) by the factorized finite-volume method (FCOM) was considered. **Method.** The calculation was carried out on the basis of a theoretical method based on the solution of the Reynolds equations, closed for transient modes using the Menter shear stress transfer model, and the energy equation on multi-scale intersecting structured grids (FCOM), by a factorized finite-volume method. **Result.** Both local and averaged characteristics of the flow and heat exchange in pipes with turbulators for a viscous coolant for laminar and transient flow modes of the coolant were obtained using the FCOM method in the work, which made it possible to determine for these modes the levels of heat exchange intensification that satisfactorily correlate with the existing experiment. **Conclusion.** The calculated relative hydraulic resistance for low turbulators increases quite slightly, and for medium-altitude turbulators reaches 2÷2.5 to the critical Reynolds number, and subsequently it increases up to 3 times; for high turbulators, the relative hydraulic resistance increases up to 4 times even before the transition flow regime is reached, after which it increases up to 4.5 times. The calculated relative isothermal intensified heat exchange under the laminar flow regime of a viscous coolant for relatively high turbulators increases almost 2 times; for relatively medium heights of turbulators — almost one and a half, and for low relative heights, the intensification of heat exchange is insignificant.

Keywords: modeling; numerical; channel; pipe; convective; laminar; transient; turbulator; heat transfer; hydraulic resistance.

Для цитирования: I.E. Lobanov. Modeling of the flow and heat exchange in pipes with turbulators of viscous heat carriers in the laminar region, as well as in the transition to turbulent flow. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):24-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-24-36

Введение. Известными и очень хорошо апробированными практически методом смерчевой интенсификации теплоотдачи являются нанесения периодических турбулизаторов на стенках поверхностей омывания [1, 2] (рис. 1).

Исследования структур интенсифицированных течений, в основном, проводились экспериментальными способами [1, 2], в то время как существующие современные расчётные исследования в данном направлении довольно немногочисленны (напр., [3, 4, 5, 6]) и только частичным образом относятся непосредственно структурам интенсифицированных течений. Некоторые из способов исследования (напр., осязательная часть исследований [6, 7, 8, 9, 10]) применяют только интегральный подход к решению данного вопроса.

В последнее время интенсивное развитие получила многоблочная вычислительная технология при решении вопросов смерчевой гидроаэромеханики и теплофизики, базирующаяся на структурированной пересекающейся сетке [13].

Постановка задачи. Настоящее исследование непосредственно посвящено теплообмену при критериях Рейнольдса, которые характерны для ламинарного и переходного режимов течений в трубе, с интенсификацией поверхностными периодическими турбулизаторами полукруглых поперечных профилей, поскольку в вышеуказанном диапазоне ещё не имеется достаточно надёжной расчётной теоретической информации.

Методы исследования. Основное направление данной работы кратко можно охарактеризовать нижеследующим образом: провести расчёты для относительно невысоких чисел Рейнольдса, что характерно для ламинарного и переходного режимов течения в трубах с турбулизаторами при различных критериях Прандтля, где ещё нет надёжных теоретических расчётных данных, поскольку ранее расчёт проводился для более высоких

чисел Рейнольдса [3—12]. Основное внимание уделялось специфическим направлениям расчётного исследования интенсифицированного теплообмена в ламинарной и переходной областях, поскольку области с более высокими числами Рейнольдса ранее исследовались в предыдущих исследованиях [3—12]. Разрез исследуемой круглой прямой трубы с поперечными поверхностными турбулизаторами потока полукруглых поперечных профилей приведён на рис. 1.

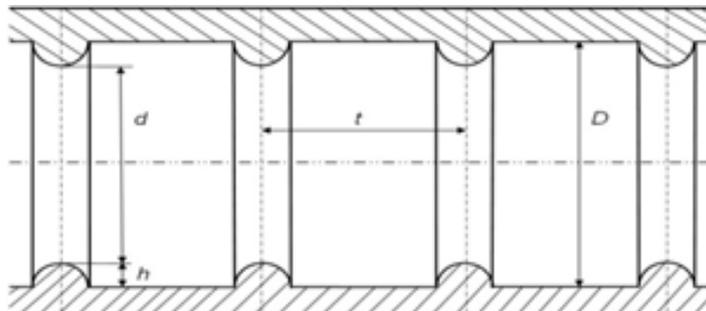


Рис. 1. Разрез прямой круглой трубы с поперечными турбулизаторами потока поверхностного расположения полукруглых поперечных профилей

Fig. 1. Section of a straight round pipe with transverse flow turbulators of surface arrangement of semicircular transverse profiles

На рис. 2 приводятся расчётные сетки трубы, состоящая из многих секций с срединным расположением турбулизаторов, входного и выходного гладких участков.

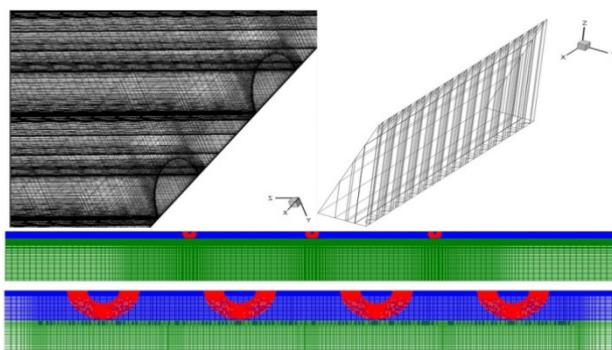


Рис. 2. Сетки трубы, состоящие из многих секций с срединным расположением турбулизатора, входного и выходного гладких участков

Fig. 2. Pipe meshes, consisting of many sections with a central location of the turbulator, inlet and outlet smooth sections

Математическое моделирование вышеуказанным методом (ФКОМ) ламинарного и переходного течения и теплоотдачи ньютоновской жидкости в трубах с турбулизаторами для параметров: $Pr=170\div 320$; $d/D=0,80$; $0,86$; $0,92$; $t/D=0,33$; $0,66$; $1,22$; $Re=10^2\div 10^3\div 1,5\cdot 10^3$; температурный фактор: $q_c=1,07\div 1,15$.

Обсуждение результатов. Анализ расчётных данных по гидравлическому сопротивлению и теплообмену в трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения для ламинарной области ($re=10^2\div 1,5\cdot 10^3$) и в области перехода к турбулентному течению ($re=1,6\cdot 10^3\div 2,4\cdot 10^3$) для трансформаторного масла.

При движении вязкого теплоносителя в ламинарном и переходном режимах решении проблемы интенсификации усложняется. В данном разделе решается задача теоретического изучения влияния геометрии турбулизаторов и режима течения вязкого теплоносителя на теплообмен и гидравлическое сопротивление в ламинарной и переходной областях, характерных для вязких теплоносителей, например, для трансформаторных масел. Кроме того, результаты расчётов необходимо верифицировать существующими экспериментальными данными [19, 20, 21].

С физической точки зрения при уменьшении числа Рейнольдса интенсификация теплообмена уменьшалась и наступал такой момент, когда эффект интенсификации теплообмена элиминировался, или даже интенсификация теплообмена становилась немногим менее, чем в трубах с диафрагмами при прочих равных условиях.

Стенерированная при таком режиме малоподвижная прослойка теплоносителя между турбулизаторами увеличивала термическое сопротивление, что и приводило к снижению теплоотдачи по сравнению с гладкой трубой [1, 2, 16, 17, 19 - 21]. Анализ результатов экспериментальных исследований [19, 20, 21] показал, что существенное влияние на уровень интенсификации теплообмена оказывают относительный шаг между турбулизаторами t/D и относительная высота выступов $h/D=(1-d/D)/2$.

В работах [19 - 21] указывается, что в трубах с турбулизаторами коэффициент гидравлического сопротивления практически мало зависит от шага между турбулизаторами t/D , но ощутимо зависит от глубины накатки d/D .

Влияние числа Рейнольдса на гидросопротивление идентично влиянию в гладких трубах [1, 2, 16, 17, 19, 20, 21].

Экспериментальные данные [19, 20, 21] позволяют выделить 3 основные зоны теплообмена в трубах с турбулизаторами, в которых качественно изменяются закономерности процессов теплоотдачи.

Зона ламинарного режима теплообмена, в которой интенсивность теплоотдачи практически равна теплоотдаче в гладких трубах ($Re \leq 10^2$).

При $Re > 10^2$ наступает зона неустойчивого теплообмена, где его интенсивность ощутимо зависит от начальных условий: от температуры жидкости на входе в трубу, начальных возмущений и других.

При $4 \cdot 10^2 < Re < 10^3$ возникает зона увеличения теплоотдачи, где теплоотдача растёт гораздо сильнее, чем в гладкой трубе в переходной области.

При $1,6 \cdot 10^3 < Re < 1,8 \cdot 10^3$ коэффициент гидросопротивления ощутимо возрастает при увеличении числа Рейнольдса, что соответствует переходному режиму.

Таким образом, имеет место сдвиг критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$ в меньшую сторону: с $Re=2,3 \cdot 10^3$ до $Re=1,6 \cdot 10^3$. Сходные результаты приводятся и в работе [18].

Следовательно, ламинарная область, а также переходная, может быть перспективной с точки зрения интенсификации теплообмена при течении вязких теплоносителей.

В переходной области при $Re < 10^4$ коэффициент гидравлического сопротивления уменьшается при снижении числа Рейнольдса, а при изменении числа Рейнольдса мало влияет на него [19, 20, 21].

Степень изменения гидросопротивления в турбулентной области практически мало изменяется, а в переходной области при $Re < 10^4$ имеет место её ощутимое увеличение при уменьшении числа Рейнольдса.

Следует отметить, что в переходных режимах потока искусственные турбулизаторы оказывают неоднозначное воздействие на характер течения в каналах с турбулизаторами. С одной стороны, они являются генератором возмущения, генерируют дополнительное турбулентное возмущение к уже существующему в течении естественному турбулентному возмущению.

С другой стороны, турбулизаторы, достигая определённой относительной высоты, коммуницируют с турбулизированными участками перемежающихся течений и содействуют быстрому генерированию возмущения турбулентности, разрастающихся до размеров проходных сечений канала — так называемых «пробок турбулентности».

Ротация отрезков каналов, имеющих структуры, обладающие как турбулентной, так и ламинарной характеристикой, то есть промежутки с перемежаемостями течения в переходных участках, генерирует изменения в условиях для теплосъёмов в определённых установленных сечениях каналов, следовательно, имеются колеблющиеся коэффициенты теплоотдачи.

У граничных условий второго рода, то есть для регулируемой подачи тепловой энергии, непостоянство коэффициентов теплоотдачи проявляется в колебании у температуры стенок с определённой амплитудой в зависимости от целого ряда факторов: максимальных значений коэффициентов теплоотдачи, что согласуется с турбулентным и ламинарным режимами течения в трубах для определённых критериев Рейнольдса и Струхала, то есть частотой колебаний; величиной термических нагрузок; методов подводов тепловой нагрузки; от величин и баланса для теплоёмкости стенки и теплоёмкости жидкости.

К наружным проявлениям взаимодействия в потоке искусственных поверхностных выступов в пространствах с транзитивными потоками можно детерминировать нижеследующие: уменьшение величин среднего временного коэффициента теплоотдачи на участках канала при ламинарном режиме течения; предварительная генерация перемежаемостей потоков с одновременными сужениями промежутков критериев Рейнольдса их осуществления; генерация эффекта интенсифицирования теплоотдачи на отрезках со слаборазвитой структурной турбулизацией потоков; уменьшение критических $Re_{кр}$ чисел Рейнольдса.

В рамках данного исследования интенсификация теплообмена в ламинарных и переходных областях течения исследовалась теоретически для турбулизаторов потока полукруглого поперечного сечения на основе многоблочных вычислительных технологий, основанных на решении факторизованным конечно-объёмным методом (ФКОМ) уравнений Рейнольдса и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках.

Численный расчёт показал, что интенсификация теплообмена будет иметь место с определённых чисел Рейнольдса, а для малых чисел Рейнольдса она незначительна.

Были проведены также численные исследования для более высоких чисел Рейнольдса для труб с турбулизаторами: $Re=10^4 \div 10^6$, а затем и для $Re=10^6 \div 10^{10}$ [14].

Успешное проведение математического моделирования для турбулентного и переходного режимов течения теплоносителя обосновывает применение этого метода для более низких чисел Рейнольдса, т.е. для ламинарной области, которая экспериментально исследовалась для трансформаторного масла в [19, 20, 21].

В этих работах исследовались также аналогичные течения и теплообмен для неньютоновских жидкостей [19, 20, 21], уровень интенсификации теплообмена который может превышать ньютоновские.

В рамках данного исследования проводилось математическое моделирование вышеуказанным методом ламинарного течения и теплообмена ньютоновской жидкости в трубах с турбулизаторами с параметрами: $Pr=170 \div 320$; $d/D=0,80; 0,86; 0,92$; $t/D=0,33; 0,66; 1,22$; $Re=10^2 \div 10^3 \div 1,5 \cdot 10^3$; температурный фактор: $1,07 \div 1,15$.

Данная область была опытным образом изучена в [19, 20, 21, 18], где было установлено, что при $Re \approx 1600$ режим течения становится переходным, поскольку качественно меняется характер изменения гидравлического сопротивления. Математическое моделирование режимов после $Re > 1600$ ($Re=1,6 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^3$) и далее вплоть до $Re=2,4 \cdot 10^3$ проводилось как для турбулентных течений методом, апробированным в [14, 15, 22, 23].

Расчётные результаты для наиболее характерных расчётных параметров ($d/D=0,92 \div 0,80$, $t/D=0,33 \div 1,22$; $Re=10^2 \div 2,4 \cdot 10^3$; $Pr=250$) по изотермическому гидравлическому сопротивлению и теплообмену при изотермическом течении представлены в табл. 1. Характерные линии токов для вышеуказанных параметров показаны на рис. 3—7.

Анализируя расчётные данные, представленные в табл. 1, можно сказать, что интенсификация теплообмена фактически мало проявляется в области ламинарного течения, но в области переходного режима она достаточно ощутима. Для малых чисел Рейнольдса ($Re=10^2$), что соответствует ламинарному режиму течения, интенсификация теплообмена отсутствует практически во всём исследуемом диапазоне. Для малых чисел Рейнольдса ($Re=10^2$) характерные линии тока в исследуемом диапазоне приведены на рис. 3. Как видно

из рис. 3, при больших относительных шагах между турбулизаторами ($t/D=1,22$) основной вихрь за турбулизатором невелик даже для больших высот между турбулизаторами ($d/D=0,80$), а для небольших высот ($d/D=0,92$) он маловыражен. Для последних, основные вихри остаются невеликими и для меньших шагов между турбулизаторами. Для больших высот турбулизаторов с малым шагом между ними ($d/D=0,80$, $t/D=0,33$) реализуется закрытая впадина (классификация по [6—12]) с заметным уклоном в сторону потока. Генерация такого вихря при данных числах Рейнольдса не интенсифицирует теплоотдачу, поскольку скорость вихревого течения невелика, но гидравлическое сопротивление канала ощутимо возрастает (табл.1).

Таблица 1. Расчётные результаты по реализованной теории для наиболее характерных исследуемых параметров ($d/D=0,92\div 0,80$, $t/D=0,33\div 1,22$; $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$; $Pr=250$) по изотермическому гидравлическому сопротивлению и теплообмену при изотермическом течении

Table 1. Calculated results according to the implemented theory for the most characteristic studied parameters ($d/D=0.92\div 0.80$, $t/D=0.33\div 1.22$; $Re=2\cdot 10^3\div 10^4$; $Pr=250$) on isothermal hydraulic resistance and heat transfer during isothermal flow

Pr	Re	$\frac{d}{D}$	$\frac{t}{D}$	$\frac{\xi}{\xi_{гд}}$	$\frac{Nu}{Nu_{гд}}$
250	10^2	0.80	0.33	2.37	0.95
250	10^2	0.80	0.66	1.89	0.88
250	10^2	0.80	1.22	1.57	0.90
250	10^3	0.80	0.33	3.55	1.59
250	10^3	0.80	0.66	2.60	1.29
250	10^3	0.80	1.22	2.16	1.13
250	$1,5\cdot 10^3$	0.80	0.33	3.91	1.96
250	$1,5\cdot 10^3$	0.80	0.66	2.80	1.45
250	$1,5\cdot 10^3$	0.80	1.22	2.33	1.26
250	$1,6\cdot 10^3$	0.80	0.33	4.00	1.91
250	$1,6\cdot 10^3$	0.80	0.66	2.98	2.08
250	$1,6\cdot 10^3$	0.80	1.22	2.83	2.32
250	$2\cdot 10^3$	0.80	0.33	4.27	2.16
250	$2\cdot 10^3$	0.80	0.66	3.20	2.20
250	$2\cdot 10^3$	0.80	1.22	3.96	2.41
250	$2,4\cdot 10^3$	0.80	0.33	4.55	2.37
250	$2,4\cdot 10^3$	0.80	0.66	4.23	2.44
250	$2,4\cdot 10^3$	0.80	1.22	4.11	2.36
250	10^2	0.86	0.33	1.77	0.90
250	10^2	0.86	0.66	1.44	0.90
250	10^2	0.86	1.22	1.30	0.93
250	10^3	0.86	0.33	2.39	1.24
250	10^3	0.86	0.66	1.82	1.03
250	10^3	0.86	1.22	1.56	0.99
250	$1,5\cdot 10^3$	0.86	0.33	2.58	1.40
250	$1,5\cdot 10^3$	0.86	0.66	1.92	1.17
250	$1,5\cdot 10^3$	0.86	1.22	1.65	1.06
250	$1,6\cdot 10^3$	0.86	0.33	2.61	1.59
250	$1,6\cdot 10^3$	0.86	0.66	2.03	1.79
250	$1,6\cdot 10^3$	0.86	1.22	2.05	2.01
250	$2\cdot 10^3$	0.86	0.33	2.76	1.89
250	$2\cdot 10^3$	0.86	0.66	2.30	2.13
250	$2\cdot 10^3$	0.86	1.22	2.39	2.15
250	$2,4\cdot 10^3$	0.86	0.33	2.99	2.25
250	$2,4\cdot 10^3$	0.86	0.66	2.63	2.27
250	$2,4\cdot 10^3$	0.86	1.22	2.66	2.21
250	10^2	0.92	0.33	1.29	0.92
250	10^2	0.92	0.66	1.16	0.96
250	10^2	0.92	1.22	1.14	0.98
250	10^3	0.92	0.33	1.49	0.93
250	10^3	0.92	0.66	1.26	0.94
250	10^3	0.92	1.22	1.17	0.97
250	$1,5\cdot 10^3$	0.92	0.33	1.55	1.01
250	$1,5\cdot 10^3$	0.92	0.66	1.30	0.96
250	$1,5\cdot 10^3$	0.92	1.22	1.19	0.98
250	$1,6\cdot 10^3$	0.92	0.33	1.56	1.14
250	$1,6\cdot 10^3$	0.92	0.66	1.31	1.05
250	$1,6\cdot 10^3$	0.92	1.22	1.21	1.07
250	$2\cdot 10^3$	0.92	0.33	1.61	1.28
250	$2\cdot 10^3$	0.92	0.66	1.35	1.19
250	$2\cdot 10^3$	0.92	1.22	1.26	1.24
250	$2,4\cdot 10^3$	0.92	0.33	1.66	1.49
250	$2,4\cdot 10^3$	0.92	0.66	1.46	1.59
250	$2,4\cdot 10^3$	0.92	1.22	1.31	1.47

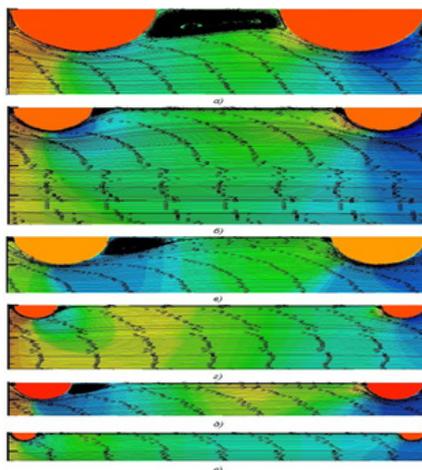


Рис. 3. Линии тока для трубы с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения при ламинарном режиме течения теплоносителя: а) $Re=10^2$, $d/D=0,80$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; б) $Re=10^2$, $d/D=0,92$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; в) $Re=10^2$, $d/D=0,80$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; г) $Re=10^2$, $d/D=0,92$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; д) $Re=10^2$, $d/D=0,80$, $t/D=1,22$, $Pr=250$; е) $Re=10^2$, $d/D=0,92$, $t/D=1,22$, $Pr=250$.

Fig. 3. Streamlines for a pipe with turbulators of semicircular cross-section under laminar coolant flow: а) $Re=10^2$, $d/D=0.80$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; б) $Re=10^2$, $d/D=0.92$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; в) $Re=10^2$, $d/D=0.80$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; д) $Re=10^2$, $d/D=0.92$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; е) $Re=10^2$, $d/D=0.80$, $t/D=1.22$, $Pr=250$; ф) $Re=10^2$, $d/D=0.92$, $t/D=1.22$, $Pr=250$.

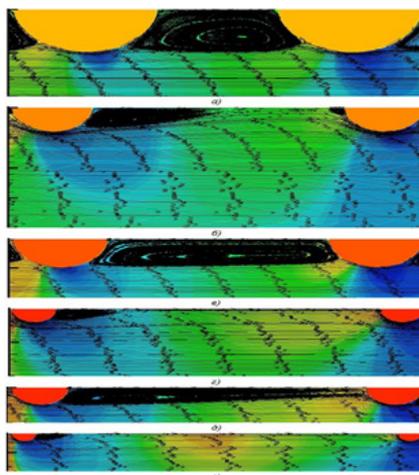


Рис. 4. Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при ламинарном режиме течения теплоносителя: а) $Re=10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; б) $Re=10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; в) $Re=10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; г) $Re=10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; д) $Re=10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=1,22$, $Pr=250$; е) $Re=10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=1,22$, $Pr=250$.

Fig. 4. Streamlines for pipes with turbulators of semicircular transverse profiles under laminar coolant flow: а) $Re=10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; б) $Re=10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; в) $Re=10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; д) $Re=10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; е) $Re=10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=1.22$, $Pr=250$; ф) $Re=10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=1.22$, $Pr=250$.

Вышесказанное обуславливает отсутствие интенсификации теплообмена при применении турбулизаторов, или даже небольшое ухудшение теплообмена, поскольку данные вихри имеют малую скорость и в сущности являются застойными зонами. При увеличении числа Рейнольдса до $Re=10^3$ ощутимая интенсификация имеет место только при высоких турбулизаторах потока ($d/D=0,80$). Для ламинарного режима течения при повышенных числах Рейнольдса ($Re=10^3$) характерные линии тока в исследуемом диапазоне приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, вихри при отрыве и присоединении потоков уже выражены гораздо отчетливее, чем при малых числах Рейнольдса. Для относительно невысоких турбулизаторов ($d/D=0,92$) имеет место открытая впадина [6—12], а для относительно высоких ($d/D=0,80$) полуоткрытая впадина реализуется только при широких шагах между турбулизаторами ($t/D=1,22$), а для остальных шагах — чисто закрытые, в которых практически уже нет

уклона по отношению к потоку. Здесь ощутимая интенсификация теплообмена реализуется в закрытых впадинах (меньше, в полуоткрытых) при высоких турбулизаторах потока ($d/D=0,80$), а для более низких турбулизаторах потока интенсификация потока невелика, т.к. генерируемые вихри присоединяются недалеко от турбулизаторов.

При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса до $Re=1,5 \cdot 10^3$, т.е. до начала переходного режима течения, ощутимая интенсификация имеет место уже и для средних ($d/D=0,86$) турбулизаторов потока, а для высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$) реализуется практически двойная интенсификация, но для низких турбулизаторов ($d/D=0,92$) интенсификация теплообмена ещё довольно невелика. Для предельных чисел Рейнольдса, где реализуется только ламинарный режим течения ($Re=1,5 \cdot 10^3$) характерные линии тока в исследуемом диапазоне приведены на рис. 5. Как видно из рис. 5, линии токов, характерные для полуоткрытых впадин, реализуются уже для турбулизаторов небольших высот с малым шагом между турбулизаторами ($d/D=0,92$, $t/D=0,33$). Для них увеличение относительного шага приводит к возникновению открытой впадины, но точка присоединения располагается недалеко от турбулизатора.

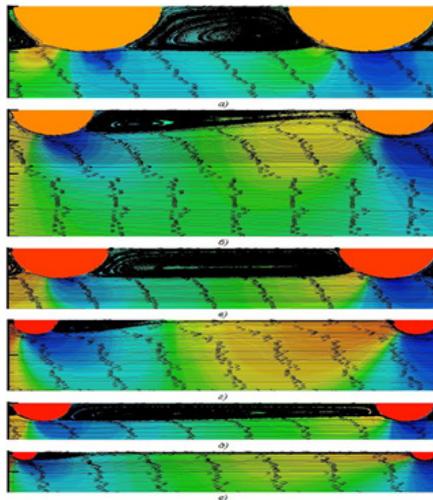


Рис. 5. Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при ламинарном режиме течения теплоносителя: а) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; б) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; в) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; г) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; д) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=1,22$, $Pr=250$; е) $Re=1,5 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=1,22$, $Pr=250$.

Fig. 5. Streamlines for pipes with turbulators of semicircular transverse profiles under laminar coolant flow: а) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; б) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; в) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; г) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; д) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=1.22$, $Pr=250$; е) $Re=1.5 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=1.22$, $Pr=250$.

Для турбулизаторов больших относительных высот ($d/D=0,80$) реализуются закрытые впадины [6—12], в которых её наклон в сторону потока будет только для больших шагов между турбулизаторами ($t/D=1,22$). Интенсификация теплообмена здесь значительна только для относительно высоких турбулизаторов и доходит до $Nu/Nu_{пл} \approx 1,5 \div 2,0$, для относительно средних высот ($d/D=0,86$) она невелика, а для относительно небольших высот турбулизаторов ($d/D=0,92$) она незначительна.

Увеличение числа Рейнольдса выше критического $Re \geq 1,6 \cdot 10^3$, т.е. в переходном режиме течения, интенсификация теплообмена присутствует для всех высот турбулазаторов; максимальная интенсификация теплообмена с увеличением числа Рейнольдса реализуется при средних шагах между турбулизаторами ($t/D=0,66$). Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса ($Re \geq 1,6 \cdot 10^3$) приводит к возникновению переходного режима течения теплоносителя, в котором будет происходить увеличение уровня интенсификации теплообмена при ещё большем повышении гидравлического сопротивления. Для переходного режима течения теплоносителя с числами Рейнольдса ($Re=1,6 \cdot 10^3 \div 2,4 \cdot 10^3$) характерные линии тока в исследуемом диапазоне показаны на рис. 6 и 7.

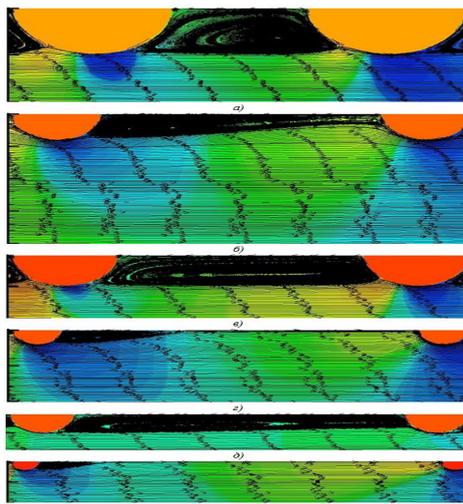


Рис. 6. Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при ламинарном режиме течения теплоносителя: а) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; б) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; в) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; г) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; д) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=1,22$, $Pr=250$; е) $Re=1,6 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=1,22$, $Pr=250$.

Fig. 6. Current lines for pipes with turbulators of semicircular transverse profiles under laminar coolant flow: а) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; б) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; в) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; г) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; д) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=1.22$, $Pr=250$; е) $Re=1.6 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=1.22$, $Pr=250$.

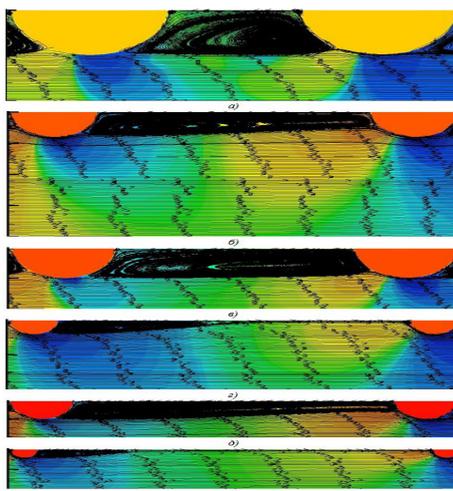


Рис. 7. Линии токов для труб с турбулизаторами полукруглых поперечных профилей при ламинарном режиме течения теплоносителя: а) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; б) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,33$, $Pr=250$; в) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; г) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=0,66$, $Pr=250$; д) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,80$, $t/D=1,22$, $Pr=250$; е) $Re=2,4 \cdot 10^3$, $d/D=0,92$, $t/D=1,22$, $Pr=250$.

Fig. 7. Streamlines for pipes with turbulators of semicircular transverse profiles under laminar coolant flow: а) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; б) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.33$, $Pr=250$; в) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; г) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=0.66$, $Pr=250$; д) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.80$, $t/D=1.22$, $Pr=250$; е) $Re=2.4 \cdot 10^3$, $d/D=0.92$, $t/D=1.22$, $Pr=250$.

Как видно из рис. 6 и 7, увеличение числа Рейнольдса для относительно высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$) сказывается на основном вихре только при больших шагах между турбулизаторами ($t/D=1,22$) — полуоткрытая впадина переходит в закрытую, а для меньших шагов между турбулизаторами закрытая впадина остаётся почти неизменной.

Для турбулизаторов малых относительных высот ($d/D=0,92$) для малых шагов между турбулизаторами ($t/D=0,33$) полуоткрытая впадина переходит в закрытую, а для средних ($t/D=0,66$) и больших ($t/D=1,22$) шагов между турбулизаторами реализуется открытая впадина, причём точка присоединения располагается уже ощутимо дальше от турбулизатора,

что особенно заметно при больших числах Рейнольдса ($Re=2,4 \cdot 10^3$) и на средних ($t/D=0,66$) шагах между турбулизаторами. Здесь интенсификация теплообмена достигает уже значительных величин (табл. 1), причём она особенно возрастает на средних шагах между турбулизаторами ($t/D=0,66$), поскольку точка присоединения потока будет располагаться относительно дальше по потоку от турбулизатора, чем для больших шагов между турбулизаторами ($t/D=1,22$).

Естественно, что дальнейшее увеличение интенсификации теплообмена для больших относительных шагов между турбулизаторами ($t/D=1,22$) будет иметь место при ещё более высоких числах Рейнольдса, что характерно для турбулентного режима течения теплоносителя — такие режимы рассматривались экспериментально и теоретически, например, в работах [1-12, 14-17].

Анализ линий тока для переходного и ламинарного режимов течений на основе данных решений и данных [15, 22, 23] показывает, что при ламинарном течении закрытые впадины реализуются с углами наклона к потоку основного вихря, а при переходном режиме они реализуются практически без наклона. Открытые впадины при ламинарном течении реализуются с гораздо близким расположением к турбулизаторам точек присоединений пограничных слоёв, чем при переходном течении. Полуоткрытые впадины реализуются при ламинарном режиме течения в довольно ограниченном диапазоне определяющих параметров, в отличие от переходного режима течения.

Относительное гидравлическое сопротивление для невысоких турбулизаторов ($d/D=0,92$) увеличивается довольно незначительно, а для турбулизаторов средних высот ($d/D=0,86$) оно достигает $2 \div 2,5$ до критического числа Рейнольдса, а впоследствии оно увеличивается до 3 раз; для высоких турбулизаторов относительное гидросопротивление увеличивается до 4 раз ещё до достижения переходного режима течения, после чего оно увеличивается до 4,5 раз.

Относительный изотермический интенсифицированный теплообмен при ламинарном режиме течения вязкого теплоносителя ($Pr=250$) для относительно высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$) увеличивается практически в 2 раза; для относительно средних высот турбулизаторов ($d/D=0,86$) — почти в полтора, а для низких относительных высот ($d/D=0,92$) интенсификация теплообмена незначительна.

Для переходного режима течения относительный интенсифицированный изотермический теплообмен уже составляет около двух с половиной для высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$), для средних высот ($d/D=0,86$) — порядка двух с четвертью, а для низких ($d/D=0,92$) — более полутора. Для ламинарного режима течения максимальная интенсификация достигается на малых шагах между турбулизаторами ($t/D=0,33$), а в переходном режиме — на средних ($t/D=0,66$). Корреляция приведённых в данной работе расчётных данных по интенсифицированному теплообмену и гидросопротивлению с экспериментальными [19, 20, 21] показывает, что по гидравлическому сопротивлению расчёт вполне удовлетворительно согласуется с экспериментом [19, 20, 21], а по теплообмену расчётные данные качественно соответствуют экспериментальным данным [19, 20, 21] в рамках метода относительного соответствия.

Вывод. 1. Разработанный и используемый в данном исследовании способ расчётов, базирующийся на решениях конечно-объёмными методами уравнения Рейнольдса, замыкаемого при помощи модели переносов сдвигового напряжения Менгера и уравнения энергии на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке позволил с необходимой погрешностью провести расчёт относительной теплоотдачи в трубах с полукруглыми кольцевыми турбулизаторами для вязких теплоносителей в ламинарной и переходной областях течений.

2. В работе было проведено математическое моделирование теплоотдачи в трубе с турбулизаторами полукруглых поперечных сечений при числах Рейнольдса, характерных для ламинарного ($Re=10^2 \div 1,5 \cdot 10^3$) и переходного ($Re=1,6 \cdot 10^3 \div 2,4 \cdot 10^4$) режимов течения для вязких теплоносителей ($Pr=170 \div 320$), на основе многоблочной вычислительной технологии, основанной на решениях факторизованными конечно-объёмными методами уравнений Рейнольдса и уравнения энергии и по-

лучена интенсификация теплообмена для данных относительно небольших чисел Рейнольдса для соответствующих чисел Прандтля, что может быть актуально в каналах теплообменных аппаратов.

3. Преимущество применённого в работе метода на основе метода контрольных объёмов над существующими состоит в том, что последние [19 - 21] основывались на целом ряде приближений, например: приближения Галёркина, линеаризации уравнений, применения методов переменных направлений с последующей реализацией методов прогонки, применения метода переменных уравнений с последующей реализацией на основе методов прогонки и т.п.

4. Был проведён анализ линий тока для переходного и ламинарного режимов течений на основе данных решений и данных [15, 22, 23], который показал, что при ламинарном течении закрытые впадины реализуются с углами наклона к потоку основного вихря, а при переходном режиме они реализуются практически без наклона, открытые впадины при ламинарном течении реализуются с гораздо близким расположением к турбулизаторам точек присоединений пограничных слоёв, чем при переходном течении.

5. Относительное гидравлическое сопротивление для невысоких турбулизаторов ($d/D=0,92$) увеличивается довольно незначительно, а для турбулизаторов средних высот ($d/D=0,86$) оно достигает $2\div 2,5$ до критического числа Рейнольдса, а впоследствии оно увеличивается до 3 раз; для высоких турбулизаторов относительное гидросопротивление увеличивается до 4 раз ещё до достижения переходного режима течения, после чего оно увеличивается до 4,5 раз.

6. Относительный изотермический интенсифицированный теплообмен при ламинарном режиме течения вязкого теплоносителя ($Pr=250$) для относительно высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$) увеличивается практически в 2 раза; для относительно средних высот турбулизаторов ($d/D=0,86$) — почти в полтора, а для низких относительных высот ($d/D=0,92$) интенсификация теплообмена незначительна. Для переходного режима течения относительный интенсифицированный изотермический теплообмен уже составляет около двух с половиной для высоких турбулизаторов ($d/D=0,80$), для средних высот ($d/D=0,86$) — порядка двух с четвертью, а для низких ($d/D=0,92$) — более полутора. Для ламинарного режима течения максимальная интенсификация достигается на малых шагах между турбулизаторами ($t/D=0,33$), а в переходном режиме — на средних ($t/D=0,66$).

7. Применённым методом ФКОМ в работе были получены как локальные, так и осреднённые характеристики потока и теплообмена в трубах с турбулизаторами для ламинарного и переходного режимов течения теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с существующим экспериментом.

Библиографический список:

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. - М.: Машиностроение, 1990. - 208 с.
2. Эффективные поверхности теплообмена/ Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. — М.: МЭИ, 2003. — Т.1. — С. 57—60.
4. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — 2004. — Т. 11. — № 2. — С. 28—35.
5. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43. — № 2. — С. 223—230.
6. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2005. — 632 с.
7. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. — 405 с.
8. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным

- теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.
9. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компандных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: МГАКХиС, 2010. — 288 с.
 10. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. М.: МГАКХиС, 2011. — 343 с.
 11. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. — 2011. — № 4. — С. 64—66.
 12. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. — 2011. — № 12. — С. 4—15.
 13. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев, А.И.Леонтьев. — СПб: Судостроение, 2005. — 398 с.
 14. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 8—18.
 15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в области перехода к турбулентному течению // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. Том 1. № 13. С. 60—65.
 16. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. — Л.: Энергоатомиздат. ЛО, 1987. — 263 с.
 17. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. ЛО, 1980. — 144 с.
 18. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren. Forsch. Ing.-Wes. 1974; 40(4): 117—119.
 19. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 376 с.
 20. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 288 с.
 21. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при ламинарном течении вязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью / Ю.Г.Назмеев, А.М.Конахин, Б.А.Кумиров, В.В.Олимпиев, О.П.Шинкевич // Теплоэнергетика. — 1993. — № 4. — С. 66—69.
 22. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в переходной к турбулентному течению области // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». — 2020. — № 88 (декабрь). — С. 23—37.
 23. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в области перехода к турбулентному течению // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». — 2021. — Режим доступа: <https://ped-library.ru/1626653956>.

References

1. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroenie, 1990; 208. (In Russ)
2. Effective heat transfer surfaces. E.K.Kalinin, G.A.Dreitzer, I.Z. Kopp et al. M.: Energoatomizdat, 1998; 408. (In Russ)
3. Dreitzer G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions. *Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: Proceedings of the XIV School-seminar of young scientists and specialists under the guidance of Academician of the Russian Academy of Sciences A.I.Leontiev*. M.: MEI, 2003; 1: 57—60. (In Russ)
4. Dreitzer G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat exchange in a pipe with periodic protrusions. *Vestnik MAI*. 2004; 11(2):28-35. (In Russ)
5. Dreitzer G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat exchange in a pipe with periodically located surface flow turbulators. *Thermophysics of high temperatures*. 2005; 43(2): 223—230. (In Russ)

6. Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat exchange during turbulent flow in channels: Diss. ... doct. technical sciences. Moscow: MAI, 2005; 632. (In Russ)
7. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009; 405. (In Russ)
8. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume II. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using non—basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2010; 290. (In Russ)
9. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat exchange during turbulent flow in channels using multilayer, supermultilayer and compound models of a turbulent boundary layer. M.: MGAKHiS, 2010; 288. (In Russ)
10. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume IV. Special aspects of mathematical modeling of hydro—gas dynamics, heat transfer, and heat transfer in heat exchangers with intensified heat exchange. M.: MGAKHiS, 2011; 343. (In Russ)
11. Lobanov I.E. Theoretical study of the structure of vortex zones between periodic, superficially located turbulators of a rectangular cross-section flow. *News of universities. Aviation equipment.* 2011; 4: 64–66. (In Russ)
12. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and kinetic energy components of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. *Branch aspects of technical sciences.* 2011; 12: 4–15. (In Russ)
13. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages. Yu.A.Bystrov, S.A.Isaev, H.A.Kudryavtsev, A.I.Leontiev. St. Petersburg: Shipbuilding, 2005;398. (In Russ)
14. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators, as well as in rough pipes, in air at large Reynolds numbers. *Branch aspects of technical sciences.* 2013; 9: 8–18. (In Russ)
15. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators in the area of transition to turbulent flow. *Bulletin of the Angarsk State Technical University.* 2019;1(13): 60–65. (In Russ)
16. Migay V.K. Modeling of heat exchange power equipment. L.: Energoatomizdat. LO, 1987; 263. (In Russ)
17. Migay V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers. L.: Energy. LO, 1980;144. (In Russ)
18. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren. *Forsch. Ing.–Wes.* 1974; 40(4): 117–119.
19. Nazmeev Yu.G. Heat exchange during laminar fluid flow in discretely rough channels. M.: Energoatomizdat, 1998; 376. (In Russ)
20. Nazmeev Yu.G., Lavygin V.M. Heat exchangers of thermal power plants. M.: Energoatomizdat, 1998; 288. (In Russ)
21. Heat exchange and hydraulic resistance during laminar flow of viscous fluid in pipes with artificial roughness. Yu.G.Nazmeev, A.M.Konakhin, B.A.Kumirov, V.V.Olympiev, O.P.Shinkevich. *Thermal power engineering.* 1993;. 4: 66–69. (In Russ)
22. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators in a region transitioning to a turbulent flow. *Electronic periodical peer-reviewed scientific journal “SCI-ARTICLE.RU “.* 2020; 88 (December): 23–37. (In Russ)
23. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators in the transition to turbulent flow. *Web portal of the professional network pedagogical community “Ped-library.ru “.* 2021. Access mode: <https://ped-library.ru/1626653956>. (In Russ)

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МАИ; lloobbaannooff@live.ru

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MAI; lloobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 09.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 01.07.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 01.07.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК.621.575.: 662.997

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-37-45

Обзорная статья /Review article



Технические аспекты развития гелиоэнергетической холодильной техники на твердых сорбентах

Ю.В. Шипулина, М.Ф. Руденко, В.Н. Саинова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является обзор этапов развития холодильной техники сорбционного действия на твердых сорбентах и оценка современного состояния развития такой техники бытового назначения применительно к использованию солнечной энергетики. **Метод.** Анализируется динамика развития гелиоэнергетической холодильной техники на основе сорбционных термотрансформаторов, рабочими парами которых являются твердые сорбенты и озонобезопасные хладагенты. Начало развития идет от создания установок периодического действия, работающих от тепловой энергии традиционных энергоносителей: горячей воды, сжигании углеводородного или органического топлива, электрической энергии, а охлаждения водой и воздухом и заканчивается современными холодильными установками, работающими от энергии солнечной радиации и суточного перепада температур окружающей среды. **Результат.** Отмечаются особенности принятия технических решений, лежащих в основе проектирования основных аппаратов гелиоэнергетических холодильных установок. Описаны схемные решения и принципы работы установок и их аппаратов, применяемых для улучшения эффективности работы. Рассмотрены основные тенденции исследований, проводимых учеными для улучшения работы гелиоэнергетических термотрансформаторов циклического действия. **Вывод.** Результаты исследования могут быть полезны молодым ученым, инженерам и конструкторам для проектирования и разработки инновационных автономных термотрансформаторов и холодильных установок для охлаждения и кратковременного хранения продуктов и медикаментов, получения пищевого льда, кондиционирования, работающих автономно от солнечной энергии. Такие установки просты в изготовлении и эксплуатации.

Ключевые слова: солнечная энергия, адсорбционные холодильные установки, схемы, технические решения, рабочие пары.

Для цитирования: Ю.В. Шипулина, М.Ф. Руденко, В.Н. Саинова. Технические аспекты развития гелиоэнергетической холодильной техники на твердых сорбентах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):37-45. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-37-45

Technical aspects of the development of solar energy refrigeration technology on solid sorbents

Y.V. Shipulina, M.F., Rudenko, V.N. Sainova

Astrakhan State Technical University,
16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is a scientific review of the stages of development of refrigeration technology with sorption action on solid sorbents and an assessment of the current state of development of such household equipment in relation to the use of solar energy. **Method.** The dynamics of the development of solar energy refrigeration equipment based on sorption thermotransformers, the working vapors of which are solid sorbents and ozone-safe refrigerants, are analyzed. The beginning of development comes from the creation of periodic installations operating from the thermal energy of traditional energy carriers: hot water, burning of

hydrocarbon or organic fuels, electric energy, and cooling with water and air and ends with modern refrigeration units operating from the energy of solar radiation and the daily temperature difference of the environment. **Result.** The peculiarities of making technical decisions underlying the design of the main devices of solar energy refrigeration units are noted. Circuit designs and operating principles of installations and their devices used to improve operating efficiency are described. The main trends in research conducted by scientists to improve the operation of solar energy thermal transformers of cyclic action are considered. **Conclusion.** This article may be useful to young scientists, engineers and designers for the design and development of innovative autonomous thermal transmitters and refrigeration units for cooling and short-term storage of products and medicines, obtaining food ice, air conditioning, operating independently from solar energy. Such installations are easy to manufacture and operate.

Keywords: solar energy, adsorption refrigeration units, schemes, technical solutions, working pairs.

Для цитирования: Y.V. Shipulina, M.F., Rudenko, V.N. Sainova. Technical aspects of the development of solar energy refrigeration technology on solid sorbents.. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):37-45. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-37-45

Введение. Эффективное внедрение новых экологически безопасных технологий получения теплоты и холода за счет энергии солнечной радиации возможно путем применения сорбционных термотрансформаторов, в которых используются твердые сорбенты и озонобезопасные хладагенты. Для этого необходима разработка новых конструкций установок, аппаратов, поиска новых сорбентов и хладагентов, создание новых солнцепоглощающих покрытий, материалов и т.п.

Постановка задачи. В основе работы гелиоэнергетических термотрансформаторов используется энергия солнечной радиации и суточные перепады температур окружающей среды, поэтому от того насколько эффективно будут реализованы эти условия в конструкциях аппаратов этих трансформаторов, использования совершенных характеристик рабочих пар (сорбент - хладагент) в установках, применения специальных материалов: солнцепоглощающих, теплоизолирующих, теплопроводящих, используемых в них, наличия совершенной арматурной компоновки, устройств автоматического регулирования работой системы и других особенных условий будет зависеть и эффективность работы всей холодильной установки.

Методы исследования. Рассмотрим этапы развития холодильной техники сорбционного действия на твердых сорбентах и современное состояние развития такой техники бытового назначения применительно к использованию солнечной энергетики.

В самых первых установках использовались сорбенты на основе щелочноземельных солей, например, хлорид кальция и хладагент – аммиак.

Реакция «сухой» абсорбции (образования аммиакатов) такой пары идет в несколько этапов:

$\text{CaCl}_2 + 2 \text{NH}_3 = \text{CaCl}_2 (2 (\text{NH}_3)) + \Delta i$ – образование диаммиаката с отводом теплоты реакции;

$\text{CaCl}_2 (2 (\text{NH}_3)) + 2 \text{NH}_3 = \text{CaCl}_2 (4 (\text{NH}_3)) + \Delta i$ – образование тетрааммиаката с отводом теплоты реакции;

При абсорбции сухой соли до насыщенного состояния аммиаком:

$\text{CaCl}_2 \cdot \text{CaCl}_2 (4 (\text{NH}_3)) + 4 \text{NH}_3 = \text{CaCl}_2 (8 (\text{NH}_3)) + \Delta i$ – образование октоаммиакатов с отводом теплоты реакции.

При подводе теплоты идет обратный процесс распада аммиакатов на чистые твердые соли и газообразный аммиак. Почему первые ученые и инженеры обратили свое внимание на щелочноземельные соли и прежде всего на хлориды кальция и стронция. Строгой научной теории на объяснение этого феномена нет, но обращает внимание на себя следующее: молекулы этих солей имеют на последней орбите по восемь свободных

электронов и к этим электронам могут присоединяться при определенных энергетических условиях биполярные молекулы аммиака, образуя неустойчивые соединения ди-, тетра-, окто-, аммиакаты. Как только увеличивается энергетический уровень молекулы за счет подвода теплоты, начинается поэтапно ступенчатый распад аммиакатов. Ученые отметили, что образование аммиакатов связано не только с массовыми, но и объемными изменениями сорбента, например, 100 грамм чистого сорбента соли хлорида кальция может присоединить 102 грамма чистого хладагента -аммиака, при этом объем аммиакатов по сравнению с чистой солью увеличивается в 2 – 3 раза [1 -10].

Обсуждение результатов. Создание и работа первых холодильных установок на твердых сорбентах уходит корнями глубоко в историю- в начало прошлого столетия. Такими были холодильные установки периодического действия. Одним из самых популярных был домашний холодильник периодического действия «Frigor», выпускаемый в Германии в 1920-х годах [1] (рис.1).

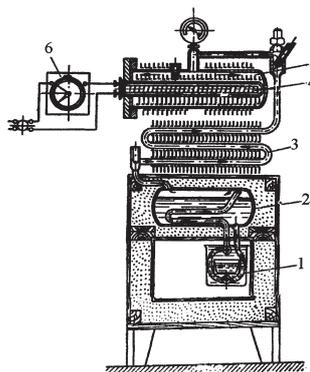


Рис. 1. Домашний холодильник Frigor: 1-испаритель змеевиковый; 2- ресивер;

3 – конденсатор воздушный; 4 – электрический нагреватель; 5 - генератор-абсорбер

Fig. 1. Frigor home refrigerator: 1-coil evaporator; 2- receiver; 3 – air condenser; 4 – electric heater; 5 - generator-absorber

Он состоял из следующих аппаратов: генератора –абсорбера – 5, совмещенной конструкции, выполненного в виде металлической конструкции, внутри которого располагались трубки с электрическим нагревателем и внешнем оребрении. Между ребрами трубок засыпался сухой сорбент, конденсатор – 3, воздушного охлаждения с оребренными трубками, ресивер -2 и испарительный змеевик -1, расположенного в сосуде с водой, аккумулирующей холод в изолированной охлаждаемой камере. Работа холодильника состояла из двух периодов: период выпаривания холодильного агента –аммиака из сорбента – хлорида кальция за счет подвода тепловой энергии от электронагревателя - 4 сжижения и охлаждения аммиака в конденсаторе и накоплении в ресивере, а затем в испарителе -1.

Второй период – получения холода в испарителе: после отключения электронагревателя, когда наступает естественное охлаждение генератора-абсорбера, сухая соль охлаждается и начинает поглощать (абсорбировать) пары аммиака из испарителя и частично из ресивера. Основная часть теплоты идет из холодильной камеры к испарителю, где начинается кипение аммиака и возникает охлаждающий эффект, пары хладагента через конденсатор идут в генератор-адсорбер по тем же каналам пути в обратном направлении.

Установление часового механизма позволяло периодически включать и выключать нагреватель, периодически охлаждая камеру холодильника. Более мощные машины периодического действия, работающие на тепловой энергии от горения дров, угля, газа, а охлаждения водой предлагались в работах [2,3]. Номенклатура аппаратов крупных установок и периодический принцип работы оставался тем же самым, что и в холодильнике «Frigor». Сначала при подводе теплоты к генератору с насыщенным сорбентом генератор - абсорбер десорбирует из сорбента соли аммиака, а конденсатор – сжижает хладагент и накапливает в ресивере (период зарядки). А затем – охлаждается генератор-абсорбер, понижается давление в установке и начинается абсорбция аммиака из испарителя в котором он кипит, создавая эффект

охлаждения до температур замерзания воды в холодильной камере. Конструктивно генератор и абсорбер, где находился сорбент выполнялся совмещенного типа, в котором попеременно создавали то горячую среду нагрева сорбента, то холодную среду охлаждения сорбента.

В крупных холодильниках генераторы-абсорберы изготовлялись или пластинчатой конструкции, или трубчатой с внешним оребрением установленными в желоба, через стенки и ребра которых подводилась или отводилась теплота при нагреве или охлаждении. Теплота подводилась к насыщенному сорбенту горячей водой или теплом от прямого горения дров или угля, а отводилось тепло холодной водой. В генератор – абсорбер засыпался твердый сорбент на пластины или между ребрами трубок в виде щелочноземельной соли. А в ресивер и испаритель заливался жидкий хладагент – аммиак.

Аппараты совмещенного действия, их работа регулировалась вручную за счет переключения соответствующих вентилях. Подвод тепла к генератору осуществлялся за счет нагрева горячей водой или сжиганием углеводородного, древесного или органического топлива. После 5-8 лет эксплуатации таких установок был проведен анализ конструктивных особенностей эксплуатации основных аппаратов генераторов-абсорберов. Аппараты были разрезаны и изучены на возможность дальнейшей модернизации.

Анализ показал сильную деформацию пластин и оребрения, сползание сорбента в нижнюю часть аппарата, остекление соли в некоторых узлах конструкции. Периодичность работы генератора, непостоянство охлаждения во времени, большое количество ручного труда, неэффективность работы топки горения и подвода и отвода воды, а также рост электрических мощностей, развитие компрессоростояния вытеснили такие установки периодического действия из промышленности. Хотя надо сказать что в Китае встречаются на небольших рыбацких лодках подобные установки для замораживания и временного хранения пойманной рыбы в морских условиях. Спустя много лет ученые снова вернулись к идее периодических установок для использования их при работе с солнечной энергией. Идея хорошая, так как конструкция установок простая, бесшумная, нет механически движущихся деталей, не нужна электрическая энергия.

Идея установок периодического действия легли в основу создания солнцеексплуатирующих холодильных машин и установок. В определенных местах нашей планеты есть места, где солнечных дней много и суточные перепады температур значительные.

Осталось создать аппарат, который смог бы «заманить» солнце в ловушку и его энергией нагреть сначала насыщенный сорбент, выделяя из него хладагент, а затем в ночное время охладить его температурой окружающего воздуха, то есть сделать эффективный термокомпрессор. Задача первых конструкторов солнцеексплуатирующих установок заключалась в основном в том, чтобы создать гелиоэнергетическую, установку, способную использовать энергию солнечной радиации для обогрева реактора генератора. Ученые обратили внимание на две схемы конструкции генератора-абсорбера: первая, применение зеркальных параболических солнечных концентраторов, фокусирующих солнечные лучи на поверхность нагрева; вторая схема – это использование конструкции «горячего ящика» [4] (рис.2).

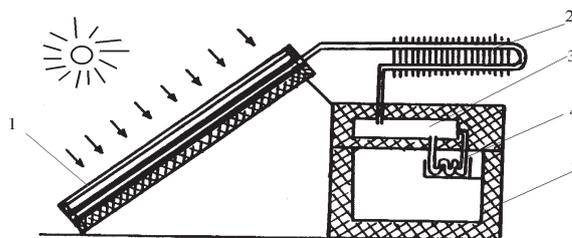


Рис. 2. Гелиоэнергетический холодильник: 1 - генератор-абсорбер совмещенной конструкции типа «горячий ящик», 2-конденсатор воздушный, 3 –ресивер, 4- испаритель, 5- изоляционная перегородка, 5- холодильная камера

Fig. 2. Solar refrigerator: 1 - generator-absorber of a combined “hot box” design, 2-air condenser, 3-receiver, 4-evaporator, 5-insulating partition, 5- refrigeration chamber

В первых гелиоэнергетических установках 60-80 годах XX века применялись генераторы – абсорберы трубчатой конструкции, собранные параллельно вертикально в конструкцию однорядного коллектора и помещенную в «горячий ящик», который устанавливался строго на юг под углом широты местности к горизонту с внешним облучением солнцем прозрачной стороны. Вертикальные конструкции реакторов генератора-абсорбера позволяют в нижней части аппарата держать соль. Сорбент расширялся при абсорбции в верхнюю внутреннюю часть трубы, а при десорбции, из аммиаков которой, хладагент в виде газа отделялся и отводился в конденсатор. Недостатками таких конструкций были неполный возврат соли при обратных перемещениях сверху вниз, образовывались пустоты за счет неравномерного нагрева и охлаждения ее. Часть конструкции реактора оставалась не рабочей, за счет расширения соли.

Впервые реализацию объемного расширения при образовании аммиаков в реакторе генератора-абсорбера с целью повышения производительности была решена учеными [6], которые предложили в цилиндрический реактор поставить скользящий по перфорированному хладопроводу цилиндрический поршень. Поршень был закреплен к внутренней части корпуса генератора-абсорбера пружиной. Пружина находилась в толще сорбента, разрыхляя его при растяжении и сжатии, не давая сорбенту слеживаться. Постоянная подпрессовка аммиаков сорбента поршнем в целом улучшала равномерность набивки реактора, ликвидировала возможное образование полостей и пустот, создавала равномерность подвода и отвода тепловых потоков к сорбенту.

Другие исследователи предложили на гладкий перфорированный хладопровод с отверстиями насадить [7] лепестковые пластины с горизонтальными насечками, между которыми располагался насыщенный сорбент. Пластины зажимались пружиной, работающей на сжатие (рис.3).

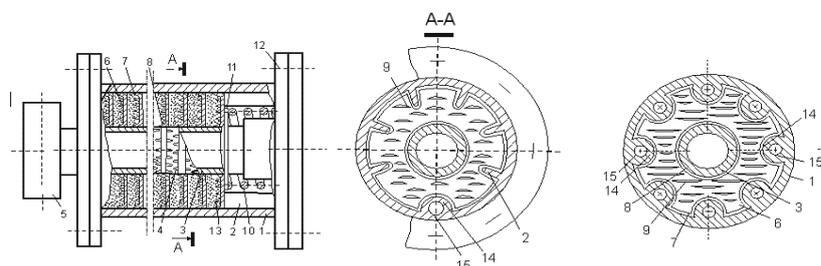


Рис. 3. Схема конструкции генератора-абсорбера с внутренним подвижным оребрением: фрагменты пластин: 1- корпус цилиндрический, 2-ребро продольное, 3-трубка перфорированная, 4-отверстие овальное, 5- хладопровод, 6- пластины подвижные лепестковообразные, 7 - буртики срезные внутренние, 8 –буртики срезные наружные, 9- насечки горизонтальные, 10 - пружина винтовая, 11 – шайба подвижная, 12 – фланец корпуса, 13 - абсорбент,

14-большое продольное ребро, 15-отверстие для отвода тепла абсорбции

Fig. 3. Design diagram of a generator-absorber with internal movable fins: Fragments of plates:

1 - cylindrical body, 2 - longitudinal rib, 3 - perforated tube, 4 - oval hole, 5 - cold pipe,

6 - movable petal-shaped plates, 7 - internal shear beads, 8 - external shear beads,

9 - horizontal notches, 10 - screw spring, 11 - movable washer, 12 - housing flange, 13 - absorber,

14 - large longitudinal rib, 15 - hole for absorption heat removal

Развитые горизонтальные насечки на пластинах не дают сползать аммиакатам соли под действием гравитационных сил вниз, пружина сглаживала продольные деформации объемных изменений аммиаков. Заостренные заусенцы на внешних кромках пластин не давали слеживаться сорбенту. Острыми заусенцами перемещаясь по наружной поверхности перфорированного хладопровода и внутренней стенки корпуса реактора лепестковые пластинки срезали подмокшие слои сорбента, очищая поверхности скольжения от нарастания сорбента, а горизонтальные насечки удерживали сорбент от гравитационного перемещения вниз во время деформации, к тому же длина горизонтальных заусенцев определяла горизонтальные габариты перемещения и фиксировала подвижность конструкции пакета всех

пластин. Внутреннее оребрение корпуса реактора усложняло его изготовление, однако если в этих ребрах сделать каналы для протекания теплоносителя, то это дает возможность получать теплоту через теплоноситель днем от избытка тепла от солнца, а ночью от теплоты абсорбции.

Большим вкладом в развитие гелиоэнергетической техники является изобретение организации полного циклического оборота хладагента в замкнутой системе установки от генератора-адсорбера через конденсатор в ресивер через вентиль или обратный клапан и обратно из ресивера через регулирующий вентиль подачи в испаритель и второй вентиль или обратный клапан в генератор-адсорбер (рис. 4) [5]. Такое движение хладагента позволяет управлять работой установки автоматически без вмешательства человека.

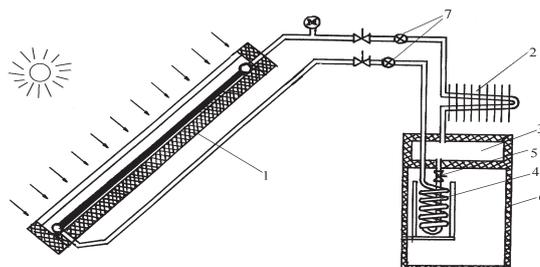


Рис. 4. Гелиоэнергетический холодильник: 1 - Генератор-адсорбер совмещенной конструкции типа «горячий ящик», 2-конденсатор воздушный, 3 –ресивер, 4- испаритель, 5- изоляционная перегородка, 6- холодильная камера

Fig. 4. Solar energy refrigerator: 1 - Generator-absorber of a combined “hot box” design, 2-air condenser, 3-receiver, 4-evaporator, 5-insulating partition, 6- refrigeration chamber

Например, за счет терморегулирующего или соленоидного вентиля при подаче хладагента в испаритель. Уменьшение потерь гидравлических сопротивлений во всасывающих и нагнетательных трубопроводах возможно снизить за счет дополнительных хладопроводящих каналов. В последующие десятилетия реакторы и генераторы-адсорберы стали располагать горизонтально поверхности земли, часто с применением концентраторов солнечной энергии (рис. 5). [4, 8].

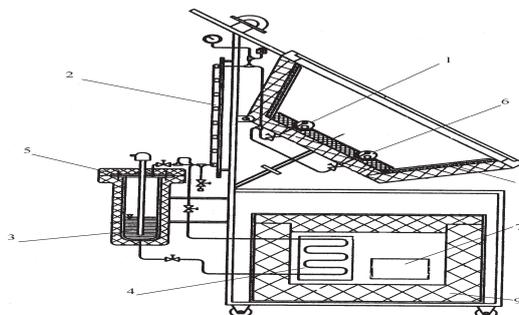


Рис. 5. Гелиоэнергетический холодильник: генератор-адсорбер с селективным покрытием поверхности; 2-конденсатор; 3- ресивер; 4 - испаритель; 5- регулирующие устройства; 6- вспомогательный форгенератор; 7 - емкость со льдом; 8 – зеркальный отражатель; 9 – изоляция
Fig. 5. Solar energy refrigerator: 1-generator-absorber with selective surface coating; 2-condenser; 3- receiver; 4 - evaporator; 5- regulating devices; 6- auxiliary forgenerator; 7 - container with ice; 8 – mirror reflector; 9 - insulation

Такая компоновка в «горячем» ящике позволяет на 30% увеличить дневную энергию обогрева солнцем, так как солнечные лучи облучают поверхность генератора-адсорбера или его реакторов вдоль всей поверхности в течении всего дня.

В последние годы большое внимание уделяется оптимизации геометрических размеров и компоновки элементов конструкции в гелиоприемной части установок. Применение концентраторов солнечной энергии позволяет сфокусировать рассеянную солнечную энергию и направить ее на нагрев конкретной детали элемента конструкции и, следовательно, насыщенной соли в реакторе генератора.

В отличие от криволинейных конструкций концентраторов солнечной энергии, как наиболее сложных в изготовлении, применяют плоские. Многокорпусные конструкции генераторов-адсорберов [9] (рис. 6) снижают конвективные тепловые потоки и потери теплоты при нагревах днем, улучшают охлаждение реакторов ночью.

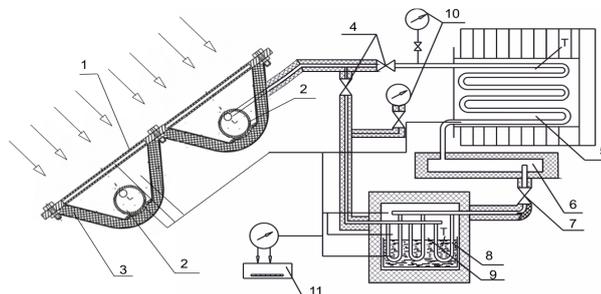


Рис. 6. Гелиоэнергетический термотрансформатор: генератор-абсорбер; реакторы 3- гелиоприемное устройство, 4 – вентиля 3- изоляция, 5 конденсатор, 6-ресивер, 7-регулирующий вентиль, 8-испаритель, 9- охлаждаемая камера, 10-матометры, 11-измеритель температур

Fig. 6. Solar thermal transformer: generator-absorber; reactors 3 - solar receiver, 4 - valves 3 - insulation, 5 condenser, 6 - receiver, 7 - control valve, 8 - evaporator, 9 - cooled chamber, 10 - matometers, 11 - temperature meter

Немалую роль в нагреве поверхности реактора играют и селективные покрытия поверхностей реакторов [10, 11]. В работе [9] исследователям удалось получить значения соотношений основных конструктивных параметров между диаметром трубки реактора и углом раскрытия плоских зеркал концентратора солнечной энергии, при котором лучи солнечной энергии в течении дня при горизонтальном расположении реактора эффективно с максимальным освещением поверхности осуществляют трехкратное освещение.

Так на основании анализа коэффициентов оптико-энергетической концентрации были рассчитаны оптимальные соотношения и геометрические пропорции в конструкции гелиоприемного устройства между цилиндрическим радиусом реактора генератора-абсорбера (R), шириной раскрытия плоских зеркал (W) и фиктивным углом раскрытия (Θ). При рациональной компоновке и трехкратном освещении солнечными лучами соотношения составляют: $(W/2 \cdot R) \div W / (\pi \cdot R) = 3,5$ при угле раскрытия $\Theta = 55$ градусов.

В последние годы значительно увеличилось число работ, связанных с разработкой новых сорбентов для солнечных гелиоэнергетических термотрансформаторов. Разработки ведутся на основе использования новых нанотехнологий, применяя гибридные комбинированные соединения включающие формирование структурной матрицы из активированных углей или вермикулита и элементов щелочноземельных солей, разрабатываются различные графитовые добавки для сухих солей сорбентов, улучшающих их; теплофизические характеристики и пористую структуру материала, увеличивающие цикл работы и долговечность применения.

Разрабатываются новые силикагели и цеолитоподобные алюмофосфаты, активно применяются новые рабочие пары на основе сорбентов силикагеля, цеолита и хладагента – воды, рассматриваются вопросы замены хладагента аммиака метиламином, этиламином, озонобезопасными фреонами [11 - 13].

Вывод. Обзор литературных источников показал возможность дальнейшего развития и внедрения солнцеексплуатирующей холодильной техники на основе сорбционных термотрансформаторов в промышленности и быту.

В своей работе [17] крупный российский ученый – конструктор Калнинь Игорь Мартынович прогнозировал в будущем перспективы развития абсорбционной холодильной техники, делая упор в том числе на теплоиспользующие и солнцеексплуатирующие термотрансформаторы. Достоинство последних в том, что в них возможно не использовать электрическую энергию, производство которой сильно загрязняет атмосферу земли парниковыми газами. В некоторых странах, например, во Франции серийно выпускаются коммерческие бытовые солнцеексплуатирующие холодильники, которые успешно эксплуатируются в северной Африке.

В Российской Федерации регионами, где могут использоваться и эксплуатироваться в

летний период времени подобные установки, являются Астраханская область, Калмыкия, районы Дагестана и Северного Кавказа, Ставропольский, Краснодарский и Приморский края, Хакасия, Крым и другие районы.

Авторы надеются, что данная статья вызовет профессиональный интерес не только ученых исследователей, но и конструкторов, работающих в данном направлении разработки и проектирования образцов инновационной гелиоэнергетической техники, а они обогатят развитие этого направления техники новыми гипотезами и идеями, новыми конструктивными задумками и решениями при разработке новых абсорбционных термотрансформаторных установок.

Библиографический список:

1. Розенфельд Л.М. Холодильные машины //Л.М.Розенфельд, А.Г. Ткачев - 1955. М. Государственное издательство торговой литературы. 584 с.
2. Блиер Б.М. Сухая абсорбционная холодильная установка для сепараторных пунктов//Холодильное дело 1932.№2. С. 18-20
3. Буффингтон Р.М. Абсорбционное охлаждение с твердыми абсорбентами //Холодильное дело 1933. №6. С.34-28.
4. М.Ф. Руденко, Ю.В.Шипулина. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия: монография/ Астрахан.гос.техн.ун-т.-Астрахань: Изд-во АГТУ, 2013. 172 с.
5. Б.М. Ачилов, Ч. Мангалжалав. Холодильная установка с твердым сорбентом// Холодильная техника. 1990. №2. С.5-7
6. А.С. СССР №1983 Захидов Р.А., Шадиев С.,Киргизбаев Д.А.Ачилов Б.М. Генератор-адсорбер гелиохолодильника
7. Генератор-адсорбер гелиохолодильника: патент 2137991 Рос.Федерация. № 98100862/06 / Руденко М.Ф., Альземьеньев А.В., Анихуви Жак Анри Джиджохе, Черкасов В.И., Макеев П.А.; заявл.05.01.98 ; опубл. 20.09.99, Бюл.№ 26. 4с.
8. М.Ф. Руденко, Ю.В.Шипулина, М.Ш.Каримов, А.М.Руденко. Повышение эффективности работы гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа// Вестник Дагестанского технического университета. Технические науки, 2019 С.№ 46(4). С.32-41
9. М.Ш.Каримов, М.Ф.Руденко, Ю.В.Шипулина. Повышение эффективности гелиоэнергетического адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора// Химическое инефтегазовое машиностроение 2016.№ 3.С.31—35.
10. Электролит для черного оксидирования. стали: патент 2287613 Рос.Федерация. № 2005103442/02 / Кравцов Е.Е., Руденко М.Ф., Сурков М.И., Гомоненко О.И., Балахонова К.С., Скрипниченко С.П., Кириченко В.И., Шенбор М.И., Янченкова Т.А.; заявл. 20.07.2006 ; опубл. 20.11.2006 Бюл.№32. 3с.
11. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь: патент 2365676 Рос.Федерация. № 2008130824/02 / Долецкая К.А., Кравцов Е.Е., Горская А.С., Мифтахова Г.Ф., Руденко М.Ф., Сурков М.И., Кириченко В.И., Шнбор М.И., Огородникова Н.П., Кондратенко Т.С.; заявл. 25.07.2008 ; опубл. 27.08.2009, Бюл.№24. 4
12. G.C. Tubreoumya, E.S. Tiendrebeogo, O. Bailou, T. Dabilgou, B. Zeghmati, A.O. Dissa, J. Koulidiati, A. Bere. Effect of Adsorbent/Adsorbate Couple on the Performance of Adsorption Solar Refrigerator / Engineering, 2022;14(3): 95-112.https://www.scirp.org/pdf/eng_2022031816273172.pdf
13. S. Wu Wang, T.X. Li a, T. Yan b, R.Z. Experimental investigation on a thermochemical sorption refrigeration prototype using EG/SrCl₂-NH₃ working pair. *Refrigeration* 2018; 88:8-15 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014070071730484X>
14. Ch.Denzinger,G.Berkemeier,O.Winter,MToward sustainable refrigeration systems: Life cycle assessment of a bench-scale solar-thermal adsorption refrigeratorVers des systèmes frigorifiques durables : analyse du cycle de vie d'un réfrigérateur à adsorption solaire-thermique à l'échelle du banc d'essai/ Worsham,C. Labrador, K.Willard,A. Altaher,Ja. Schuleter,A.Ciric. *Inter.Journal of Refrigeration* January 2021;121:105-113.
15. Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabsiMohammed El Ganaoui. Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A casestudy for indigenous fruits preservation. *Case Studies in Thermal Engineering*, December 2022; 40: 102472 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>
16. Y. Yu, Q. W. Pan, L. W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020; 14:328–336 (2020) <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
17. Калнинь И.М. Что ждет холодильную технику в XXI веке. Холодильная техника. 2002.№ 4. С.2-5.

References

1. L.M. Rosenfeld, A.G. Tkachev. Refrigerating machines M. State Publishing House of Trade Literature. 1955; 584 (In Russ).
2. Blier B.M. Dry absorption refrigeration unit for separator points. *Refrigeration business* 1932; 2:18-20 (In Russ).

3. Buffington R.M. Absorption cooling with solid absorbents. *Refrigeration business* 1933;6:28-34 (In Russ).
4. M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina. Solar-energy thermal transformers of “dry” absorption of cyclic action: monograph. Astrakhan State Technical University. Astrakhan: Publishing house ASTU, 2013;172. (In Russ).
5. B.M. Achilov, Ch. Mangalgalav. Refrigeration unit with solid sorbent. *Refrigeration equipment*. 1990;2:5-7(In Russ).
6. A.C. USSR №1983 Zahidov R.A., Shadiev S, Kirgisbaev D.A., Achilov B.M. Generator-adsorber of the solar cooler(In Russ).
7. Generator-adsorber of the solar cooler: patent 2137991 Russian Federation № 98100862/06 / Rudenko M.F., Alzemenev A.V., Anihuvi Jacques Henri Gijohe, Cherkasov V.I., Makeev P.A. application.05.01.98 ; publ. 09/20/99;26:4. (In Russ).
8. M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, A.M. Rudenko. Improving the efficiency of solar-energy refrigeration units of the adsorption type. *Herald of Daghestan Technical University. Technical Sciences*, 2019; 46(4):32-41 (In Russ).
9. M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina Improving the efficiency of the solar energy adsorption solar energy thermal transformer. *Chemical and oil and gas engineering*. 2016; 3:31-35. (In Russ).
10. Electrolyte for black oxidation. Steel: Patent 2287613 Russian Federation. № 2005103442/02 / Kravtsov E.E., Rudenko M.F., Surkov M.I., Gomonenko O.I., Balahonova K.S., Skripnichenko S.P., Kirichenko V.I., Shenbor M.I., Yanchenkova T.A.; application. 20.07.2006 ; publ. 20.11.2006; 32:3. (In Russ).
11. Electrolyte for deposition of black anticorrosive oxide coatings on steel: Patent 2365676 Russian Federation. № 2008130824/02 / Doletskaya K.A., Kravtsov E.E., Gorskaya A.S., Miftakhova G.F., Rudenko M.F., Surkov M.I., Kirichenko V.I., Shnbor M.I., Ogorodnikova N.P., Kondratenko T.S.; application. 25.07.2008 ; publ. 27.08.2009;24:4 (In Russ).
12. G.C. Tubreoumya, E.S. Tiendrebeogo, O. Bailou, T. Dabilgou, B. Zeghmati, A.O. Dissa, J. Koulidiati, A. Bere. Effect of Adsorbent/Adsorbate Couple on the Performance of Adsorption Solar Refrigerator / *Engineering*, 2022;14(3): 95-112.https://www.scirp.org/pdf/eng_2022031816273172.pdf
13. S. Wu Wang, T.X. Li a, T. Yan b, R.Z. Experimental investigation on a thermochemical sorption refrigeration prototype using EG/SrCl₂-NH₃ working pair. *Refrigerazione* 2018; 88:8-15 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014070071730484X>
14. Ch.Denzinger,G.Berkemeier,O.Winter,MToward sustainable refrigeration systems: Life cycle assessment of a bench-scale solar-thermal adsorption refrigeratorVers des systèmes frigorifiques durables : analyse du cycle de vie d’un réfrigérateur à adsorption solaire-thermique à l’échelle du banc d’essai/ Worsham,C. Labrador,K. Willard,A. Altaher,Ja. Schuleter,A.Ciric. *Inter.Journal of Refrigeration* January 2021;121:105-113.
15. Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabsiMohammed El Ganaoui. Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A casestudy for indigenous fruits preservation. *Case Studies in Thermal Engineering*, December 2022; 40: 102472 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>
16. Y. Yu, Q. W. Pan, L. W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020; 14:328–336 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
17. Kalnin I.M. What awaits refrigeration equipment in the XX1 century. *Refrigeration equipment*. 2002;4:2-5.

Сведения об авторах.

Руденко Михаил Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; m.f.rudenko@mail.ru

Шипулина Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; aleera78@mail.ru

Саинова Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; sainovav@yandex.ru

Information about the authors.

Mikhail F. Rudenko, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof., Department of Life Safety and Engineering Ecology; m.f.rudenko@mail.ru

Yulia V. Shipulina, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Assoc.Prof., Department of Life Safety and Engineering Ecology; aleera78@mail.ru

Victoria N. Sainova, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of the Department of Life Safety and Engineering Ecology; lsainovav@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.05.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reved 25.06.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 25.06.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004. 57.087.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-46 -56



Оригинальная статья/Original article

Использование биометрических данных для защиты информации

К.Н. Власов¹, О.В. Толстых¹, О.В. Исаев²

¹Воронежский институт МВД России,

¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²Воронежский институт ФСИН России,

¹394072, г. Воронеж, ул. Иркутская 1А, Россия

Резюме. Цель. Актуальной задачей является оценка системы защиты доступа к информации с минимизацией ошибок, на основе использования биометрических данных человека. Необходимо оценить и сравнить методы и решения биометрической аутентификации, возможности их комбинирования. **Метод.** Метод оценки и сравнения способов и решений биометрической аутентификации основывается на практическом опыте и нормативно-технической документации по использованию биометрических данных в целях защиты информации. Необходимо усложнить возможность несанкционированного доступа к информации. Вместе с тем, совершенствование системы не должно ухудшать комфорт легитимного пользователя при попытке доступа. Остаются задачи уменьшения времени входа и упрощения системы. **Результат.** Проведена оценка методов и решений биометрической аутентификации и предложено решение по разработке систем биометрической аутентификации для защиты от несанкционированного доступа, ключевыми критериями в которых выбраны сложность взлома, комфорт пользователя, время входа и упрощение системы. **Вывод.** Оптимальным решением в разработке систем биометрической аутентификации будет использование многофакторной аутентификацией с использованием динамических параметров субъекта доступа. Современную систему биометрической аутентификации следует устанавливать с учетом требуемого на данный момент уровня безопасности.

Ключевые слова: биометрия, биометрические данные, защита информации, аутентификация, подлинность личности, индивидуальные характеристики личности.

Для цитирования: К.Н. Власов, О.В. Толстых, О.В. Исаев. Использование биометрических данных для защиты информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):46-56. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-46-56

Using biometric data to protect information

K.N. Vlasov¹, O.V. Tolstykh¹, O.V. Isaev²

¹Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

¹53 Patriotov St., Voronezh 394065, Russia,

²Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia,

²1A Irkutskaya St., Voronezh 394072, Russia

Abstract. Objective. An urgent task is to evaluate the system for protecting access to information while minimizing errors, based on the use of human biometric data. It is necessary to evaluate and compare methods and solutions of biometric authentication, and the possibility of combining them. **Method.** The method for assessing and comparing biometric authentication methods and solutions is based on practical experience and regulatory and technical documentation on the use of biometric data for information security purposes. It is necessary to complicate the possibility of unauthorized access to information. At the same time, improving the system should not worsen the comfort of a legitimate user when trying to access. The remaining tasks are to reduce

entry time and simplify the system. **Result.** An assessment of biometric authentication methods and solutions was carried out and a solution was proposed for the development of biometric authentication systems to protect against unauthorized access, the key criteria in which were the complexity of hacking, user comfort, login time and simplification of the system. **Conclusion.** The optimal solution in the development of biometric authentication systems would be to use multi-factor authentication using dynamic parameters of the access subject. A modern biometric authentication system should be installed taking into account the level of security required at the time.

Keywords: biometrics, biometric data, information security, authentication, identity authenticity, individual characteristics of a person.

For citation: K.N. Vlasov, O.V. Tolstykh, O.V. Isaev. The use of biometric data to protect information. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (3): 46-56. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-3-46-56

Введение. В современном мире не так трудно представить биометрические системы защиты. Появились, развиваются и используются средства доступа в информационные системы, идентификация и аутентификация пользователей и др. Есть возможность по отпечатку пальца разблокировать смартфон, голосовой помощник Siri у iPhone может узнать своего владельца по голосу. Именно процесс проверки подлинности субъекта доступа по предъявлению им своих биометрических данных называется биометрической аутентификацией. Если говорить о биометрических данных, как о средстве обеспечения безопасности, то использование такой системы защиты помогает бороться с терроризмом, кибертерроризмом и рядом других угроз. Большая стоимость биометрических систем защиты заставляет задуматься о внедрении их в повседневную жизнь человека в полном объеме. К тому же, неуязвимость таких систем куда ниже, чем о ней заявляют. Но биометрические технологии, в частности определение личности человека по биометрическим данным, стали развиваться очень быстро за последние десятки лет.

Постановка задачи. В России пока только происходит развитие в направлении биометрических систем идентификации и аутентификации, но решительные шаги уже сделаны. Большое количество российских компаний пытается сейчас развивать биометрические технологии. В частности, это касается защиты информации от несанкционированного доступа в системы различных ведомств. Поэтому актуальной задачей остается разработка технологий, которые способны быстро и эффективно разграничить доступ. К таким технологиям будет относиться биометрическая аутентификация. Она характеризуется не только контролем доступа, но и контролем функционального состояния пользователя, а также простой внедрения и реализации.

Методы исследования. Метод оценки и сравнения способов и решений биометрической аутентификации основывается на практическом опыте и нормативно-технической документации по использованию биометрических данных в целях защиты информации.

Обсуждение результатов. Летом 2018 года Банк России и ПАО «Ростелеком» пустили в ход Единую биометрическую систему, благодаря чему, гражданам стало проще пользоваться услугами банков из-за удаленной идентификации.

Работа такой системы руководствуется Федеральным законом от 27 июля 2006 г. №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», а также Постановлением Правительства РФ от 16 июня 2022 г. №1089 «Об утверждении Положения о единой информационной системе персональных данных, обеспечивающей обработку, включая сбор и хранение, биометрических персональных данных, их проверку и передачу информации о степени их соответствия предоставленным биометрическим персональным данным физического лица».

В России на фоне пандемии COVID-19 наибольшее распространение получили

системы биометрической идентификации и аутентификации. Пандемия создала направление на дистанционные и бесконтактные технологии. Так в 2021 на всех станциях метро Москвы была запущена технология FacePay – платежная система, при помощи которой граждане могут оплачивать свои билеты около турникетов, оснащенных «умными камерами». Система может идентифицировать лица, даже которые закрыты медицинскими масками, но не более чем на 60%. Поэтому прогресс в области развития биометрических механизмов идентификации и аутентификации не стоит на месте.

Стоит отметить и статистические данные развития рынка биометрии в России по сравнению с мировым рынком. Эксперты утверждают, что темпы роста российских биометрических технологий опережают темпы роста мирового рынка в 1,5 раза. График сравнения предоставлен на рис. 1.



Рис. 1. Темпы увеличения мирового и отечественного рынков биометрии
Fig. 1. The growth rates of the global and domestic biometrics markets

За последние восемь лет доля России на рынке биометрии существенно увеличилась, что говорит о сохранении тенденции роста по сравнению с 2014 годом в 1,8 раз (рис. 2).

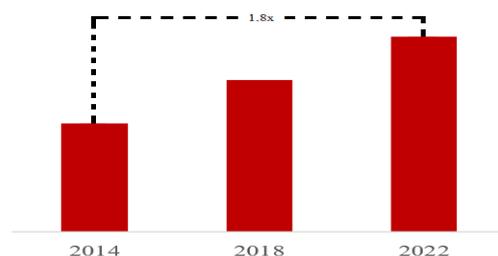


Рис.2. Доля России в общемировом рынке биометрии
Fig.2. Russia's share in the global biometrics market

К концу 2022 года был подписан закон о единой системе биометрических данных. Развитие биометрии в России стало настолько быстрым, отчего в законодательстве стали появляться пробелы, в частности это касается сбора и хранения биометрических данных. Федеральный закон от 29 декабря 2022 года №572-ФЗ «Об осуществлении идентификации и (или) аутентификации физических лиц с использованием биометрических персональных данных, о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации» устанавливает разработку видов биометрии таких как изображение лица и образец голоса. Однако существующие механизмы предусматривают более широкий спектр возможностей анализа биометрических характеристик, которые не указываются в данном законе, но в дальнейшем могут быть использованы в государственных организациях. Исходя из ГОСТ Р 52633.0-2006. «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации», нам известно, что в значительной степени используют следующие биометрические механизмы:

- анализ кровеносных сосудов глазного дна и радужной оболочки глаза;
- двухмерный и трехмерный анализы геометрических особенностей лица в видимом и инфракрасном спектрах света;
- анализ особенностей геометрии ушных раковин и особенностей голоса;
- анализ особенностей папиллярных рисунков пальцев;

- анализ геометрии ладони, включая рисунки складок кожи ладони и папиллярные рисунки различных фрагментов кожи ладони;
- анализ рисунка кровеносных сосудов, складок кожи тыльной стороны ладони;
- анализ рукописного почерка и клавиатурного почерка;
- анализ геометрических соотношений частей тела;
- анализ особенностей походки.

Таким образом, отличительные характеристики на основе анализа биометрических механизмов можно классифицировать на статические и динамические, которые характеризуются рядом свойств. Для определения качества работы биометрической системы руководствуются следующей нормативной документацией:

- ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура»;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-2–2008 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 2. Методы проведения технологического и сценарного испытаний»;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19795-3–2009 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 3. Особенности проведения испытаний при различных биометрических модальностях»;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-4–2011 «Информационные технологии. Биометрия. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 4. Испытания на совместимость»;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-6–2015 «Информационные технологии. Биометрия. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 6. Методология проведения оперативных испытаний».

Говоря о биометрии в качестве средства аутентификации, стоит отметить что такое средство способно принимать высоконадежное решение, которое включает в себя преобразование биометрических данных в векторы биометрических параметров огромной размерности, криптографическую аутентификацию, а также преобразователь «биометрия-код». Несомненно, инструменты биометрической аутентификации высокой надежности проходят тестирования для доверия, которые подтверждаются сертификационными документами. Такие тестирования закреплены в следующих нормативных документах:

- ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации;
- ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации;
- ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.

Говоря о биометрии, подразумевая ее как способ защиты информации, мы можем назвать ее наукой, позволяющей проводить процесс идентификации и аутентификации личности по анатомическим или поведенческим отличительным характеристикам.

Биометрическая аутентификация – это процесс доказательства и контроль подлинности идентификатора, предъявленного субъектом доступа. Методы биометрической аутентификации подразделяют на такие виды, как статические и динамические (рис. 3). Статические биометрические характеристики человек приобретает к своему рождению. Лишь малая часть из них будет меняться в течение жизни. Большинство характеристик, которые неизменны, могут с успехом использоваться для аутентификации личности человека. Статическими их называют потому что при измерении таких характеристик, они не будут изменяться и к тому же они независимы по времени. Но бывают ошибки, например, относительное смещение аутентификатора и измерителя. Поэтому, чтобы зарегистрировать личность, измерения проводят не один раз. Это

способствует нейтрализации ошибок.

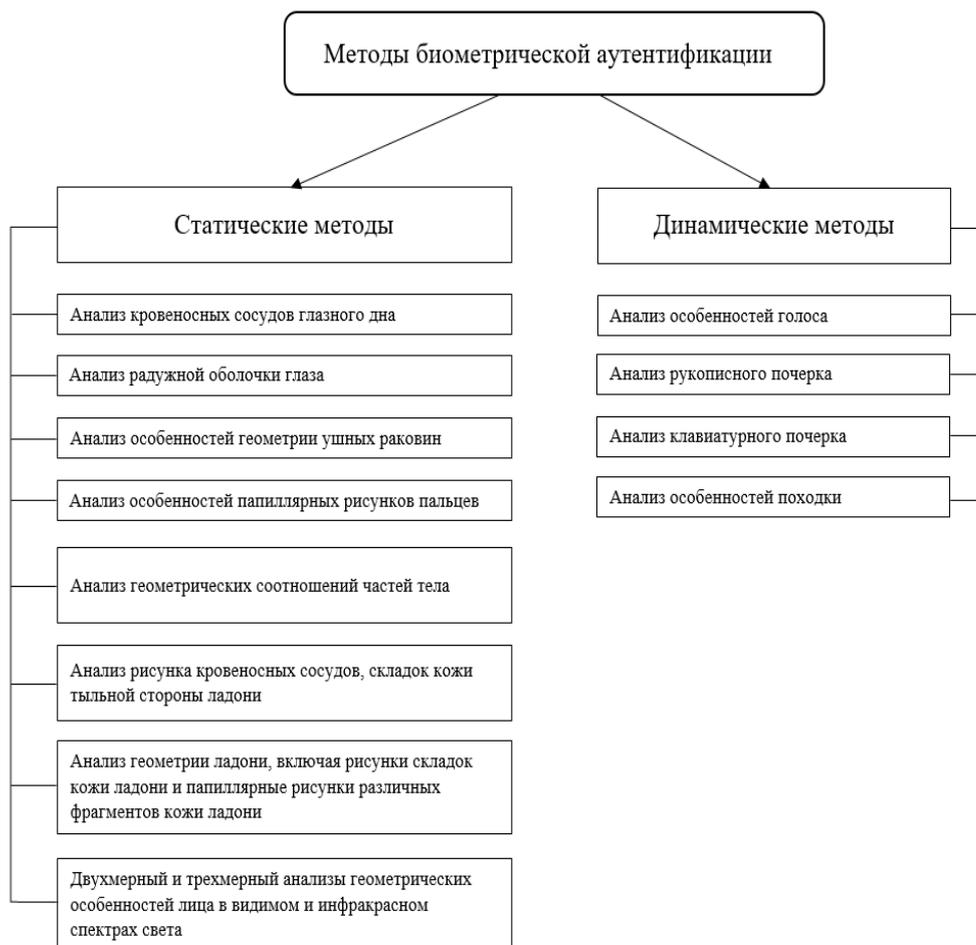


Рис. 3. Методы биометрической аутентификация

Fig. 3. Biometric authentication methods

Несомненно, у статического метода биометрической аутентификации присутствуют свои преимущества и недостатки. К положительным характеристикам статического вида стоит отнести: удобство снятия характеристик; сжатость машинных наборов высокого качества (эталонов) биометрических характеристик; для прохождения различных процедур персоналом требуется небольшое количество затрат; возможность использования систем биометрической аутентификации при больших потоках людей; психофизическое состояние человека не влияет на результат.

Недостатки статических методов: биометрические признаки открыты, поэтому существует вероятность их фальсификации; оборудование дорогостоящее, так как используются технологии высокого качества; значительное количество людей, негативно относящихся к обработке своих биометрических данных.

Индивидуальные подсознательные движения, заученные человеком, могут успешно использоваться в динамических методах аутентификации. Такие характеристики зависимы во времени. Это учитывается, когда данные измеряются, обрабатываются и хранятся. Для получения поведенческих характеристик следует проходить специальную процедуру, обусловленную динамическим характером:

1. Так как характеристики зависимы от времени, то нужно проводить измерение в определенный отрезок времени.

2. Данные при измерениях могут быть разные, поэтому следует при регистрации личности проводить измерения ни один раз. Это способствует получению усредненного образа.

Как и со статическими методами обращается внимание на преимущества и недостатки.

Во-первых, низкая стоимость биометрических систем для считывания динамических характеристик говорит о том, что не обязательно использование дорогостоящего оборудования. Такие системы могут быть реализованы на клавиатуре, микрофоне, графических планшетах и т.д. Затраты при создании системы будут зависеть от разработки программного обеспечения для считывания характеристик.

Во-вторых, эталон биометрических характеристик личности хранится только у самого субъекта доступа в тайне. Дополнительно эталон возможно сменить, например, при изменении парольной фразы. Сравнимая виды методов биометрической аутентификации, статические характеристики даны человеку раз и навсегда, поэтому нет возможности их изменить или же хранить в тайне.

Говоря о недостатках динамических параметров, отметим, что работа биометрической системы зависит от психофизического состояния человека (заболевания, стрессовое состояние и т.п.). Но в некоторых случаях использование зависимости от психофизического состояние может быть использовано с пользой. К примеру, допуск людей к деятельности, где цена ошибки очень велика. Ведь отклонение психофизического состояния человека от нормы могут привести человека к неправомерным поступкам. Положительным эффектом может использоваться выявление таких людей, так как даже легальный пользователь склонен к совершению правонарушений. Чтобы достоверно оценить и сравнить использование биометрических методов аутентификации и их комбинаций, необходимо разобраться в каждом конкретном методе.

Статические методы характеризуют восемь параметров: кровеносные сосуды глазного дна; радужная оболочка глаза; двухмерная и трехмерная геометрические особенности лица в видимом и инфракрасном спектрах света; особенности геометрии ушных раковин; особенности папиллярных рисунков пальцев; геометрия ладони, включая рисунки складок кожи ладони и папиллярные рисунки различных фрагментов кожи ладони; рисунок кровеносных сосудов, складок кожи тыльной стороны ладони; соотношения частей тела в геометрии. Применять его следует исходя из зависимостей поставленных целей и задач. Учтём, что наиболее популярным остается анализ геометрии лица. Менее популярным является анализ сосудов глазного дна. Для наглядности, данные биометрической аутентификации по статическим признакам приведем в сравнительной табл. 1.

Таблица 1. Соотношение характеристик различных методов биометрической аутентификации по статическим характеристикам

Table 1. The ratio of the characteristics of various methods of biometric authentication by static characteristics

	Сетчатка	Радужная оболочка	Геометрия лица	Геометрия ушных раковин	Отпечаток пальца	Ладонь	Тыльная сторона ладони	Геометрия соотношения частей тела
Неизменность характеристики	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая
Чувствительность к влиянию внешних факторов	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Скорость аутентификации	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Комфорт пользователя	Низкий	Высокий	Высокий	Высокий	Средний	Средний	Средний	Высокий
Стоимость	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая
Вероятность фальсификации	Невозможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна	Возможна

Второй метод биометрической аутентификации пользователя – динамический. К нему относят следующие параметры: клавиатурный почерк; рукописный почерк; особенности голоса; особенности походки. Неизменность характеристик для всех видов остается низкой, так как динамические методы характеризуются поведением человека при аутентификации, которое не может быть неизменным. Сравнивая динамические способы биометрической аутентификации, составим характеристику для каждого и приведем её в табл. 2.

Таблица 2. Соотношение характеристик различных методов биометрической аутентификации по динамическим характеристикам

Table 2. The ratio of the characteristics of various methods of biometric authentication by dynamic characteristics

	Голос	Рукописный почерк	Клавиатурный почерк	Походка
Чувствительность к влиянию внешних факторов	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Скорость аутентификации	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Комфорт пользователя	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий
Стоимость	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая
Вероятность фальсификации	Возможна	Невозможна	Невозможна	Невозможна

Исходя из описания методов биометрической аутентификации по динамическим характеристикам, можно сделать вывод о том, что при использовании систем аутентификации с данными технологиями стоит учитывать поставленные задачи.

Нет особого требования устанавливать дорогостоящее оборудование, если информация и доступ к ней не относятся к высоким классам защиты. К тому же использование данных методов ориентируется на программном обеспечении, которое в свою очередь может быть разработано самой компанией или организацией, где используется биометрическая аутентификация. К перспективному признаку относится клавиатурный почерк пользователя. Характеристики анализа клавиатурного почерка в биометрической аутентификации являются наиболее оптимальными для защиты информации в различных сферах деятельности человека. Если понимать, как использовать биометрическую аутентификацию в целях защиты систем от несанкционированного доступа и сохранения информации секретной, то, определенно, решение будет заключаться в подключении сразу нескольких методов. Такой выбор считается более надежным, так как для попытки фальсификации для каждого показателя в системе правонарушитель должен подделать несколько характеристик. Объединение в системе биометрической аутентификации нескольких показателей называется комбинированным решением или мультимодальным. Такое решение для систем повышает надежность защиты информации. Способы объединения представлены на рис. 4.



Рис. 4. Способы объединения нескольких признаков для биометрической аутентификации

Fig. 4. Ways to combine several marks for biometric authentication

Следует учесть критерий, когда выбор способа объединения систем в конечном итоге вынужден сводить к минимуму пропорциональность количества вероятных ошибок ко вре-

мени одной проверки подлинности. Исследования банков приводит статистику, где показывается, что использование комбинированных решений в системах биометрической аутентификации намного эффективнее одиночных. Сравнив использование технологий аутентификации по лицу, далее по голосу, а в конечном итоге скомбинировав эти методы, получили вывод об эффективности в 93%, 95%, почти 100% соответственно.

Однако использование большего количества считывателей параметров в системе не всегда приводит к лучшему результату. Это связано с появлением ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода выражаются, когда система принимает «своего» за «чужого». Появляется так называемый «ложный отказ». И ошибки второго рода, когда, наоборот, происходит возникновение «ложного доступа», система принимает «чужого» за «своего». Большое количество методов биометрической аутентификации может привести к частому появлению ошибок первого рода. Вероятности ложного доступа и ложного отказа представлены на рис. 5.

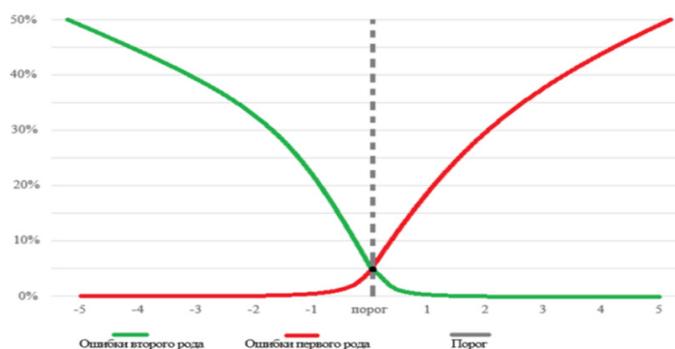


Рис. 5. График вероятности ошибок первого рода и ошибок второго рода

Fig. 5. Graph of probability of errors of the first kind and errors of the second kind

Общий процент эффективности будет снижаться при увеличении числа используемых методов. Если вероятность верного решения одного метода умножится с вероятностью другого, тогда вырастет вероятность ошибки первого рода. Существуют и многофакторные системы аутентификации, когда использование биометрии сочетается с использованием пароля или электронного ключа. Такое решение отличается меньшими затратами на считыватели биометрических характеристик.

Например, если использовать электронный ключ для доступа к информации, при этом система биометрической аутентификации будет узнавать вас по лицу, то защита информации не только будет более защищена, но и вероятность ошибок снизится.

По данным исследований больше пользователей выбирают двухфакторную аутентификацию по принципу «пароль + клавиатурный почерк» (рис. 6).



Рис. 6. Диаграмма, характеризующая предпочтения пользователей в биометрии

Fig. 6. Diagram describing user preferences in biometrics

Стоит согласиться с мнением большинства. Низкая стоимость биометрической системы, при этом ее высокая надежность, скорость и комфорт составляют значительное

доверие. При этом пароль, составленный пользователем, позволяет иметь доступ только правомерному субъекту доступа. Использование такого метода очень удобно, поскольку он позволяет сократить время аутентификации до времени обычного ввода парольной фразы, при этом система скрытно определит, что точно ли легитимный пользователь вводит пароль и выведет решение о правомерности доступа к информации.

Вывод. Таким образом, исходя из целей систем безопасности, в которые включены технологии биометрической аутентификации, мы полагаем, что необходимо усложнить возможность несанкционированного доступа к информации. Вместе с тем, совершенствование системы не должно ухудшать комфорт легитимного пользователя при попытке доступа. Остаются задачи уменьшения времени входа и упрощения системы.

Если поставленные задачи решены, то система биометрической аутентификации будет иметь лучшие показатели для субъектов доступа. Учтем и то, что с совершенствованием технологий для защиты информации, появляются и технологии для совершения атак злоумышленниками. Поэтому решение при использовании систем биометрической аутентификации должно включать реагирование на попытку взлома.

Исследование всех параметров, на которые стоит взглянуть, показывает, что оптимальным решением в разработке систем биометрической аутентификации будет использование многофакторной аутентификацией с использованием динамических параметров субъекта доступа. Поведенческие характеристики человека практически невозможно фальсифицировать, при этом низкая стоимость оборудования по сравнению с оборудованием для считывания статических характеристик выделяет в лучшую сторону метод динамической биометрии. К тому же вероятность ошибок по сравнению с комбинированными решениями ниже. Также комбинированные решения требуют больше времени для считывания биометрических характеристик человека, а это усложняет систему.

Пользователям, компаниям и организациям сложно сделать однозначный вывод о том, какое решение для систем биометрической аутентификации использовать для контроля доступа к информации из расчета соотношения цены и качества. Высокая стоимость комбинированных решений, слабая стойкость к фальсификации систем аутентификации по одному биометрическому показателю заставляют задуматься о выборе. Стоит учитывать какую информацию необходимо защищать. Иногда защищаемая информация требует самой сложной защиты, и тогда отпадает вопрос о затратах на необходимое оборудование.

Современную систему биометрической аутентификации следует устанавливать с учетом требуемого на данный момент уровня безопасности. К тому же, не стоит забывать о включении новых методов в будущем. Ведь прогресс не стоит на месте, и развитие биометрии как в мире, так и в России показывает на появление вероятности использования своего образа для подтверждения своей же личности. Возможно в скором времени нам больше не нужно использовать ключи, паспорта, водительские удостоверения, карты.

Библиографический список:

1. Об информации, информационных технологиях и о защите информации. Федеральный закон от 27.07.2006г., №149-ФЗ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/
2. О персональных данных. Федеральный закон от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/
3. Об осуществлении идентификации и (или) аутентификации физических лиц с использованием биометрических персональных данных, о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации. Федеральный закон от 29.12.2022 г. № 572-ФЗ / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436110/
4. Об утверждении Положения о единой информационной системе персональных данных, обеспечивающей обработку, включая сбор и хранение, биометрических персональных данных, их проверку и передачу информации о степени их соответствия предоставленным биометрическим персональным данным физического лица. Постановление Правительства РФ от 16 июня 2022 г. № 1089 / [Электрон.ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404747823/>
5. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения // М.: Федеральное

- агентство по техническому регулированию и метрологии. 2008. – 7 с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200058320>
6. ГОСТ Р 52633.0–2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. 2007. – 19с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200048922>
 7. ГОСТ Р 52633.1–2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. 2010. – 19с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200079555>
 8. ГОСТ Р 52633.2–2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. 2018. – 18с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200081163>
 9. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. 2018. – 11с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200088765>
 10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура. 2019. – 50с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200067413>
 11. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-2–2008. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 2. Методы проведения технологического и сценарного испытаний. 2009. – 42с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200073050>
 12. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 19795-3–2009. Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 3. Особенности проведения испытаний при различных биометрических модальностях. 2010. – 23с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200075111>
 13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-4–2011. Информационные технологии. Биометрия. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 4. Испытания на совместимость. 2012. – 49с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200087807>
 14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-6–2015. Информационные технологии. Биометрия. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 6. Методология проведения оперативных испытаний. 2016. – 27с / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200122961>
 15. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения.
 16. Брюхомицкий Ю.А. Биометрические технологии идентификации личности; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 263 с.
 17. Иванов А. И. Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации личности М. : Радиотехника, 2004. – 143 с.
 18. Мартынова Л. Е. Исследование и сравнительный анализ методов аутентификации. // Молодой ученый. – 2016. – № 19. – С. 90–93.
 19. Биометрические системы / Журнал для руководителей и специалистов в области безопасности Secutek // Системы безопасности – 2019. – №2. – С. 126.
 20. Фэйспасс. Журнал для руководителей и специалистов в области безопасности Secutek // Системы безопасности – 2022. – №3. – С. 134.
 21. Размещение биометрии в единой биометрической системе (ЕБС) / Журнал «Информационная безопасность» // Информационная безопасность itsec – 2022. – №4. – С. 56.

References

1. On Information, Information Technologies and Information Protection Federal law No 149-FL dated 27.07.2006/ [Electron. Res.] Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61798/ (In Russ).
2. On Personal Data Federal law No 152-FL dated 27.07.2006 / [Electronic resource]. Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (In Russ).
3. On the Identification and (or) Authentication of Individuals Using Biometric Personal Data, on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation and Invalidation of Certain Provisions of Legislative Acts of the Russian Federation. Federal Law No 572-FL dated 29.12.2022 / [Electronic resource]. Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436110/ (In Russ).
4. On Approval of the Regulations on the Unified Personal Data Information System that Ensures the Processing, including Collection and Storage, of Biometric Personal Data, their Verification and Transmission of information on the Degree of their Compliance with the Provided Biometric Personal data of an Individual.

- Decree of the Government of the Russian Federation No 1089 dated 16.06.2022 / [Electronic resource]. Access mode: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404747823/> (In Russ).
5. GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definitions // Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 2008;7./[Electronic resource].Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200058320> (In Russ).
 6. GOST R 52633.0-2006. Information protection. Information security techniques. Requirements for highly reliable biometric authentication tools. 2007;19/[Electronic resource].Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200048922> (In Russ).
 7. GOST R 52633.1-2009. Information protection. Information security techniques. Requirements for the formation of databases of natural biometric images intended for testing highly reliable biometric authentication tools. 2010; 19. [Electron. Res.]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200079555> (In Russ).
 8. GOST R 52633.2-2010. Information protection. Information security techniques. Requirements for the formation of synthetic biometric images intended for testing highly reliable biometric authentication tools. 2018; 18. / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200081163> (In Russ).
 9. GOST R 52633.3-2011. Information protection. Information security techniques. Testing the resistance of highly reliable biometric protection tools to selection attacks. 2018; 11. / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200088765> (In Russ).
 10. GOST R ISO/IEC 19795-1-2007. Automatic identification. Biometric identification. Operational tests and test reports in biometrics. Part 1. Principles and structure. 2019; 50. / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200067413> (In Russ).
 11. GOST R ISO/IEC 19795-2-2008. Automatic identification. Biometric identification. Operational tests and test reports in biometrics. Part 2. Methods of technological and scenario testing. 2009; 42. / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200073050> (In Russ).
 12. GOST R ISO/IEC TO 19795-3-2009. Automatic identification. Biometric identification. Operational tests and test reports in biometrics. Part 3. Features of testing with various biometric modalities. 2010; 23. / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200075111> (In Russ).
 13. GOST R ISO/IEC 19795-4-2011. Information technology. Biometrics. Operational tests and test reports in biometrics. Part 4. Compatibility tests. 2012;49./[Electronic resource].Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200087807> (In Russ).
 14. GOST R ISO/IEC 19795-6-2015. Information technology. Biometrics. Operational tests and test reports in biometrics. Part 6. Methodology of operational tests. 2016; 27/[Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200122961> (In Russ).
 15. FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions. (In Russ).
 16. Bryukhomitsky Y.A. Biometric technologies of identity identification; Southern Federal University. Rostov-on-Don : Southern Federal University Press, 2017; 263. (In Russ).
 17. Ivanov A. I. Neural network algorithms of biometric identification of personality. Moscow: Radio Engineering, 2004; 143. (In Russ).
 18. Martynova L. E. Research and comparative analysis of authentication methods. *Young Scientist*. 2016;19: 90-93. (In Russ).
 19. Biometric systems / Journal for managers and security specialists Secutek. *Security systems*. 2019; 2:126. (In Russ).
 20. Facepass. *Journal for managers and security specialists Secutek. Security systems*. 2022; 3: 134. (In Russ).
 21. Placement of biometrics in the unified biometric system (UBS). *Journal "Information Security" Information security itsec* 2022;4: 56. (In Russ).

Сведения об авторах:

Власов Константин Николаевич, командир отделения; vlasikko@yandex.ru

Толстых Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга; tov48@mail.ru

Исаев Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры технических комплексов охраны и связи; olegisaev71@mail.ru

Information about authors:

Konstantin N. Vlasov, Section Commander; vlasikko@gmail.com

Olga V. Tolstykh, Cand. Sci. (Eng), Assoc Prof., Department of Radio Engineering Systems and Security Monitoring Complexes; tov48@mail.ru

Oleg V. Isaev, Cand. Sci. (Eng), Assoc Prof., Senior teacher of the Department of technical complexes of safety and communication; olegisaev71@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 06.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 12.07.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 12.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-57-65



Оригинальная статья /Original article

**Рекомендации по применению методики оценки защищённости
автоматизированной системы управления критической информационной
инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования
методом Монте-Карло**

В.А. Воеводин, В.С. Черняев, И.В. Виноградов

Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»,

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак. Данная методика позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР), получить оценку риска подверженности вычислительной сети (ВС) DDoS-атакам и принять необходимые меры для снижения уровня риска реализации угрозы воздействия DDoS-атак. **Метод.** Для достижения заявленной цели исследования использовалось имитационное моделирование на основе метода Монте-Карло, реализованное в рамках специализированного программного средства, а также метод расчёта интегрального риска. **Результат.** Была предложена методика оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак с учётом значимости отдельных узлов её ВС. **Вывод.** Разработанная методика полезна при проведении аудита информационной безопасности (АИБ) для оценки интегрального риска реализации угрозы воздействия DDoS-атаки на ВС. Методика призвана помочь организации в достижении глобальных целей информационной безопасности (ИБ), а также для обоснования размера выплачиваемой страховой премии при страховании киберрисков.

Ключевые слова: имитационное моделирование, метод Монте-Карло, DDoS-атака, аудит информационной безопасности, оценка риска информационной безопасности.

Для цитирования: В.А. Воеводин, В.С. Черняев, И.В. Виноградов. Рекомендации по применению методики оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):57-65. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-57-65

**Recommendations for using a methodology for assessing the security of an
automated control system for critical information infrastructure from DDoS attacks based
on Monte Carlo simulation**

V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, I.V. Vinogradov

National Research University of Electronic Technology,

1 Shokin Square, Moscow, Zelenograd 124498, Russia

Abstract. Objective. The objective of the research is to develop a methodology for the security of an automated control system of critical information infrastructure from DDoS attacks. The methodology allows the decision-maker to obtain an assessment of the risk of exposure of the computer network (CN) to DDoS attacks and take necessary actions to reduce the risk of this threat. **Method.** To achieve the stated objective of the research, simulation modeling based on the Monte Carlo method was used, implemented within the framework of a specialized software environment, as well as a method for calculating integral risk. **Result.** A methodology was proposed for assessing the security of an automated control system for critical information infrastructure

from DDoS attacks, taking into account the importance of individual nodes of its CN. **Conclusion.** Thus, the developed methodology is useful when conducting an information security audit to assess the integral risk of impact implementation of a DDoS attack on a CN and is designed to help an organization achieve global information security goals, as well as to justify the amount of the insurance premium paid when insuring cyber risks.

Keywords: simulation modeling, Monte Carlo method, DDoS attack, information security audit, information security risk assessment.

For citation: V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, I.V. Vinogradov. Recommendations for using a methodology for assessing the security of an automated control system for critical information infrastructure from DDoS attacks based on Monte Carlo simulation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (3): 57-65. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-3-57-65

Введение. В статье, размещенной ранее в данном журнале, была предложена методика оценки вероятности отказа элементов информационной инфраструктуры ВС, функционирующей в условиях воздействия DDoS-атак. В настоящей статье предложена методика оценки интегрального риска реализации угрозы воздействия DDoS-атак на ВС в целом, основой которой служит применение методов, представленных в предыдущей публикации. На сегодняшний день проблема защиты сетевой инфраструктуры от DDoS-атак является актуальной. Организациям промышленного сектора требуется защита от подобного вида атак, так как в случае её успешной реализации нанесённый ущерб может иметь не только материальный характер, но и последствия для здоровья и жизни людей.

Согласно данным открытых источников, прошедший 2022 год был насыщенным по количеству DDoS-атак на финансовые организации. В марте 2022 года Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ предложило помощь российским банкам в борьбе с DDoS-атаками, которые происходят из-за рубежа. Банки имеют возможность направить Центральному банку РФ список информационных систем (ИС), подверженных угрозе воздействия DDoS-атак, чтобы получить поддержку. Минцифры России организует фильтрацию зарубежного трафика и координирует меры противодействия угрозам, чтобы предотвратить нарушения доступности ресурсов банков.

Эксперты считают такую инициативу целесообразной, поскольку она позволит снизить мощность зарубежных DDoS-атак. Отмечается, что методика фильтрации трафика по геолокации является неточной и неэффективной, так как атаки имеют распределенный характер и могут происходить из различных стран, включая Россию. К середине марта 2022 года количество DDoS-атак на банки выросло в четыре раза по сравнению с февралем 2022 года, составив около 400 атак, по сведениям специалистов по кибербезопасности. Кроме этого, ряд крупных банков сообщил о массированных кибератаках, которые были успешно отражены [1].

В терминах стандарта ИСО/МЭК 27001 успешная DDoS-атака может повлиять на достижение следующих глобальных целей ИБ организации [2, 3]:

1. Обеспечение надлежащей и безопасной эксплуатации средств обработки информации.
2. Информационная безопасность должна обеспечиваться на всём жизненном цикле ИС.
3. Обеспечение доступности к средствам обработки информации.

Таким образом, оценка интегрального риска реализации угрозы воздействия DDoS-атаки на ВС может быть актуальна при проведении аудита на соответствие международным стандартам в области ИБ, что обуславливает необходимость разработки методики оценки интегрального риска подверженности ВС DDoS-атакам.

В общем случае можно выделить следующие этапы проведения аудита информационной безопасности:

1. **Подготовительный этап.** На подготовительном этапе происходит согласование плана аудита и определяется объём аудиторских процедур. Согласование объёма аудиторских процедур происходит совместно с руководителями соответствующих

бизнес или ИТ-подразделений. На данном этапе также происходит согласование сроков, определяется информация, которую компания считает критичной и не желательной для предоставления в рамках аудита. В этом случае с представителями аудиторской группы согласовываются альтернативные способы проведения проверки без использования данной информации.

2. Основной этап. Основной этап включает непосредственное проведение аудиторских процедур. На данном этапе проводятся очные или дистанционные интервью, запрашиваются и анализируются необходимые отчёты по ИС, формируются выборки. В зависимости от целей аудита проверке подвергаются процедуры внесения изменений в продуктивную среду организации, управления доступом, разграничения полномочий, настройки резервного копирования и другие процедуры.

Заключительный этап. На заключительном этапе формируется аудиторское заключение, а также выдаётся ряд рекомендаций для устранения уязвимостей и недостатков в обеспечении ИБ. Программа АИБ представляет собой стратегический план, который определяет проведение одного или нескольких АИБ и других проверок в определенный период времени с целью достижения определенных результатов в области ИБ [4].

Для результативного проведения аудита в рамках установленных сроков, программа аудита должна содержать следующую информацию [5]:

1. Цели аудита.
2. Риски, возможности, связанные с программой аудита, и план действий по их управлению.
3. Объем каждого аудита в рамках программы аудита, включая глубину охвата и границы места проведения.
4. График проведения аудитов, включая число, продолжительность и частоту.
5. Типы аудитов, такие как внутренний или внешний.
6. Критерии аудита.
7. Методы аудита, которые будут применяться.
8. Критерии для выбора членов аудиторской группы.
9. Соответствующая документированная информация.

Модель аудита включает в себя следующие компоненты:

1. Объект аудита – предмет, подлежащий проверке в рамках аудита.
2. Цели аудита – задачи и цели, которые необходимо достичь в процессе аудита.
3. Предъявляемые требования – стандарты, нормы и критерии, которым должен соответствовать объект аудита.
4. Используемые практические и теоретические подходы – методы, подходы и инструменты, применяемые в процессе аудита.
5. Масштаб и глубина – уровень детализации и степень проникновения при проведении аудита.
6. Исполнители – лица или группы, ответственные за выполнение аудита.
7. Порядок проведения аудита – последовательность и этапы, которые исследуются во время проведения аудиторской проверки.

Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 19011–2021 аудит является систематическим, независимым и документированным процессом, который направлен на установление объективных доказательств и их последующую оценку с целью определения степени соответствия критериям аудита. Аудит ИБ можно рассматривать как исследование, которое позволяет оценить текущее состояние защиты информации и спланировать дальнейшие действия по улучшению уровня безопасности, охватывая все аспекты ИБ [6].

Для проведения аудита необходимо следовать формальной процедуре проверки объекта аудита, которая основывается на заранее сформированных формальных описаниях объекта и процесса аудита, а также учитывает современные угрозы. Схема процесса аудита представлена на рис. 1.



Рис.1. Схема процесса аудита

Fig.1. Audit process diagram

В общем случае для формализации процесса АИБ необходимо определить следующие аспекты: источники угроз, защищаемые элементы системы, связи между ними и структуру с функционированием подсистемы защиты.

Можно выделить четыре подхода к проведению АИБ [7]:

1. Риск-ориентированный аудит.
2. Аудит, основанный на директивном подходе.
3. Комбинированный аудит, сочетающий риск-ориентированный подход и директивный аудит.
4. Экспериментальный аудит.

При риск-ориентированном подходе проводится анализ рисков, свойственных проверяемой системе. Цель подобного подхода – обнаружение и снижение рисков путём внедрения контрольных процедур. Достоинство такого подхода заключается в возможности учёта особенностей проверяемой системы. Недостатком может стать субъективность в оценке, когда какой-то риск или аспект ИБ не был учтён [8].

Директивный подход к АИБ основан на проверке соответствия требованиям различных Регуляторов, нормативных правовых актов, международных и отраслевых стандартов. От организации требуется формальное соответствие требованиям, без учёта конкретной специфики. В случае аудита государственной организации также проверяется соответствие национальным нормативным актам. Плюсом данного подхода является достаточная прозрачность при проведении аудита, когда набор формальных требований однозначно определён. Минус директивного подхода заключается в том, что на итоговую оценку ИБ системы может оказать влияние критерий, который, в действительности, не является важным. При комбинированном аудите объединяются лучшие подходы двух предыдущих видов аудита: за основу берётся набор требований, представленный в стандарте, либо в нормативном правовом документе, но также учитываются особенности исследуемой системы. Подобный подход позволяет, с одной стороны, использовать лучшие практики, описанные в стандартах, а с другой – учесть особенности конкретной системы.

Экспериментальный аудит подразумевает проведение некоторых испытаний системы или ее прототипа, что позволяет оценить текущее реальное состояние различных аспектов ИБ системы. Этот подход может включать тестирование на проникновение, моделирование атак злоумышленника и активный анализ системы с позиции потенциального атакующего. Достоинством экспериментального аудита является наглядность получаемых результатов, однако существенным недостатком будет возможное нарушение операционной деятельности организации, либо невозможность применения данного вида аудита для некоторых критичных ИС, например, АСУ ТП.

Постановка задачи. Рассмотрим произвольную ВС, которая состоит из соединенных друг с другом устройств (серверов, маршрутизаторов, коммутаторов и т.д.) с уникальными IP-адресами [9, 10]. Каждое устройство будет называться узлом ВС, а доступ к ним будет осуществляться только авторизованными администраторами с целью их настройки. Каждому узлу присваивается номер в нумерации ВС: $i = 1, 2, \dots, N$, где N – общее число узлов. Для узлов ВС следует ввести вектор вероятностей поражения узлов ВС:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}.$$

Для оценки риска реализации угрозы воздействия DDoS-атак на ВС необходимо учитывать, что в сети присутствуют как критичные, так и менее критичные устройства [11]. Например, выход из строя коммутатора уровня доступа в одном подразделении не повлияет на работу всей сети в целом, но в случае сетевой атаки это может быть не так. Целесообразность учета весового коэффициента в рамках АИБ была показана в работах [12,13].

Методы исследования. В общем случае сетевая инфраструктура может включать следующие компоненты:

1. Сервер базы данных, обеспечивающий обслуживание и управление базой данных. Особый интерес для аудитора представляют продуктивные сервера, на которых обрабатывается информация, непосредственно влияющая на операционную деятельность организации. Информация, хранящаяся на таких серверах способна оказать влияние на финансовую отчетность.
2. Сервер приложений, предназначенный для обеспечения работы приложений, используемых на предприятии сотрудниками, относящимся к бизнес-подразделениям. Такими приложениями выступают различные бухгалтерские программы и комплексы для ведения учёта в организации, например, продукты компаний 1С и SAP.
3. Транспортный сервер, обеспечивающий перенаправление информационных потоков.
4. Проxy-сервер, обеспечивающий подключение сотрудников к защищённому сетевому периметру организации.
5. Веб-сервер, предназначенный для получения доступа к внутренним информационным ресурсам организации.
6. Сервер обработки данных.
7. Маршрутизатор, обеспечивающий объединение внутренней сети организации с внешней.
8. Администраторский АРМ, предназначенный для управления системой.
9. АРМ операторов, которые используются для взаимодействия пользователей с системой.

Для корректной оценки риска подверженности ВС DDoS-атакам предлагается оценить критичность каждого узла и отранжировать по важности для функционирования ВС. Для этого предлагается ввести вектор критической значимости узлов:

$$w = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}, \quad (1)$$

где w_i — вес (значимость) i -го узла для всей ВС в целом. Весовые коэффициенты определяются экспертом (аудитором) из анализа структурной схемы ВС при соблюдении нормирующего условия, то есть:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1. \quad (2)$$

Интегральный уровень риска K реализации угрозы воздействия DDoS-атаки на ВС в таком случае определяется линейной комбинацией следующего вида:

$$K = w_1 p_1 + w_2 p_2 + \dots + w_N p_N = \sum_{i=1}^N w_i p_i. \quad (3)$$

Таким образом, общую методику определения интегрального уровня риска ИБ можно описать следующим алгоритмом:

1. Анализ структурной схемы ВС и определение вектора критичности узлов ВС:

$$w = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}.$$

В общем случае предлагается трёхуровневая оценка значимости. Основанием для присвоения оценки могут служить параметры, важные для той или иной сети, например, количество пользователей, на которых скажется выход из строя того или иного узла, время остановки деятельности организации, финансовые потери, издержки, налагаемые штрафными санкциями Регулятора и т.д. Следует отметить возможность исключения из рассмотрения отдельных узлов путём присвоения им нулевого приоритета.

2. Определение вектора вероятностей отказа узлов ВС такого, что:

$$i_1, i_2, i_3, \dots, i_N; U_i = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}.$$

3. Определение интегрального уровня риска ИБ всей ВС с учётом уровня значимости отдельного узла, определяемой при условии (2).

4. Присвоение качественной оценки риска на основании полученной численной интегральной оценки риска.

В общем случае предлагается использование пятиуровневой шкалы риска в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Качественная шкала риска

Table 1. Qualitative risk scale

Значение интегрального уровня риска К The value of the integral risk level K	Оценка/ Grade
0 - 0,2	1 «Незначительный риск»/ Little risk
0,2 - 0,4	2 «Небольшой риск»/ Slight Risk
0,4 - 0,6	3 «Средний риск»/ Medium risk
0,6 - 0,8	4 «Крупный риск»/ Large risk
0,8 - 1,0	5 «Катастрофический риск»/ Catastrophic risk

5. Предложение ЛПП мер, снижающих интегральный уровень риска реализации угрозы воздействия DDoS-атаки. Принятие ЛПП текущего уровня риска либо принятие ЛПП мер по его снижению путём внедрения предложенных рекомендаций.

6. Проведение повторной оценки интегрального риска ВС после внедрения мер по снижению уровня риска при необходимости.

Таким образом, для реализации приведенного выше алгоритма на втором шаге необходимо определение вероятностей выхода из строя узлов сети p_i .

Для решения данной задачи предлагается применение разработанного программного средства имитационного моделирования по методу Монте-Карло [14, 15].

Обсуждение результатов. Пусть после исследования топологии сети значимость узла N_1 оценена в 0,4; N_2 – в 0,6; остальные узлы ВС признаны незначительными, и узел N_1 имеет меньшие вычислительные мощности, чем узел N_2 .

Последнее утверждение в терминах теории систем массового обслуживания описывается меньшим количеством каналов обслуживания. После проведения испытаний были получены соответствующие вероятности отказа для названных компонент ВС (рис. 2-3).

Интегральный уровень риска реализации угрозы воздействия DDoS-атаки для рассмотренного примера по формуле (3):

$$K = \sum_{i=1}^N w_i p_i = w_1 p_1 + w_2 p_2 = 0,50 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,47 = 0,482. \quad (4)$$

Таким образом, полученный интегральный уровень риска К исследуемой ВС равен 0,482, что соответствует оценке «Средний риск» согласно шкале (табл.1).

Оценка защищенности сервера от DDoS атак

Уравнения Колмогорова Метод Монте-Карло

Введите данные:

Интервал времени Δt : 0,1

Количество итераций N_i : 20000

Количество каналов N_{sc} : 5

Длина очереди L_q : 1

Максимальное ожидание T_w : 1

Статистика: Загрузить

Результат:

Вероятность отказа P_d : 0,5 Вычислить

Сохранить

Рис.2. Вероятность отказа узла N_1 Fig.2. Node N_1 failure probability

Оценка защищенности сервера от DDoS атак

Уравнения Колмогорова Метод Монте-Карло

Введите данные:

Интервал времени Δt : 0,1

Количество итераций N_i : 20000

Количество каналов N_{sc} : 25

Длина очереди L_q : 1

Максимальное ожидание T_w : 1

Статистика: Загрузить

Результат:

Вероятность отказа P_d : 0,47 Вычислить

Сохранить

Рис.3. Вероятность отказа узла N_2 Fig.3. Node N_2 failure probability

В качестве рекомендаций по снижению риска реализации угрозы воздействия DDoS-атак предлагаются следующие меры, разработанные на основе рекомендаций компании АО «Лаборатория Касперского» [16]:

1. Замена модели сервера на более производительную модель, что позволит сохранить работоспособность при большом количестве вредоносных запросов.
2. Резервирование сервера, что позволит снизить критичность узла для ВС.
3. Создание защиты периметра от несанкционированного доступа посредством внедрения средств межсетевое экранирования, что позволит отделять поток вредоносных запросов.
4. Принятия ряда организационных мер, включающих усовершенствование политики ИБ и повышение квалификации персонала. Данный шаг повысит общую подготовленность персонала к отражению DDoS-атак, а также снизит возможность использования потенциальных уязвимостей сети для проведения DDoS-атаки.
5. Размещение средств анализа трафика. Подобная мера позволит своевременно детектировать подозрительную активность в сетевом контуре.

Вывод. Представлена методика оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак. Для оценки вероятности отказа узла ВС предлагается использовать специализированное программное средство имитационного моделирования DDoS-атак по методу Монте-Карло. Кроме того, в рамках методики вводится весовой коэффициент критичности узлов ВС для более точной оценки защищенности.

Разработанная методика позволяет оценить общий риск, связанный с возможной реализацией угрозы воздействия DDoS-атаки на ВС, и принять соответствующие организационные и технические меры для повышения уровня ИБ. Предложенная методика может быть использована при проведении АИБ в организации для обоснования размера страховой премии в рамках страхования киберрисков.

Библиографический список:

1. DDoS-атаки на банки в России. [Электронный ресурс]: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:DDoS-атаки_на_банки_в_России
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001— 2021 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2021 г. № 1653-ст. Москва Российский институт стандартизации 2021, - 24 с.
3. Implementing capacity management according to ISO 27001:2013 control A.12.1.3 [Электронный ресурс]: <https://advisera.com/27001academy/blog/2016/02/22/implementing-capacity-management-according-to-iso-270012013-control-a-12-1-3/>
4. Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.1-2007 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Аудит информационной безопасности». Введен в действие распоряжением ЦБР от 28 апреля 2007 г. N P-345.
5. 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.: Стандартиформ, 2021. – 42 с.
6. Информационная безопасность автоматизированных систем / А.В. Солодяников - СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2020 - 108 с.
7. Макаренко С. И. Аудит информационной безопасности: основные этапы, концептуальные основы, классификация мероприятий // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 1–29. Электронный ресурс: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/01-Makarenko.pdf>
8. 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.: Стандартиформ, 2012, - 91 с.
9. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебник. В 2 ч. Ч. 2. Сети и телекоммуникации / В. П. Галас ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. – 284 с.
10. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А. И. Гусева, В.С. Киреев – М.: Издательский центр «Академия», 2014 – М. : Издательский центр «Академия», 2014. – 288с. – (Сер. Бакалавриат).
11. Губарева О. Ю. Разработка методики оценки рисков информационной безопасности корпоративных телекоммуникационных сетей специальность 05.12.13 «Сети, системы и устройства телекоммуникаций» : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» – Самара, 2018. – 176 с.
12. Воеводин В.А., Буренок Д.С., Черняев В.С. 2021, Программа для оценки защищенности сервера от DDoS-атак свидетельство официальной регистрации компьютерной программы номер 2021615403.
13. Воеводин В.А., Черняев В.С., Буренок Д.С., Виноградов И.В. Методика оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(1):62-74.
14. 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.
15. Воеводин В. А., Карманьян А. И., Суханов Е. Э., Штанг К. С. О методике оценки значимости аудиторских свидетельств информационной безопасности // Интеллектуальные системы в информационном противоборстве: сборник научных трудов Российской научной конференции. 2019. С. 40-44.
16. Кибербезопасность АСУ ТП: вести с передовой / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/blog/ics-report-2017/17812/>

References:

1. DDoS attacks on banks in Russia. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:DDoS-атаки_на_банки_в_России (In Russ).

2. GOST R ISO/IEC 27001—2021 Information technology. Methods and means of ensuring safety. Information security management systems. Requirements. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 30, 2021 No. 1653-st. Moscow Russian Institute of Standardization 2021; 24. (In Russ).
3. Implementing capacity management according to ISO 27001:2013 control A.12.1.3 [Electronic resource]: <https://advisera.com/27001academy/blog/2016/02/22/implementing-capacity-management-according-to-iso-270012013-control-a-12-1-3/>(In Russ).
4. Standard of the Bank of Russia STO BR IBBS-1.1-2007 “Ensuring information security of organizations of the banking system of the Russian Federation. Information security audit.” Put into effect by order of the Central Bank of Russia dated April 28, 2007;345. (In Russ).
5. GOST R ISO 19011—2021 Guidelines for conducting audits of management systems. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated April 21, 2021 N261-Art. M.: Standartinform, 2021; 42. (In Russ).
6. Information security of automated systems / A.V. Solodyannikov - St. Petersburg. : Publishing house of St. Petersburg State Economic University, 2020;108. (In Russ).
7. Makarenko S.I. Information security audit: main stages, conceptual foundations, classification of activities. *Management, communication and security systems*. 2018;1:1–29. Electronic resource: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/01-Makarenko.pdf>(In Russ).
8. GOST R ISO/IEC 27005-2010 Information technology. Methods and means of ensuring safety. 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.
9. Computing systems, networks and telecommunications: textbook. In 2 hours. Part 2. Networks and telecommunications. V. P. Galas; Vladim. state University named after A. G. and N. G. Stoletov. Vladimir: VISU Publishing House, 2017; 284. (In Russ).
10. Computing systems, networks and telecommunications: a textbook for students. institutions of higher education prof. education. A.I. Guseva, V.S. Kireev. M.: Publishing center “Academy”, 2014 - M.: Publishing center “Academy”, 2014; 288 (Ser. Bachelor’s degree). (In Russ).
11. Gubareva O. Yu. Development of a methodology for assessing the risks of information security of corporate telecommunication networks, specialty 05.12.13 “Networks, systems and devices of telecommunications”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga Region State University of Telecommunications and Informatics”. Samara, 2018; 176. (In Russ).
12. Voevodin V.A., Burenok D.S., Chernyaev V.S. 2021, Program for assessing server security against DDoS attacks, certificate of official registration of the computer program number 2021615403. (In Russ).
13. Voevodin V.A., Chernyaev V.S., Burenok D.S., Vinogradov I.V. Methodology for assessing the security of an automated control system for critical information infrastructure from DDoS attacks based on Monte Carlo simulation. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2023; 50(1):62-74. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-62-74 (In Russ).
14. Voevodin V. A., Markin P. V., Markina M. S., Burenok D. S. Methodology for developing an information security audit program taking into account the weighting coefficients of the significance of audit evidence based on the hierarchy analysis method. *Management Systems, Communications and security*. 2021; 2. 96–129. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-96-129. (In Russ).
15. Voevodin V. A., Karmanyanyan A. I., Sukhanov E. E., Shtang K. S. On the methodology for assessing the significance of audit certificates of information security. *Intelligent systems in information warfare: collection of scientific papers of the Russian scientific conference*. 2019; 40-44. (In Russ).
16. Cybersecurity of automated process control systems: news from the front lines / [Electronic resource]. Access mode: <https://www.kaspersky.ru/blog/ics-report-2017/17812/>(In Russ).

Сведения об авторах:

Воеводин Владислав Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационная безопасность»; vva541@mail.ru

Черняев Валентин Сергеевич, магистрант; sergeich1997@yandex.ru

Виноградов Иван Вадимович, студент; ivanvinogradov1111@gmail.com

Information about authors:

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

Valentin S. Chernyaev, Master’s student; sergeich1997@yandex.ru

Ivan V. Vinogradov, Student; ivanvinogradov1111@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.07.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 10.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-66-71



Оригинальная статья /Original article

Практический анализ вредоносного программного обеспечения

Д. А. Елизаров, А. В. Катков

Омский государственный университет путей сообщения,
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время главным способом атак на организации является вредоносное ПО (ВПО). Проблема усиления защиты от такого способа атаки остается актуальной и требует новых подходов. Основная задача – анализ ВПО для оценки угроз и своевременное обнаружение и принятия мер. **Метод.** Для анализа следует использовать изолированную среду с настроенным окружением и ПО. **Результат.** В данной работе описан процесс создания изолированного стенда для анализа ВПО и проведен практический анализ файла malware.bin, взятого с учебного ресурса cyberdefenders.org. Для предотвращения воздействия на сеть, которая связывает две виртуальные машины, сконфигурированы сетевые интерфейсы. В результате анализа техник и особенностей, используемых в данном вредоносном ПО, было выявлено, что оно принадлежит к семейству банковских троянов Dridex. Для получения информации из данного семейства можно использовать инструмент AppGate Lab Dridex Toolkit. **Вывод.** Основываясь на проведенном анализе с применением статических и динамических методов, можно разработать правила детектирования для дальнейшего определения ВПО.

Ключевые слова: кибератака, вредоносное программное обеспечение, расследование инцидентов, анализ, информационная безопасность.

Для цитирования: Д. А. Елизаров, А. В. Катков. Практический анализ вредоносного программного обеспечения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):66-71. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-66-71

Practical Malware Analysis

D. A. Elizarov, A.V. Katkov

Omsk State University of Railways,
35 Marx Ave., Omsk 644046, Russia

Abstract. Objective. Currently, the main method of attack on organizations is malware. The problem of strengthening protection against this type of attack remains relevant and requires new approaches. The main task is to analyze malware to assess threats and timely detection and take action. **Method.** For analysis, you should use an isolated environment with a customized environment and software. **Result.** This paper describes the process of creating an isolated stand for malware analysis and conducted a practical analysis of the malware.bin file taken from the cyberdefenders.org educational resource. Network interfaces are configured to prevent impact to the network that connects the two virtual machines. As a result of the analysis of the techniques and features used in this malware, it was revealed that it belongs to the Dridex family of banking Trojans. To obtain information from this family, you can use the AppGate Lab Dridex Toolkit. **Conclusion.** Based on the analysis performed using static and dynamic methods, detection rules can be developed for further identification of malware.

Keywords: cyberattacks, malware, incident investigation, analysis, information security.

For citation: D.A. Elizarov, A.V. Katkov. Practical Malware Analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (3): 66-71. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-3-66-71

Введение. В настоящее время наблюдается рост количества кибератак, что ставит под угрозу информационную безопасность организаций.

Согласно исследованию компании Positive Technologies, проведенному в 2022 году, лидирующим методом атак на организации является вредоносное программное обеспечение (ВПО) [1]. Этот факт подтверждается статистическими данными, представленными на рис. 1.

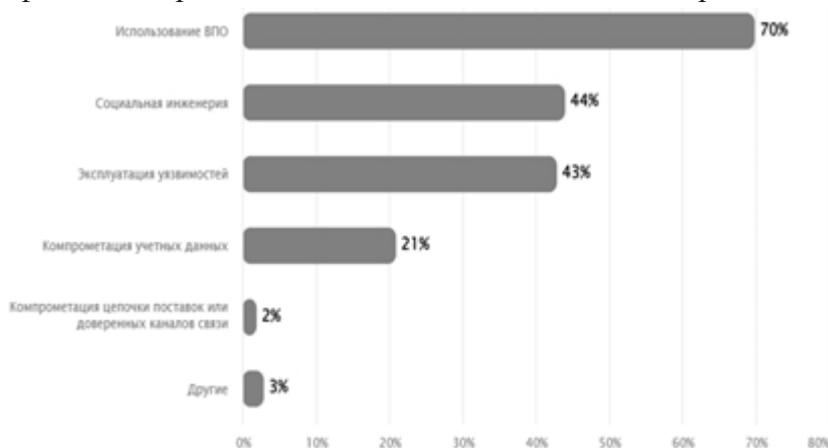


Рис. 1. Доля методов атак, используемых злоумышленниками, в 2022 году

Fig. 1. The share of attack methods used by attackers in 2022

Однако, не только организации, но и государство подвержено угрозе киберпреступлений. Компания RTM Group провела исследование, в рамках которого был выявлен общий ущерб преступных действий с использованием компьютерных технологий в России в 2021 году, который превысил 150 миллиардов рублей [2].

Эта оценка была основана на возбужденных уголовных делах, связанных с использованием технологий [3, 5-10]. Исходя из приведенных статистических данных, можно сделать вывод, что вопрос повышения уровня защиты от ВПО является актуальным, требует внимательного рассмотрения и принятия соответствующих мер.

Постановка задачи. Построение изолированного стенда для анализа ВПО. При расследовании инцидентов информационной безопасности, специалисты часто вынуждены производить анализ ВПО и изучать его взаимодействие с сетью и файловой системой. В результате этого анализа выделяются индикаторы компрометации и сигнатуры.

Для безопасного проведения подобного анализа необходимо использовать изолированную среду с настроенным окружением и программным обеспечением.

Стоит отметить, что многие вредоносные программы могут получать и отправлять информацию на командный сервер с помощью протокола HTTPS, который использует шифрование, что затрудняет обнаружение команд управления и выводимой из системы информации.

Методы исследования. Для решения данной задачи необходимо использовать специально подготовленный стенд, который позволяет анализировать происходящее и возвращаться к исходной точке до заражения системы.

Для создания стенда были использованы две виртуальные машины: ОС Kali Linux с установленным ПО Inetsim и BurpSuite и ОС Windows 10 со сконфигурированным ПО для проведения мониторинга системы и обратной разработки. Выбор ОС Windows 10 обусловлен ее популярностью в корпоративном сегменте и повышенной уязвимостью для атак.

В свою очередь, виртуальная машина Kali Linux будет использоваться для обеспечения работы интернет-служб, а виртуальная машина Windows – для изучения вредоносных программ. Схема виртуального стенда представлена на рис. 2.

В рамках исследования было проведено построение изолированного стенда, на основе выполнения шести этапов. На первом этапе был установлен гипервизор и созданы виртуальные машины на базе операционных систем Kali Linux и Windows 10.

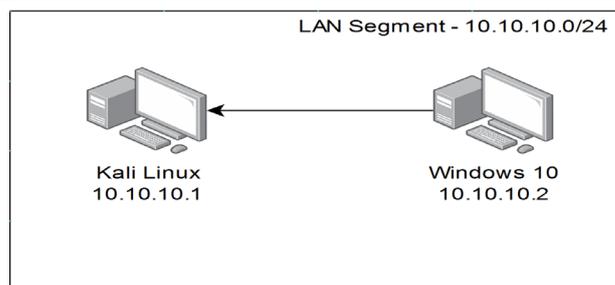


Рис. 2. Схема стенда для анализа ВПО

Fig. 2. Diagram of a stand for malware analysis

Далее была выполнена установка и настройка необходимого программного обеспечения на виртуальную машину Kali Linux и произведена настройка окружения и установка необходимого ПО на виртуальную машину Windows 10.

На следующем этапе была настроена изолированная виртуальная сеть и сетевые компоненты, а затем настроено ПО Inetsim для имитации работы соединения HTTP/HTTPS. На заключительном этапе была проведена итоговая проверка работоспособности стенда.

Для проведения анализа вредоносных файлов на виртуальную машину Windows, необходимо было установить программные инструменты – набор инструментов для статического и динамического анализа вредоносных программ FLARE VM. Для проведения статического анализа вредоносного программного обеспечения был использован фреймворк Ghidra-SRE. Данное ПО позволяет дизассемблировать и декомпилировать образцы с целью изучения их исходного кода и функционала.

Для разработки мер противодействия вредоносному программному обеспечению было использовано ПО Yara. Yara позволяет строить правила детектирования и противодействия на основе данных, полученных при статическом и динамическом анализе. Исследуемое вредоносное программное обеспечение может оказать воздействие на сеть, которая связывает две виртуальные машины.

Для предотвращения подобного воздействия необходимо сконфигурировать сетевые интерфейсы. Настройки по умолчанию в Inetsim нацелены на прослушивание только локального хоста. Первоочередная задача состоит в том, чтобы сделать его доступным для всех запросов в виртуальной сети.

Для этого необходимо изменить значение строки `service_bind_address` на `0.0.0.0` в конфигурационном файле. DNS-порт `53` (`dns_bind_port 53`) указывается в конфигурационном файле, а DNS конфигурируется по адресу `10.10.10.1` (`dns_default_ip 10.10.10.1`). Inetsim имеет ограниченную поддержку SSL и не может генерировать сертификаты для каждого хоста сразу.

Он имеет только один готовый сертификат для хоста `inetsim.org`. Для настройки SSL необходимо использовать Burp Suite на порте `443` в режиме прозрачного прокси. Для этого в файле конфигураций устанавливается порт `8443` для службы HTTPS (`http_bind_port 8443`).

Затем следует настроить Burp Suite в режиме прокси-сервера и на Windows-машину установить сертификат Burp Suite. Для настройки маршрутизации на Windows-машине требуется создать маршрут, направляющий весь сетевой трафик на IP-адрес Inetsim, а на машине Kali с Inetsim перенаправить входящий трафик на интерфейс `eth0` (`10.10.10.1`). Необходимо также учитывать вопрос файлов-заглушек Inetsim при работе со стендом. Эти страницы распределены по протоколам и находятся в папке `/var/lib/inetsim/`. В файле конфигурации `inetsim.conf` можно отредактировать список.

Обсуждение результатов. С целью проведения практического анализа в данном исследовании был выбран файл `malware.bin` с учебного ресурса `cyberdefenders.org`.

В процессе косвенного анализа был изучен заголовок данного файла, который позволил установить его формат (PE32), дату создания (11.11.21), а также хэш-суммы

(SHA-1: FDD07C89C8ED656964DFA1A6CFF271E170EDA0C2, SHA-256: F9495E968F9A1610C0CF9383053E5B5696ECC85CA3CA2A338C24C7204CC93881).

Также было выявлено количество секций – 4, импортируемые библиотеки – 1 (Kernel.dll), импортируемые функции – 2 (OutputDebugStringA, Sleep) и экспортируемая функция – 1 (DllRegisterServer).

Анализ позволил установить, что файл не был сжат с помощью UPX. Кроме того, обнаружена строка, содержащая буквы английского алфавита в верхнем и нижнем регистре, цифры и символы '+' и '/', что может свидетельствовать об использовании кодирования base64.

Также в процессе извлечения строк были выделены ранее найденные импортируемые функции и библиотеки, экспортируемая функция, а также повторное использование сегментов .rdata, .edata, .data. Результат извлечения строк представлен на рис. 3.

Location	String Value	String Representati...	Data Type
005f0000	MZ	"MZ"	char[2]
005f00e8	PE	"PE"	char[4]
005f01e0	.text	".text"	char[8]
005f0208	.rdata	".rdata"	char[8]
005f0230	.data	".data"	char[8]
005f0258	.reloc	".reloc"	char[8]
0062a260	ABCDEFGHUKLMN...	"ABCDEFGHUKLMN..."	ds
0062ab02		""	ds
0062ab08	DllRegisterServer	"DllRegisterServer"	ds
0062ab50	.rdata	".rdata"	ds
0062ab60	.edata	".edata"	ds
0062abd8	.data	".data"	ds
0062ac26	Sleep	"Sleep"	ds
0062ac2e	OutputDebugStrin...	"OutputDebugStrin..."	ds
0062ac42	KERNEL32.dll	"KERNEL32.dll"	ds

Рис. 3. Извлечение строк

Fig. 3. String extraction

Особое внимание следует уделить импортируемой функции OutputDebugStringA, которая может свидетельствовать об использовании метода противодействия отладке. Обнаружение данной функции указывает на необходимость дополнительного анализа для определения конкретных методов защиты, используемых в файле malware.bin.

Предположение о возможном использовании обфускации или сжатия в исполняемом файле может быть подтверждено путем анализа энтропии файла.

Высокие значения энтропии на определенном участке могут указывать на наличие шифрования сегмента. Для определения энтропии файла был использован инструмент binwalk, как показано на рис. 4.

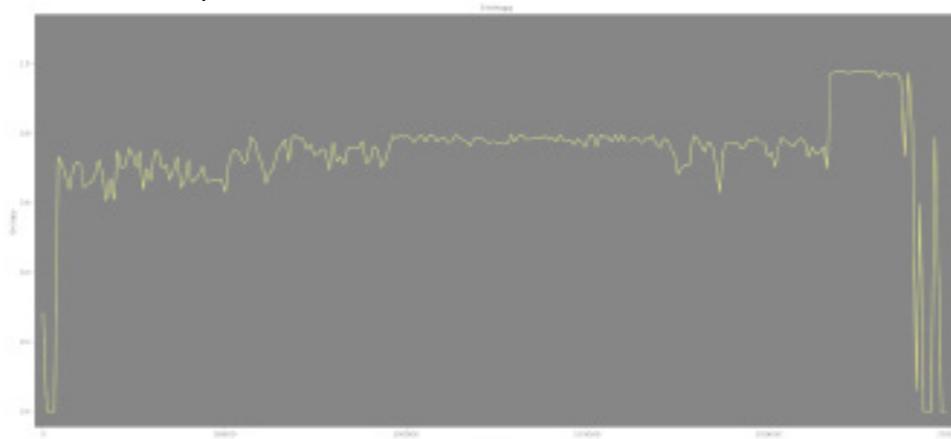


Рис. 4. Результат подсчета энтропии

Fig. 4. Entropy calculation result

Следует отметить, что сжатие наблюдается в интервале от 217000 до 234000 байт.

В процессе исследования бинарного файла с использованием программного

обеспечения Ghidra было выявлено отсутствие функции main или ее аналога, при этом код начинает исполняться с функции entry.

В ходе анализа данной функции было обнаружено взаимодействие с неинициализированными областями памяти в стеке, а также вызов других функций. Кроме того, были выявлены функции CRC32 хэширования, нахождения DLL, нахождения WinAPI и обнаружения WinAPI по табличным спискам.

В строке кода `uVar10=(local_420[0]>>1^0xedb88320)&uVar10|~uVar10&local_420[0]>>1` впервые встречается значение `0xedb88320`, которое является реверсированным представлением для CRC-32 (IEEE 802.3).

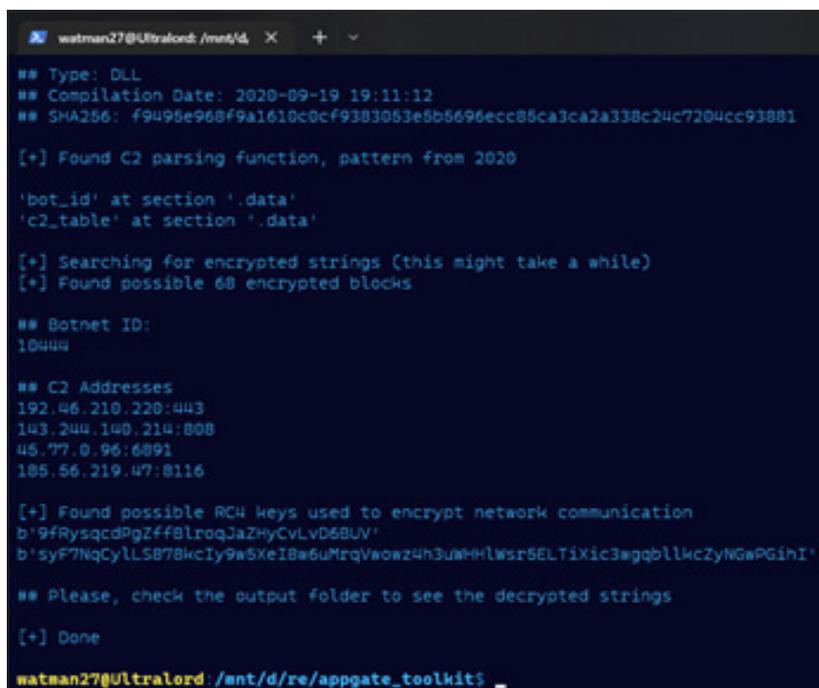
Также была обнаружена функция шифрования и расшифровывания, осуществляемая с помощью алгоритма RC4. Ключ для этого алгоритма расположен в секции `.rdata` и представляет собой поток байтов.

Среди информации, выделенной в ходе анализа, можно отметить наличие расширенной библиотеки API Windows (AdvApi32), API состояния процесса (PsApi), API программы оболочки Windows (shlwapi), API рабочего интерфейса Windows (shell32) и API для сетевого взаимодействия Windows (WinInet) [4].

В результате анализа были выделены следующие техники, используемые в исследуемом ВПО: использование системного API (T1106), обфусцированные файлы или конфигурации (T1027), изучение информации об установленном ПО (T1518), зашифрованные каналы связи: симметричные алгоритмы шифрования (T1573) и изучение информации о конфигурации системы (T1082).

Кроме того, отличительной особенностью может являться использование CRC32 хэширования для сокрытия информации об используемых библиотеках, использование OutputDebugString для анти-отладки и использование RC4 для шифрования конфигурации.

В результате анализа техник и особенностей, используемых в данном вредоносном ПО, было выявлено, что оно принадлежит к семейству банковских троянов Dridex. Для получения информации из данного семейства можно использовать инструмент AppGate Lab Dridex Toolkit. Результат извлечения адресов представлен на рис. 5.



```
watman27@Ultralord: /mnt/d/_$  
## Type: DLL  
## Compilation Date: 2020-09-19 19:11:12  
## SHA256: f9495e968f9a1610c8cf9383053e5b8696ecc85ca3ca2a338c24c7204cc93881  
  
[+] Found C2 parsing function, pattern from 2020  
  
'bot_id' at section '.data'  
'c2_table' at section '.data'  
  
[+] Searching for encrypted strings (this might take a while)  
[+] Found possible 68 encrypted blocks  
  
## Botnet ID:  
10444  
  
## C2 Addresses  
192.46.210.220:443  
143.244.140.214:808  
45.77.0.96:6891  
185.56.219.47:8116  
  
[+] Found possible RC4 keys used to encrypt network communication  
b'9fRysqcd9pZff8lroqJaZhyCvLvD68UV'  
b'syF7NqCylLS878hncIy9w5XeI8w6MrqVwovz4h3umHnlwSR5ELTixic3wqblLkcZyNGwPGiHl'  
  
## Please, check the output folder to see the decrypted strings  
  
[+] Done  
  
watman27@Ultralord: /mnt/d/re/appgate_toolkit$
```

Рис. 5. Результат извлечения адресов C2, botnet ID и RC4 ключа для шифрования трафика
Fig. 5. The result of extracting the addresses of C2, botnet ID and RC4 key for traffic encryption

Результаты проверки на сайте VirusTotal подтверждают предположения об обнаружении банковской троянской программы Dridex в большинстве антивирусных программ (рис. 6).

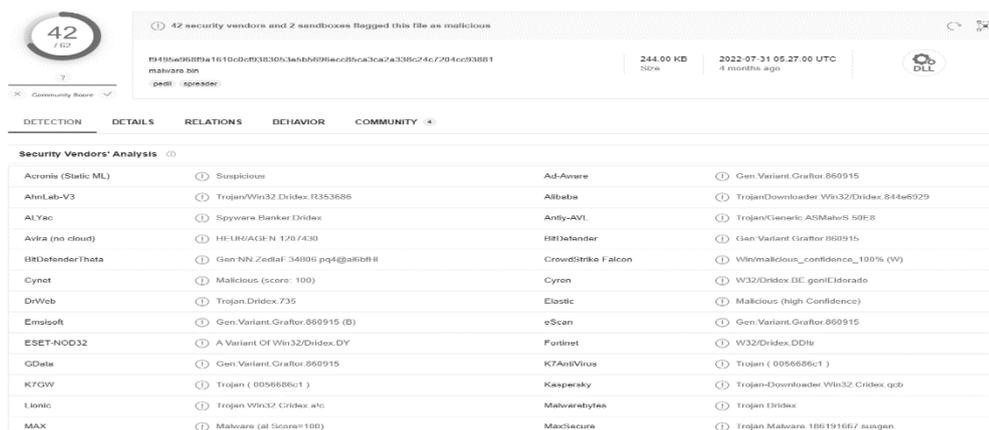


Рис. 6. Результат проверки на VirusTotal

Fig. 6. The result of checking for VirusTotal

Вывод. Результат подтверждается как при проверке исходного файла, так и при проверке хэш-суммы файла по алгоритму SHA-256, что свидетельствует о том, что это известный образец вредоносного программного обеспечения.

На основе проведенного анализа можно разработать правила для обнаружения вредоносного программного обеспечения этого семейства в будущем.

Библиографический список:

1. Актуальные киберугрозы для промышленных организаций: итоги 2022 года. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/industrial-cybersecurity-threatscape-2022/> (дата обращения: 25.03.2023).
2. Годовой ущерб от киберпреступлений может составить 165 млрд рублей. URL: <https://www.banki.ru/news/lenta/?id=10961269> (дата обращения: 25.03.2023).
3. Ghidra. URL: <https://xakep.ru/2019/03/20/nsa-ghidra/> (дата обращения: 25.03.2023).
4. Ионеску А. Внутреннее устройство Windows. СПб: Питер, 2022. 563 с.
5. <https://www.kaspersky.com/blog>
6. <https://habr.com/>
7. <https://www.anti-malware.ru/>
8. <https://krebsonsecurity.com/>
9. <https://edu.ptsecurity.com/mira/>
10. <https://partners.kaspersky.com/>

References

1. Current cyber threats for industrial organizations: results of 2022. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/industrial-cybersecurity-threatscape-2022/> (accessed date: 25.03.2023).
2. The annual damage from cybercrime may amount to 165 billion rubles. URL: <https://www.banki.ru/news/lenta/?id=10961269> (accessed date: 25.03.2023).
3. Ghidra. URL: <https://xakep.ru/2019/03/20/nsa-ghidra/> (accessed date: 25.03.2023).
4. Ionescu A. Windows internals. St. Petersburg: Peter, 2022. 563 p.
5. <https://www.kaspersky.com/blog>
6. <https://habr.com/> (общая информация по ИБ тематике)
7. <https://www.anti-malware.ru/>
8. <https://krebsonsecurity.com/>
9. <https://edu.ptsecurity.com/mira/>
10. <https://partners.kaspersky.com/>

Сведения об авторах:

Елизаров Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры «Информационная безопасность»; elizarovda@gmail.com.

Алексей Викторович Катков, студент; elizarovda@gmail.com.

Information about authors:

Dmitry A. Elizarov, Cand. Sci.(Eng.), Assoc. Prof., Department «Information security»; elizarovda@gmail.com.

Alexey V. Katkov, student; elizarovda@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.07.2023.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.07.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 30.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82



Оригинальная статья /Original article

**Прогнозирование количества выявляемых уязвимостей
информационной безопасности на основе теории «серых систем»**

А.О. Ефимов, С.А. Мишин, Е.А. Рогозин

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

Резюме. Цель. Целью работы является оценка возможности применения теории «серых систем» для построения методики прогнозирования количества выявляемых уязвимостей в условиях неопределенности воздействующих факторов и недостатка исходных данных, включая сравнительный анализ результатов указанного прогнозирования, полученных с помощью традиционной и улучшенной моделей теории «серых систем», а также модели машинного обучения. **Метод.** В работе описывается методика построения «серой модели» прогнозирования количества выявляемых уязвимостей на основе теории «серых систем». Исходными данными для прогнозирования является информация, получаемая из базы данных уязвимостей CVE (Common Vulnerabilities and Exposures). Анализируются результаты прогнозирования, полученные при использовании разработанной «серой модели» и модели линейной регрессии, реализованной на базе библиотеки scikit-learn и языка программирования Python. **Результат.** Применение модели линейной регрессии и моделей, построенных на базе теории «серых систем», для прогнозирования количества выявляемых уязвимостей позволяет получить близкие значения прогноза. Согласно данным, полученным из базы данных уязвимостей CVE, за 1 квартал 2023 года опубликована информация о 7015 выявленных уязвимостях. Ближе всего к опубликованному значению оказался прогноз, полученный на основе традиционной модели теории «серых систем». Прогноз «серой модели» построен лишь на значениях исходных данных и не зависит от обстоятельств, возникающих в сфере информационной безопасности, что является ограничением в использовании предлагаемой методики. **Вывод.** Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности применения теории «серых систем» для краткосрочного прогнозирования количества обнаруживаемых уязвимостей. Применение разработанной методики позволяет осуществлять указанное прогнозирование с ограниченным числом исходных данных.

Ключевые слова: информационная безопасность, защита информации, серые системы, количество уязвимостей, уязвимость, прогнозирование.

Для цитирования: А.О. Ефимов, С.А. Мишин, Е.А. Рогозин. Прогнозирование количества выявляемых уязвимостей информационной безопасности на основе теории «серых систем». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):72-82. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82

**Forecasting the number of identified information security vulnerabilities based on the theory of
“Gray Systems”**

A.O. Efimov, S.A. Mishin, E.A. Rogozin

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

Abstract. Objective. The aim of the work is to assess the possibility of applying the theory of “gray systems” to build a methodology for predicting the number of identified vulnerabilities in conditions of uncertainty of influencing factors and lack of initial data, including a comparative analysis of the results of this prediction obtained using traditional and improved models of the theory of “gray systems”, as well

as machine learning models. **Method.** The paper describes a technique for constructing a “gray model” for predicting the number of identified vulnerabilities based on the theory of “gray systems”. The initial data for forecasting is information obtained from the CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) vulnerability database. In the course of the study, the results of forecasting obtained using the developed “gray model” and the linear regression model implemented on the basis of the scikit-learn library and the Python programming language are analyzed. **Result.** The use of a linear regression model and models based on the theory of “gray systems” to predict the number of identified vulnerabilities allows you to get close forecast values. According to data obtained from the CVE vulnerability database, information on 7,015 identified vulnerabilities was published for the 1st quarter of 2023. The forecast obtained on the basis of the traditional model of the theory of “gray systems” turned out to be the closest to the published value. It should be noted that the forecast of the “gray model” is based only on the values of the initial data and does not depend on the circumstances arising in the field of information security, which is a limitation in the use of the proposed methodology. **Conclusion.** The results of the study indicate the possibility of applying the theory of “gray systems” for short-term forecasting of the number of detected vulnerabilities. The application of the developed methodology makes it possible to carry out the specified forecasting with a limited number of initial data.

Keywords: information security, protection of information, gray systems, number of vulnerabilities, vulnerability, forecasting.

For citation: A.O. Efimov, S.A. Mishin, E.A. Rogozin. Forecasting the number of identified information security vulnerabilities based on the theory of “Gray Systems”. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):72-82. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82

Введение. Область выявления уязвимостей обладает достаточно высокой степенью неопределенности. В свою очередь, решение задачи прогнозирования количества уязвимостей поможет уменьшить указанную неопределенность тем самым повысить эффективность подготовки специалистов информационной безопасности. В связи с этим тема исследования является актуальной.

Постановка задачи. Предложенная в статье методика прогнозирования количества выявляемых уязвимостей разработана на основе работы Ван Ю. «Прогнозирование объемов перевозок пассажиров на основе теории «серых систем»», опубликованной в Вестнике Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт [1]. Теоретическим базисом данной работы является статья «Introduction to Grey System Theory», опубликованная Deng Julong в 1989 году [2].

Применение теории «серых систем» для задач прогнозирования обладает рядом преимуществ: работа с небольшим количеством исходных данных, характеризующих изучаемые процессы или объекты, учет тенденции их поведения и связей между ними, низкая ресурсоемкость и простота использования, возможность использования в дополнение к другим методам прогнозирования [1,2]. Однако у рассматриваемой теории есть и ряд недостатков: невозможность учета внешних факторов, влияющих на исследуемую систему, неточность прогнозов в долгосрочной перспективе [1,2]. В качестве исходных данных будут взяты сведения о количестве выявленных уязвимостей за несколько лет, отраженных в базе данных уязвимостей CVE [3].

Таблица 1. Исходные данные количества выявленных уязвимостей (база данных уязвимостей CVE)

Table 1. Initial data on the number of identified vulnerabilities (CVE database)

	2019г.	2020г.	2021г.	2022г.
Количество обнаруженных уязвимостей/ Number of vulnerabilities discovered (I,II,III,IV квартал)	3245, 4590, 5150, 4822	4807, 5011, 4170, 4387	4415, 5005, 5541, 5200	6015, 6365, 6448, 6231

Из табл. 1 видно, что в исходных данных присутствует тенденция к росту количества обнаруживаемых уязвимостей.

Методы исследования. Модель GM (Grey Model) – это дифференциальное уравнение «серой модели» прогнозирования. Дифференциальное уравнение первого порядка с N переменными может быть представлена как GM (1, N). Таким же образом дифференциальное уравнение с одной переменной первого порядка представляется как GM (1, 1). Модель GM (1, 1) является самой простой и основной моделью серого прогнозирования [1,2].

На первом этапе построения «серой модели» прогнозирования производится сбор (поиск информации о количестве обнаруженных уязвимостей за рассматриваемый период времени), подготовка (количество обнаруженных уязвимостей представляется в виде временного ряда с равными интервалами времени) и проверка исходных данных на соответствие требованиям теории «серых систем» [1].

Последовательность исходных данных представляется следующим образом:

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2) \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

Важно отметить, что элементы последовательности могут иметь только положительное значение. После построения исходной последовательности данных, производится расчет параметров статистического ряда и проверка их сглаженности:

$$\beta(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}, k = 3, 4, \dots, n, \quad (2)$$

где k – порядковый номер элемента, начиная с 3 до n (количество элементов исходной последовательности данных).

Если коэффициенты связности находятся в диапазоне $(e^{-2/(n+1)}, e^{2/(n+1)})$, то исходные данные соответствуют модели GM (1, 1) и пригодны для использования в прогнозировании [1]. В ином случае необходима дополнительная обработка данных, с помощью методов наименьших квадратов, логарифмирования и др. [1].

Хорошая сглаженность данных позволяет получить более точные результаты их анализа и прогнозирования, так как в таком ряду проще выявлять закономерности и тренды. Тем не менее, необходимо учитывать, что сглаживание данных может привести к потере некоторой информации (определенных деталей в данных). Поэтому необходимо искать компромисс между достаточной сглаженностью и сохранением исходной информации, чтобы получить наиболее точный и полезный результат прогнозирования.

После проведения описанной выше подготовки данных генерируется новый набор данных, расширяющий исходную последовательность:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, 3 \dots n. \quad (3)$$

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2) \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (4)$$

После построения последовательности данных, которая включает в себя промежутки времени и зарегистрированные значения обнаруженных уязвимостей, производится проверка ее подчинения экспоненциальному закону распределения, используя следующее выражение [1-2, 4-15]:

$$\sigma^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)}, k = 3, 4, \dots, n. \quad (5)$$

Результатом данной проверки является ответ на вопрос: «Является ли изменение значения величины во времени экспоненциальным?». Если существует $\sigma^{(1)}(k) \in [1, 1 + \delta]$, где δ обычно принимают равным 0,5, то последовательность $x^{(1)}$ удовлетворяет экспоненциальному закону распределения. В противном случае выборка должна быть расширена [1]. В случае если изменение подчиняется экспоненциальному закону, то делается вывод о том, что исходные данные могут быть использованы для построения «серой модели».

Таким образом, применение модели GM (1, 1) позволяет не только сгладить данные, но и прогнозировать их изменение во времени на основе экспоненциального закона убывания

или роста.

При подчинении последовательности $x^{(1)}$ экспоненциальному закону распределения, можно предположить, что последовательность $x^{(1)}$ удовлетворяет условиям линейного дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$\frac{dx^{(1)}}{dx} + ax^{(1)} = u, \quad (6)$$

где a – коэффициент регрессии, отражающий тенденцию изменения исходных данных $x^{(0)}$ и новую последовательность данных $x^{(1)}$, которая является параметром построения модели; u – коэффициент согласованности, отражающий взаимосвязь между данными модели.

Согласно исходной методике [1], дифференциальное уравнение модели примет следующий вид:

$$x^{(0)}(k) = -aZ^{(1)}(k) + u, \quad (7)$$

где, $Z^{(1)}$ – это сгенерированная последовательность, смежная с последовательностью, полученной на основе исходных данных, обозначенной как $x^{(1)}$.

$$Z^{(1)}(k) = 0,5[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], k = 2, 3, \dots n. \quad (8)$$

Далее из ранее полученных данных производится построение матриц Y_n , B и определение параметров a , u :

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (12)$$

Определение \hat{a} производится методом наименьших квадратов, следующим образом:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n. \quad (13)$$

Метод наименьших квадратов позволяет оценить параметры модели, которые являются оптимальными при минимальной сумме квадратов отклонений между моделью и исходными данными. Таким образом, применение данного метода в теории «серых систем» позволяет улучшить точность прогнозирования, устранить некоторые ошибки и сделать модель более стабильной.

Подставляя значения (a, u) в линейное дифференциальное уравнение первого порядка, получаем модель функции времени отклика модели:

$$\tilde{x}^{(0)} = \left[\tilde{x}^{(1)} - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a}, k = 1, 2, 3, \dots n. \quad (14)$$

При восстановлении исходного состояния данных и использовании параметров u , a модель прогнозирования может быть представлена следующим образом:

$$\tilde{x}^{(0)}(k+t) = x^{(1)}(k+t) - x^{(1)}(k) = (e^{-a} - 1) \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{ak} \quad (15)$$

Полученная модель прогнозирования представляет собой сглаженную экспоненциальную кривую, которая снижает неопределенность исходных данных [1].

Точность прогноза может быть оценена с помощью сравнения прогнозных значений с реальными данными, которые становятся доступными после периода прогнозирования. Также в первоисточнике, автор приводит методику построения улучшенной модели прогнозирования, которая позволяет устранить неотъемлемые отклонения от традиционной модели и расширить диапазон ее применения [1]. Недостатком улучшенной модели прогнозирования является невозможность предсказания на ее основе уровня неопределенности данных [1]. Построение улучшенной модели прогнозирования может быть выполнено на основе параметров a и u , уже использовавшихся ранее:

$$\eta = \ln \frac{2-a}{2+a}, M = \frac{2u}{2+a}. \tag{16}$$

На основе найденных параметров η и M улучшенная модель прогнозирования будет иметь вид:

$$\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1); \tag{17}$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = M * e^{-\eta(k-1)}, k = 2, 3, \dots, n. \tag{18}$$

В целях полноты анализа получаемых результатов в рамках проведенного исследования использованы как традиционная так и улучшенная модели прогнозирования.

Прогнозирование количества выявленных уязвимостей с использованием традиционной и улучшенной моделей прогнозирования на основе сведений базы данных уязвимостей CVE. Определим последовательность исходных данных:

$$x^{(0)} = \{3245, 4590, 5150, 4822, 4807, 5011, 4170, 4387, 4415, 5005, 5541, 5200, 6015, 6365, 6448, 6231\}$$

По формуле (2) рассчитаем коэффициенты гладкости данных, и сведем их в табл. 2:

Таблица 2. Рассчитанные коэффициенты сглаженности данных
Table 2. Calculated data smoothing coefficients

k	$\beta(k)$
3	0,8913
4	1,0680
5	1,003
6	0,9592
7	1,2016
8	0,9505
9	0,9936
10	0,8821
11	0,9032
12	1,0655
13	0,8645
14	0,9450
15	0,9871
16	1,0348

Диапазон значений заданного набора исходных данных с некоторой погрешностью входит в необходимый диапазон значений $\beta(k) \in [0.88, 1.12]$.

В целях максимального сохранения объема исходных данных примем, что все значения удовлетворяют требованиям, и не требуют дополнительной обработки перед использованием.

На основе формул (3) и (4) сгенерируем новую последовательность данных:

$$x^{(1)} = \{3245, 7835, 12985, 17807, 22614, 27625, 31795, 36182, 40597, 45602, 51143, 56343, 62358, 68723, 75171, 81402\}$$

Результаты проверки подчинения изменения величин сгенерированной последовательности $x^{(1)}$ экспоненциальному закону распределения (5) приведем в табл. 3: Полученные значения $\sigma^{(1)}(k)$ (табл. 3), а также пояснения к (5) позволяют сделать следующий вывод: исходные данные могут быть положены в основу построения «серой модели» прогнозирования.

Таблица 3. Проверка подчинения сгенерированной последовательности $x^{(1)}$ экспоненциальному закону распределения
Table 3. Checking the subordination of the generated sequence $x^{(1)}$ to the exponential distribution law

k	$\sigma^{(1)}(k)$
3	1,6573
4	1,3713
5	1,2699
6	1,2215
7	1,1509
8	1,1379
9	1,1220
10	1,1232
11	1,1215
12	1,1016
13	1,1067
14	1,1020
15	1,0938
16	1,0828

Произведем генерацию последовательности на основе $x^{(1)}$ (8):

$$Z^{(1)} = \{5540, 10410, 15396, 20210, 25119, 29710, 33988, 38389, 43101, 48374, 53743, 59350, 65540, 71947, 78286\}$$

На основе полученных данных сформируем матрицы:

$$\begin{bmatrix} 4590 \\ 5150 \\ 4822 \\ 4807 \\ 5011 \\ 4170 \\ 4387 \\ 4415 \\ 5005 \\ 5541 \\ 5200 \\ 6015 \\ 6365 \\ 6448 \\ 6231 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5540 & 1 \\ -10410 & 1 \\ -15396 & 1 \\ -20210 & 1 \\ -25119 & 1 \\ -29710 & 1 \\ -33988 & 1 \\ -38389 & 1 \\ -43101 & 1 \\ -48374 & 1 \\ -53743 & 1 \\ -59350 & 1 \\ -65540 & 1 \\ -71947 & 1 \\ -78286 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$$

$$Y_n = [4590, 5150, 4822, 4807, 5011, 4170, 4387, 4415, 5005, 5541, 5200, 6015, 6365, 6448, 6231]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -5540 & 1 \\ -10410 & 1 \\ -15396 & 1 \\ -20210 & 1 \\ -25119 & 1 \\ -29710 & 1 \\ -33988 & 1 \\ -38389 & 1 \\ -43101 & 1 \\ -48374 & 1 \\ -53743 & 1 \\ -59350 & 1 \\ -65540 & 1 \\ -71947 & 1 \\ -78286 & 1 \end{bmatrix}$$

На основе формулы (13), получаем значения коэффициента регрессии $a = -0,026$ и коэффициента согласованности $u = 4178$. Подставив значения в формулу (15), получаем набор прогнозируемых значений, рассчитанных на основе традиционной модели прогнозирования (табл.4).

Таблица 4. Прогноз количества выявленных уязвимостей на основе традиционной модели
Table 4. Prediction of the number of identified vulnerabilities according to the traditional model

Квартал, год/ Quarter, year	Количество выявленных уязвимостей/ Number of identified vulnerabilities	Прогноз количества выявленных уязвимостей/ Forecast of the number of identified vulnerabilities
1, 2019	3245	4431
2, 2019	4091	4547
3, 2019	5150	4666
4, 2019	4822	4788
1, 2020	4807	4913
2, 2020	5011	5042
3, 2020	4170	5174
4, 2020	4387	5309
1, 2021	4415	5448
2, 2021	5005	5591
3, 2021	5541	5737
4, 2021	5200	5888
1, 2022	6015	6042
2, 2022	6365	6200
3, 2022	6448	6362
4, 2022	6231	6529
1, 2023	-	6700
2, 2023	-	6875
3, 2023	-	7055
4, 2023	-	7240
1, 2024	-	7429
2, 2024	-	7624
3, 2024	-	7823
4, 2024	-	8028

Построение улучшенной модели может быть произведено на основе параметров a , u , полученных ранее (16-18).

Воспользовавшись указанными параметрами, построим усовершенствованную модель:

$$\eta = \ln \frac{2 - a}{2 + a} = -0,0260015; \quad M = \frac{2u}{2 + a} = 4233,02938.$$

$$\hat{x}^{(0)}(1) = 3245;$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = 4233,02938 * e^{0,0260015 * (k-1)}, \quad k = 2, 3, \dots, n.$$

Произведем прогнозирование на основе полученной усовершенствованной модели (табл. 5).

Для сравнения результатов, получаемых на основе применения построенных «серых моделей» и известных методов прогнозирования, дополнительно построена модель прогнозирования на основе метода линейной регрессии, реализованного в библиотеке машинного обучения scikit-learn.

Обучение модели происходило на тех же исходных данных, что и при построении «серых моделей».

В результате применения обученной модели прогнозирования на основе линейной регрессии получен прогноз количества выявленных уязвимостей, представленный в табл. 6.

Таблица 5. Прогноз количества выявленных уязвимостей на основе усовершенствованной модели**Table 5. Forecast of the number of identified vulnerabilities according to the improved model**

Квартал, год/Quarter, year	Количество выявленных уязвимостей/ Number of identified vulnerabilities	Прогноз количества выявленных уязвимостей/ Forecast of the number of identified vulnerabilities
1, 2019	3245	3245
2, 2019	4091	4345
3, 2019	5150	4459
4, 2019	4822	4576
1, 2020	4807	4697
2, 2020	5011	4821
3, 2020	4170	4948
4, 2020	4387	5078
1, 2021	4415	5212
2, 2021	5005	5349
3, 2021	5541	5490
4, 2021	5200	5635
1, 2022	6015	5783
2, 2022	6365	5935
3, 2022	6448	6092
4, 2022	6231	6252
1, 2023	-	6417
2, 2023	-	6586
3, 2023	-	6759
4, 2023	-	6938
1, 2024	-	7120
2, 2024	-	7308
3, 2024	-	7500
4, 2024	-	7698

Таблица 6. Прогноз количества выявленных уязвимостей с использованием метода линейной регрессии**Table 6. Prediction of the number of identified vulnerabilities using linear regression**

Квартал, год/Quarter, year	Количество выявленных уязвимостей/ Number of identified vulnerabilities	Прогноз количества выявленных уязвимостей/ Forecast of the number of identified vulnerabilities
1, 2019	3245	3974
2, 2019	4091	4122
3, 2019	5150	4271
4, 2019	4822	4419
1, 2020	4807	4568
2, 2020	5011	4716
3, 2020	4170	4865
4, 2020	4387	5013
1, 2021	4415	5162
2, 2021	5005	5310
3, 2021	5541	5459
4, 2021	5200	5607
1, 2022	6015	5755
2, 2022	6365	5904
3, 2022	6448	6053
4, 2022	6231	6201
1, 2023	-	6350
2, 2023	-	6498
3, 2023	-	6647
4, 2023	-	6795
1, 2024	-	6944
2, 2024	-	7092
3, 2024	-	7241
4, 2024	-	7389

Обсуждение результатов. В целях проведения сравнительного анализа результатов прогнозирования, полученных с помощью традиционной и улучшенной «серой модели» прогнозирования, а также модели прогнозирования на основе линейной регрессии, разместим их в одной координатной плоскости и представим в виде графика (рис. 1).

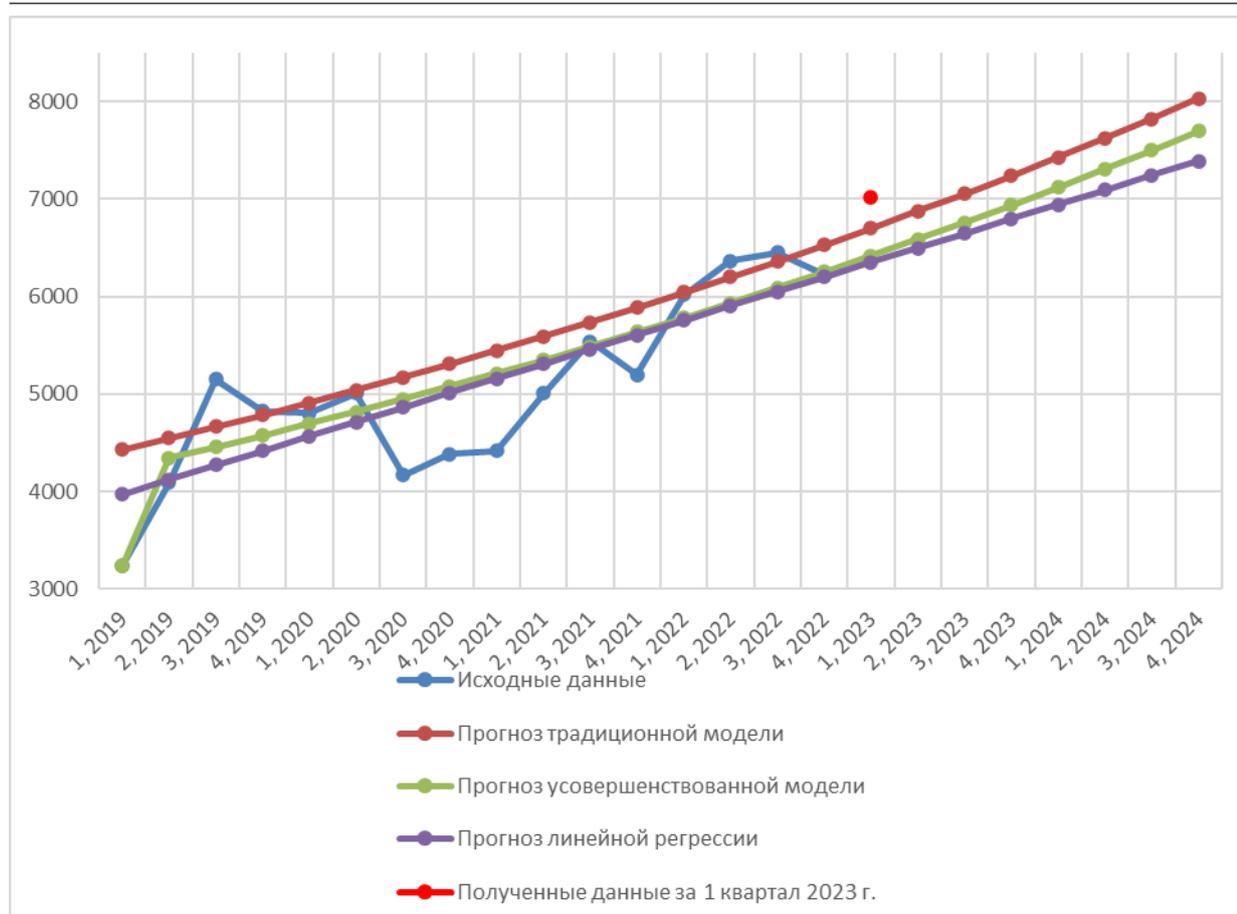


Рис. 1. График с результатами прогнозирования (расчет по данным CVE).

Fig. 1. A graph with the results of forecasting (calculation based on CVE data).

В результате анализа полученных в ходе прогнозирования значений, установлено: тенденция роста количества выявляемых уязвимостей в будущем будет сохранена; построенные модели прогнозирования содержат схожий тренд. Прогнозирование с применением метода линейной регрессии позволило получить схожие результаты с применением моделей, построенных на основе теории «серых систем».

Возможно, что при использовании большего числа данных в будущем качество прогнозирования может быть повышено.

Следует отметить, полученный прогноз основывается лишь на значениях исходных данных и не зависит от обстоятельств, возникающих в сфере информационной безопасности, что является явным недостатком приведенной методики.

Кроме указанного недостатка применение разработанных моделей на основе теории «серых систем» возможно только для краткосрочного прогнозирования и не позволяет получать ретроспективные данные, о чем свидетельствует график на рис. 1.

Согласно данным за 1 квартал 2023 года опубликована информация о 7015 выявленных уязвимостях [3]. Ближе всего к этому значению оказался прогноз данных традиционной «серой моделью» (6700).

Вывод. В случае отсутствия более точной методики прогнозирования приведенный в работе математический аппарат может быть использован для проведения прогноза при отсутствии информации о факторах, влияющих на изучаемые процессы.

Произведено прогнозирование количества уязвимостей на ближайшие два года. Но, как было сказано ранее, факторы, которые могут оказать серьезное воздействие на количество выявляемых уязвимостей в этот период времени, при проведении прогнозирования не учитываются. Построение прогноза на основе сведений, полученных от других компетентных организаций в области информационной безопасности, может дать отличающийся результат из-за сильного различия исходных данных [7,9,10].

Таким образом, использование теории «серых систем» для решения задач в области информационной безопасности требует проведения дальнейших исследований.

Библиографический список:

1. Ван, Ю. Прогнозирование объемов перевозок пассажиров на основе теории «серых систем» / Ю. Ван // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2021. – № 1(42). – С. 77-81. – EDN OKGSXG.
2. Deng, J. L. Introduction to grey system theory / J. L. Deng // J Grey System. - 1989; 1:1-24.
3. Common Vulnerabilities and Exposures. URL: <https://cve.mitre.org/> (дата обращения: 01.03.2023).
4. Bindhu, B. K. Application of grey system theory on the influencing parameters of aerobic granulation in SBR / B. K. Bindhu, G. Madhu // Environ Technol. - 2017. - Sep; 38(17):2143-2152.
5. Дровникова И.Г., Етепнев А.С., Рогозин Е.А. Основные виды уязвимостей и взаимосвязь компонентов безопасности при обосновании показателей надёжности системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 3. С. 59–64.
6. Кубарев, А. В. Подход к формализации уязвимостей информационных систем на основе их классификационных признаков / А. В. Кубарев // Вопросы кибербезопасности. – 2013. – № 2(2). – С. 29-33. – EDN SZEDHH.
7. База данных уязвимостей. ФСТЭК России. URL: <https://bdu.fstec.ru/vul> (дата обращения: 04.03.2023).
8. Коноваленко, С. А. Выявление уязвимостей информационных систем посредством комбинированного метода анализа параметрических данных, определяемых системами мониторинга вычислительных сетей / С. А. Коноваленко, И. Д. Королев // Альманах современной науки и образования. – 2016. – № 11(113). – С. 60-66. – EDN XEEDXH.
9. Карты источников, содержащих сведения об уязвимостях программного обеспечения / А. Л. Сердечный, М. А. Тарелкин, А. А. Ломов, К. В. Симонов // Информация и безопасность. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 411-422. – EDN ZOUMGN.
10. Федорченко, А. В. Исследование открытых баз уязвимостей и оценка возможности их применения в системах анализа защищенности компьютерных сетей / А. В. Федорченко, А. А. Чечулин, И. В. Котенко // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 5(72). – С. 72-79. – EDN SXXXXH.
11. Сердечный А.Л., Герасимов И.В., Макаров О.Ю и др. Технология выявления сведений об уязвимостях сторонних компонентов программного обеспечения с открытым исходным кодом. Информация и безопасность. 2020, т. 23, № 3, с. 347–364. DOI: <http://dx.doi.org/10.36622/VSTU.2020.23.3.003>. – EDN PUXOUT.
12. Аветисян А.И., Белеванцев А.А., Чукаев И.И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения. Вопросы кибербезопасности. 2014, № 3(4), с. 20–28. – EDN SSYPXV.
13. Russell R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning. 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. 2018, p. 757–762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
14. Wang T., Wei T., Gu G. and Zou W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection. IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA. 2010, p. 497–512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>.
15. Lin G., Wen S., Han Q. -L., Zhang J. and Xiang Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey in Proceedings of the IEEE. Oct. 2020, vol. 108, no. 10, p. 1825–1848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.

References:

1. Wang, Yu. Forecasting passenger traffic volumes based on the theory of “gray systems” *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2021;1(42): 77-81. – EDN OKGSXG. (In Russ)
2. Deng, J. L. Introduction to grey system theory. *J Grey System*. 1989; 1:1-24.
3. Common Vulnerabilities and Exposures. URL: <https://cve.mitre.org/> // (accessed 01.03.2023).
4. Bindhu, B. K. Application of grey system theory on the influencing parameters of aerobic granulation in SBR / B. K. Bindhu, G. Madhu. *Environ Technol*. 2017; 38(17):2143-2152.
5. Drovnikova I.G., Etepnev A.S., Rogozin E.A. Main types vulnerabilities and the relationship of security components in substantiating the reliability indicators of the information protection system against unauthorized access in automated systems. *Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2019; 3: 59-64. (In Russ)
6. Kubarev, A.V. Approach to formalization of vulnerabilities of information systems based on their classification features. *Issues of cybersecurity*. 2013;2(2):29-33. – EDN SZEDHH. (In Russ)

7. Vulnerability database. FSTEC of Russia. URL: <https://bdu.fstec.ru/vul> (accessed: 03/04/2023).
8. Konovalenko, S. A. Identification of vulnerabilities of information systems by means of a combined method of analysis of parametric data determined by monitoring systems of computer networks. S. A. Konovalenko, I. D. Korolev. *Almanac of modern science and education*. 2016;1(113): 60-66. – EDN XEEDXH. (In Russ)
9. Maps of sources containing information about software vulnerabilities. A. L. Serdny, M. A. Tarelkin, A. A. Lomov, K. V. Simonov. *Information and security*. 2019; 22(3): 411-422. – EDN ZOUMGN. (In Russ)
10. Fedorchenko, A.V. Research of open databases of vulnerabilities and assessment of the possibility of their application in systems of security analysis of computer networks / A.V. Fedorchenko, A. A. Chechulin, I. V. Kotenko. *Information and control systems*. 2014; 5(72): 72-79. – EDN SXXXXH. (In Russ)
11. Serdechnyj A.L., Gerasimov I.V., Makarov O.YU. i dr. Technology for identifying information about vulnerabilities of third-party components of open source software. *Informaciya i bezopasnost'*. 2020;. 23(3):347–364 – EDN PYXOUT. (In Russ)
12. Avetisyan A.I., Belevancev A.A., Chuklyaev I.I. Technologies of static and dynamic analysis of software vulnerabilities. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2014; 3(4): 20–28 – EDN SSYPXV. (In Russ)
13. Russell R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning. 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. 2018; 757–762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
14. Wang T., Wei T., Gu G. and Zou W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection. IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA. 2010; 497–512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>.
15. Lin G., Wen S., Han Q. -L., Zhang J. and Xiang Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey in Proceedings of the IEEE. Oct. 2020;108(10):1825–1848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.

Сведения об авторах:

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

Мишин Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; samishin@bk.ru

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

Information about authors:

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

Mishin Sergey Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; samishin@bk.ru

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 05.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.07.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 31.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.942

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-83-91



Оригинальная статья /Original article

**Экспресс – метод формирования представительной экспертной коалиции
на основе расширенной корреляционной матрицы**

Р. А. Жилин

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка эффективного экспресс-метода по формированию представительной экспертной коалиции на основе анализа корреляционных связей между мнениями экспертов. **Метод.** Предлагается использовать расширенную корреляционную матрицу, которая учитывает не только силу корреляционной связи между выставленными оценками экспертов, но и среднее значение оценок по всему множеству высококвалифицированных специалистов. Данная матрица позволит учесть разнообразие мнений и предпочтений высококвалифицированных специалистов, а также обеспечит высокую степень представительности в принятии коллективных решений. **Результат.** Верификация полученных результатов осуществлена на примере опросов сотрудников полиции в отношении нарушителей систем безопасности. Значительный объем различных вычислений определяет реализацию разработанного численного метода с использованием ЭВМ. Данный экспресс – метод является полезным инструментом для быстрого и эффективного формирования представительных экспертных коалиций и принятия решений на основе мнений большого числа высококвалифицированных специалистов. **Вывод.** Предложенный метод может быть применим в различных научно-технических областях, таких как экспертные системы, многокритериальное принятие решений, оценка рисков и других ситуациях, где требуется объединение мнений большого числа экспертов.

Ключевые слова: представительная экспертная коалиция, экспресс-метод, группа экспертов, расширенная корреляционная матрица, компьютерная программа, высококвалифицированный специалист.

Для цитирования: Р.А. Жилин. Экспресс – метод формирования представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):83-91. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-83-91

Express - a method of forming a representative expert coalition based on an extended correlation matrix

R. A. Zhilin

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop an effective express method for the formation of a representative expert coalition based on the analysis of correlations between expert opinions. **Method.** It is proposed to use an extended correlation matrix, which takes into account not only the strength of the correlation between the experts' ratings, but also the average value of the ratings for the entire set of highly qualified specialists. This matrix will take into account the diversity of opinions and preferences of highly qualified specialists, as well as provide a high degree of representativeness in making collective decisions. **Result.** Verification of the obtained results was carried out on the example of polls of police officers in relation to violators of security systems. A significant number of various calculations determines the implementation

of the developed numerical method using a computer. This express method is a useful tool for the rapid and efficient formation of representative expert coalitions and decision-making based on the opinions of a large number of highly qualified specialists. **Conclusion.** The proposed method can be applied in various scientific and technical fields, such as expert systems, multi-criteria decision making, risk assessment, and other situations where it is necessary to combine the opinions of a large number of experts.

Keywords: representative expert coalition, express method, group of experts, extended correlation matrix, computer program, highly qualified specialist.

For citation: R.A. Zhilin. Express is a method of forming a representative expert coalition based on an extended correlation matrix. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (3): 83-91. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-3-83-91

Введение. Экспертные группы являются важным инструментом в решении сложных вопросов и проблем, требующих специализированных знаний и опыта [1-3].

Однако, существуют ситуации, когда многочисленная экспертная группа может столкнуться с рядом проблем, таких, например, как разногласия в мнениях и затруднения в принятии решений. В таких случаях актуальным может быть формирование представительной экспертной коалиции, состоящей из отдельных представителей или небольших групп, которые могут эффективно представлять интересы многочисленной экспертной группы [4 - 6].

В работе под представительной экспертной коалицией будем понимать малочисленную группу экспертов с высокой степенью согласованности, объединенную для решения определенной задачи, такой как принятие решений и т.д.

Одной из основных причин актуальности формирования представительной экспертной группы является упрощение процесса принятия решений.

В многочисленных экспертных группах мнения могут расходиться, что затрудняет принятие единого решения [7- 9]. Формирование представительной группы позволит сократить количество участников и сосредоточиться на наиболее значимых мнениях и точках зрения. Это способствует более быстрому и эффективному принятию решений, основанных на выработке консенсуса между представителями экспертной группы.

Однако, следует отметить, что сформированность представительной позиции может иметь свои ограничения и вызвать определенные сложности.

Например, процесс выбора представителей из многочисленной группы может быть сложным и спорным, а также возможны проблемы с объективностью и непредвзятостью ее представителей [10 - 12].

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка эффективного экспресс-метода по формированию представительной экспертной коалиции на основе анализа корреляционных связей между мнениями экспертов.

Предлагается использовать расширенную корреляционную матрицу, которая учитывает не только силу корреляционной связи между выставленными оценками экспертов, но и среднее значение оценок по всему множеству высококвалифицированных специалистов. Данный метод позволит учесть разнообразие мнений и предпочтений высококвалифицированных специалистов, а также обеспечит высокую степень представительности в принятии коллективных решений.

Методы исследования. Основная идея численного метода заключается в учете не только силы корреляционной связи между мнениями экспертов, но и среднего значения оценок по всем экспертам. Это позволяет более точно и быстро определить представительность экспертов, учитывая их отклонения от общего среднего мнения.

Разработанный численный метод может быть полезным инструментом для быстрого и эффективного формирования представительных экспертных коалиций и принятия решений на основе мнений большого числа высококвалифицированных специалистов.

Экспресс-метод формирования представительной экспертной коалиции на основе

расширенной корреляционной матрицы состоит из нескольких этапов.

1. Сначала производится сбор мнений экспертов. Собираются данные от экспертов, включающие их оценки и предпочтения по заданной проблеме. Оценки могут быть числовыми или категориальными, в зависимости от характера проблемы [13, 14, 15].

По результатам опроса формируется матрица X размером $M \times N$:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & x_{ij} & \dots \\ x_{M1} & \dots & \dots & \dots & x_{MN} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где:

N – общее количество высококвалифицированных специалистов;

M – общее количество критериев оценивания;

x_{ij} – оценка j -ым высококвалифицированным специалистом i -того критерия оценивания.

2. После чего формируется исходная корреляционная матрица. Для этого могут использоваться различные методы, такие как коэффициент корреляции Пирсона или Спирмена:

$$\bar{r}_j = \frac{n \sum yx - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}. \quad (2)$$

3. Затем корреляционная матрица расширяется путем добавления среднего значения оценок экспертов по всему множеству высококвалифицированных специалистов. Это позволяет учесть общее мнение экспертов и его влияние на корреляционные связи.

Составляется вектор-столбец средних значений оценок экспертов по всему множеству высококвалифицированных специалистов:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \dots \\ \bar{x}_M \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}}{N}; \quad (4)$$

4. Далее производится анализ расширенной корреляционной матрицы с использованием различных алгоритмов или статистических методов для выделения группы экспертов с высокой силой корреляционной связи. Это могут быть, например, методы кластерного анализа, факторного анализа или другие подходы, в зависимости от специфики исследования [16 - 18].

На основе матрицы X построим корреляционную матрицу R размером $(N+1) \times N$, анализ которой позволит исключить из рассмотрения экспертов, не являющихся согласованными

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ \dots & 1 & \dots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & 1 & r_{NN} \\ \frac{1}{r_1} & \frac{1}{r_2} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

5. На последнем этапе формируется представительная экспертная коалиция, включающая экспертов с наиболее высокой силой корреляционной связи и/или близостью к среднему значению оценок по всем экспертам. Таким образом, формируется компактная и представительная группа экспертов, способная эффективно вырабатывать решения на основе анализа корреляционных связей между их мнениями.

Ранжируем значения последней строки расширенной корреляционной матрицы и сформируем вектор-строку (r_j). Для формирования представительной экспертной коалиции необходимо исключить несогласованных высококвалифицированных специалистов, которые не удовлетворяют условию $\bar{r}_i > 0,7$ матрицы R ($0,7$ – пороговое значение \bar{r}_i для решения задачи по формированию представительной экспертной коалиции).

Процедура оценки представительности сформированной экспертной коалиции может быть выполнена путем сравнения полученного результата с идеальным составом коалиции. Предложенный метод имеет ряд преимуществ, таких как быстрота и эффективность в формировании представительной экспертной коалиции из большого множества мнений экспертов. Он также учитывает как силу корреляционной связи между мнениями экспертов, так и их близость к среднему значению множества оценок. Может быть использован в различных областях, где требуется объединение мнений высококвалифицированных специалистов для принятия окончательного решения.

Обсуждение результатов. Отличительные особенности разработанного численного метода:

1. Предложенный метод является быстрым и эффективным способом формирования представительной экспертной коалиции, что позволяет сэкономить время и ресурсы при принятии коллективных решений.
2. Разработанный метод учитывает важность экспертов на основе анализа их связей и взаимодействий в расширенной корреляционной матрице. Это позволяет выделить более представительных экспертов и включить их в экспертную коалицию, что способствует более компетентному принятию коллективных решений.
3. Представительность группы экспертов обеспечивает более широкое понимание исследуемой проблемы, а распределение представительных мест в коалиции способствует легитимности и приемлемости принимаемых решений.
4. Данный метод позволяет минимизировать потерю информации при формировании представительной экспертной коалиции.
5. Использование расширенной корреляционной матрицы, которая включает среднее значение оценок всех высококвалифицированных специалистов, позволит учесть общее мнение множества экспертов, что повысит качество и достоверность принятых решений.
6. Метод может быть применим в различных научно-технических областях, таких как экспертные системы, многокритериальное принятие решений, оценка рисков и других ситуациях, где требуется объединение мнений большого числа экспертов.
7. Следует отметить, что разработанный численный метод имеет и некоторые ограничения. Например, качество и точность результатов зависят от качества исходных данных, собранных от экспертов, и выбранных методов анализа и оценки.
8. Определение порогового значения компетентности экспертов может быть субъективным, что требует обоснования.

Верификация данных. Для подтверждения эффективности и точности предложенного численного метода были проведены вычислительные эксперименты на реальных данных с использованием анализа корреляционных связей между мнениями экспертов. Верификация полученных результатов осуществлена на примере опросов сотрудников полиции в отношении нарушителей систем безопасности [19 - 21].

Значительный объем различных вычислений определяет реализацию разработанного численного метода с использованием ЭВМ.

С этой целью была разработана компьютерная программа по формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы. Основой для разработки компьютерной программы является подход к формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы, реализованный на языке программирования Delphi. Рассмотрим порядок работы с

компьютерной программой по формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы.

После активации запускового ярлыка с названием компьютерной программы появится приветственное окно (рис. 1).



Рис. 1. Приветственное окно компьютерной программы по формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы

Fig. 1. Welcome window of the computer program for the formation of a representative expert coalition based on the extended correlation matrix

После запуска компьютерной программы по формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы ее пользователь указывает количество оцениваемых критериев и количество участников экспертной группы.

Также в данной компьютерной программе существует возможность загрузки входных данных из внешнего файла нажатием кнопки «Вставить данные опроса экспертов из файла». Интерфейс ввода данных компьютерной программы (рис. 2).

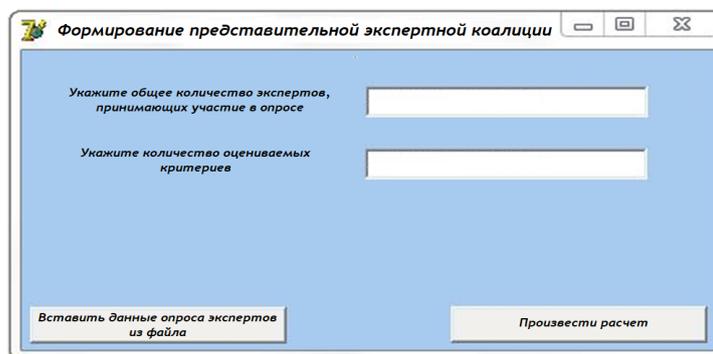


Рис. 2. Интерфейс ввода данных компьютерной программы по формированию представительной экспертной коалиции на основе расширенной корреляционной матрицы

Fig. 2. Data input interface of a computer program for the formation of a representative expert coalition based on an extended correlation matrix

Как только все необходимые для проведения вычислительного эксперимента данные указаны, ее пользователю необходимо нажать кнопку «Произвести расчет». Данная функция становится активна только после заполнения вычислительных параметров.

Далее компьютерная программа формирует представительную высокосогласованную экспертную группу с максимальным количеством высококвалифицированных специалистов и выводит полученные результаты на экран.

Разработанный программный продукт позволяет:

- 1) Быстро и эффективно сформировать представительную экспертную коалицию с наибольшим количеством экспертов и максимальным значением коэффициента корреляции;
- 2) Рассчитать количество специалистов, входящих в состав представительной коалиции;

- 3) Уточнить номера высококвалифицированных специалистов, входящих в состав представительной коалиции с наибольшим уровнем согласованности;
- 4) Рассчитать среднее значение коэффициента корреляции в представительной коалиции с наибольшим уровнем согласованности.

Вычислительный эксперимент на примере малочисленной экспертной группы из двадцати высококвалифицированных специалистов (табл. 1).

Таблица 1. Данные о сформированных представительных коалициях экспертов на примере малочисленной экспертной группы из двадцати высококвалифицированных специалистов

Table 1. Data on the formed representative coalitions of experts on the example of a small expert group of twenty highly qualified specialists

Опрос сотрудников полиции в отношении нарушителей систем безопасности/Survey of police officers regarding violators of security systems	Н а р у ш и т е л ь систем безопасности с террористическими целями/violator of security systems with terrorist purposes	Нарушитель систем безопасности общекриминальной направленности/ general criminal security system violator	Нарушитель систем безопасности в сфере критической информационной инфраструктуры/ violator of security systems in the field of critical information infrastructure
Тип коалиции/ Coalition type	Представительная/ Representative		
Общее количество экспертов, принимавших участие в оценке признаков нарушителей систем безопасности/ Total number of experts who took part in assessing the signs of security system violators	20	20	20
Значение коэффициента конкордации Кендалла для экспертной группы из 20 специалистов/ The value of the Kendall concordance coefficient for an expert group of 20 specialists	0,212	0,234	0,394
Количество этапов расчета до формирования представительной коалиции/ Number of calculation stages before the formation of a representative coalition	3	3	3
Количество специалистов, входящих в состав представительной коалиции/ Number of specialists included in the representative coalition	3	7	9
Среднее значение коэффициента корреляции (\bar{r}) в сформированной представительной коалиции/ The average value of the correlation coefficient (\bar{r}) in formed representative coalition	0,842	0,847	0,844
Значение коэффициента конкордации Кендалла для представительной коалиции/ The value of the Kendall concordance coefficient for a representative coalition	0,768	0,718	0,736

Вычислительный эксперимент на примере многочисленной экспертной группы из семидесяти двух высококвалифицированных специалистов (табл. 2).

Результаты вычислительных экспериментов подтвердили эффективность и применимость разработанного численного метода, особенно в случаях, когда требуется быстрое формирование представительной экспертной коалиции.

Вывод. Использование методов корреляционного анализа в задачах теории принятия решений позволяет оценить согласованность мнений экспертов, что влияет на достоверность решений, основанных на экспертных опросах.

Таблица 2. Данные о сформированных представительных коалициях экспертов на примере многочисленной экспертной группы из семидесяти двух высококвалифицированных специалистов

Table 2. Data on the formed representative coalitions of experts on the example of a large expert group of seventy-two highly qualified specialists

Опрос сотрудников полиции в отношении нарушителей систем безопасности/Survey of police officers regarding violators of security systems	нарушитель систем безопасности с террористическими целями/violator of security systems with terrorist purposes	нарушитель систем безопасности об-щекриминальной направленности/general criminal security system violator	нарушитель си-стем безопасности в сфере критической информационной инфраструктуры/violator of security systems in the field of critical information infrastructure
Тип коалиции/ Coalition type	Представительная/ representative		
Общее количество экспертов, принимавших участие в оценке признаков нарушителей систем безопасности/ Total number of experts who took part in assessing the signs of security system violators	72	72	72
Значение коэффициента конкордации Кендалла для экспертной группы из 72 специалистов/ The value of the Kendall concordance coefficient for an expert group of 72 specialists	0,120	0,220	0,310
Количество этапов расчета до формирования представительной коалиции/ Number of calculation stages before the formation of a representative coalition	3	3	3
Количество специалистов, входящих в состав представительной коалиции/ Number of specialists included in the representative coalition	6	11	26
Среднее значение коэффициента корреляции (\bar{r}_j) в сформированной представительной коалиции/ The average value of the correlation coefficient () in formed representative coalition	0,734	0,753	0,718
Значение коэффициента конкордации Кендалла для представительной коалиции/ The value of the Kendall concordance coefficient for a representative coalition	0,716	0,738	0,726

Расширенная корреляционная матрица, которая содержит коэффициенты корреляции между всеми парами переменных, измеренных в количественной шкале, используется для анализа связей между оценками экспертов. Коэффициент корреляции может использоваться в качестве меры значимости каждого эксперта, отражая его компетентность. В ходе проведения вычислительных экспериментов были получены расширенные корреляционные матрицы для трех видов нарушителей систем безопасности. Предложенный метод может быть применен в различных научно-технических областях, где требуется формирование представительной экспертной коалиции для решения сложно структурированных проблем.

Однако, он также имеет ограничения, связанные с качеством данных и субъективностью определения пороговых значений. Дальнейшие исследования помогут дополнить разработанную методику формирования представительной коалиции и расширить ее применение в различных областях научно-технической деятельности.

Библиографический список:

1. Загорская, А. В. Применение методов экспертной оценки в научном исследовании. Необходимое количество экспертов. / А. В. Загорская, А. А. Лапидус // Строительное производство. – 2020 – №3 – С. 21-34.
2. Duda, R. O. Expert systems Research / R. O. Duda. – N. Y. : Science – 1983. – 261 p.
3. Haocheng, T. A brief history and technical review of the expert system research / T. Haocheng // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2017. – № 242. 012111.
4. Рупосов, В.Л. Методы определения количества экспертов / В. Л. Рупосов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 3(98). – С. 286-292.
5. Oravec, J. A. Expert systems and knowledge-based engineering (1984-1991): implications for instructional systems research / J. A. Oravec // International Journal of Designs for learning. – 2014. – № 5. – Т. 2. – С. 66-75.
6. Avolio, G. Applications of advanced data analysis and expert system technologies in the atlas trigger – daq controls framework / G. Avolio, A.C. Radu, A. Kazarov, G. Lehmann Miotto, L. Magnoni // Journal of Physics : Conference Series. – 2012. – Т. 396 (1). – P.
7. Постников, В.М. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений / В. М. Постников // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 5. – С. 23.
8. Moore, R. L. Expert systems in Real-Time Applications Experience and Opportunities, Expert systems Applications in Advanced Control / R. L. Moore. // Proceeding the Seventeenth Annual Advanced Control Conference – West Japan, 1999. – P. 555-558.
9. Старцев, А.В. Модели согласования экспертных оценок в процедурах группового выбора : дис.....канд. техн. наук: 05.13.01 / А.В. Старцев. – Воронеж, 2004.- 122 с.
10. Angeli, C. Diagnostic Expert Systems: From Expert's Knowledge to Real-Time Systems / C. Angeli // Advanced Knowledge Based Systems : Model, Applications & Research. – 2010. – № 1. – P. 50-73.
11. Mingers, J. Expert systems experiments with rule induction /J. Mingers // Journal of the Operational Research Society. – 1987. – Vol. 38. – P. 39-47.
12. Bramer, M. A. A Survey and Critical Review of Expert Systems (Michie D., ed) / M. A. Bramer. – London, New York : Gordon and Breach, 1982.
13. Мельников, А.В. Метод формирования коалиций экспертов в рамках решения задачи экспертизы альтернатив со слабоформализуемыми критериями / Мельников А.В., Щербакова И.В., Жилин Р.А. // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики // Сборник трудов Международной научной конференции. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 2020. С. 968-975.
14. Akhlyustin, S. B. Prediction of the integrated indicator of quality of a new object under the conditions of multicollinearity of reference data / S. B. Akhlyustin, A. V. Melnikov, R. A. Zhilin. *Bulletin of the South Ural State University. Series : Mathematical Modelling, Programming and Computer Software.* – 2020. – Т. 13. – № 4. – P. 66-80.
15. Melnikov, A. V. Method of forming expert coalitions in the context of solving the expertise problem of alternatives with weakly formalized criteria / A. V. Melnikov, I. V. Shcherbakova, R. A. Zhilin // J. Phys. : Conf. Ser. 2020 1479012071.
16. Конобеевских, В.В. Статистические методы экспертных систем оценки качества радиотехнических приборов уголовно-исполнительной системы [Текст]: дис.....канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 22.09.2006 / Конобеевских Владимир Валерьевич. – Воронеж, 2006. – 182 с.
17. Навоев, В.В. Экспертно-статистический метод оценки характеристик информационно-измерительных систем [Текст]: дис.....канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 23.12.2003 / Навоев Виктор Владимирович. – Воронеж, 2003. – 164 с.
18. Кирюхин, С. М. Экспертные методы при оценке качества тканей / С. М. Кирюхин, С. В. Плеханова // Дизайн и технологии. – 2019. – № 71(113). – С. 63-70.
19. Жилин, Р.А. К вопросу о классификации нарушителей безопасности охраняемых объектов / Р.А. Жилин, И.В. Щербакова // Охрана, безопасность, связь, 2019. – № 4-2 (4). – С. 115-120.
20. Жилин, Р.А. Особенности использования программы для формирования высокосогласованных групп экспертов на основе численного метода предварительной экспертизы / Р. А. Жилин. // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2022. – № 1. – С. 40–45.
21. Жилин, Р.А. Численный метод оценки необходимости использования альтернативных коалиций при анализе интегральных показателей опасности нарушителей в сфере физической защиты объектов /

Р. А. Жилин, А. В. Мельников, И. В. Щербакова. // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2020. – № 3 – С. 45–52.

References

1. Zagorskaya A. V., Lapidus A. A. Application of peer review methods in scientific research. Required number of experts. Construction production, (2020); (3): 21-34. (In Russ)
2. Duda R.O. Expert Systems Research. Science, (1983); (220(4594)): 261-8.
3. Haocheng. T. A brief history and technical review of the expert system research. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017; 242: 012111.
4. Ruposov VL Methods for determining the number of experts. iPolytech Journal, 2015; 3 (98): 286-292. (In Russ)
5. Oravec J. A. Expert Systems and Knowledge-based Engineering (1984-1991). International Journal of Designs for Learning, 2014; 7.
6. Avolio G., Radu A., Kazarov A., Miotto G., Magnoni L. Applications of advanced data analysis and expert system technologies in the ATLAS Trigger-DAQ Controls framework. Journal of Physics Conference Series, (2012); (396): 2003.10.1088/1742-6596/396/1/012003.
7. Postnikov V. M. Analysis of approaches to the formation of the composition of an expert group focused on preparation and decision making. Mechanical engineering and computer technologies, 2012;05: 23. (In Russ)
8. Moore R.L. Expert Systems in Process Control: Applications Experience. In: Sriram, D., Adey, R. (eds) Applications of Artificial Intelligence in Engineering Problems. Springer, Berlin, Heidelberg. 1986.
9. A.V. Startsev, Models for the coordination of expert assessments in group selection procedures: dis cand. tech. Sciences: 05.13.01. Voronezh; 2004.
10. Angeli, C. Diagnostic Expert Systems: From Expert's Knowledge to Real-Time Systems. Advanced Knowledge Based Systems: Model, Applications & Research, 2010; 1.
11. Mingers J. Expert Systems—Experiments with Rule Induction [Internet]. Journal of the Operational Research Society 1987; 38 :39-47.
12. Bramer M. A. A Survey and Critical Review of Expert Systems. London, New York: Gordon and Breach; 1982.
13. Melnikov A.V., Shcherbakova I.V., Zhilin R.A. The method of forming coalitions of experts within the framework of solving the problem of examining alternatives with weakly formalizable criteria. Actual problems of applied mathematics, informatics and mechanics. Proceedings of the International Scientific Conference. 2020;968–75.
14. Akhlyustin S.B., Melnikov A.V., & Zhilin R.A. Prediction of the integrated indicator of quality of a new object under the conditions of multicollinearity of reference data. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming. 2020; 13(4):66-80.
15. Melnikov A. V., Shcherbakova I. V., Zhilin R. A. Method of forming expert coalitions in the context of solving the expertise problem of alternatives with weakly formalized criteria. J. Phys.: Conf. Ser. 2020 1479012071.
16. Konobeevsky, V.V. Statistical methods of expert systems for assessing the quality of radio engineering devices of the penitentiary system: dis cand. tech. Sciences: 05.13.18. Voronezh, 2006. (In Russ)
17. Navoev V.V. Expert-statistical method for assessing the characteristics of information-measuring systems: thesis.....cand. tech. Sciences: 05.13.18. Voronezh, 2003. (In Russ)
18. Kiryukhin S. M., Plekhanova S. V. Expert methods in assessing the quality of fabrics. Design and Technology.2019;(71(113): 63-70. (In Russ)
19. Zhilin R.A., Shcherbakova I.V. To the question of the classification of violators of the security of protected objects. Security, safety, communications, 2019;(4-2(4): 115-120. (In Russ)
20. Zhilin R.A. Features of using the program for the formation of highly coordinated groups of experts based on the numerical method of preliminary examination. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, 2022; 1: 40–45. (In Russ)
21. Zhilin R.A., Melnikov A.V., Shcherbakova I.V. Numerical method for assessing the need to use alternative coalitions in the analysis of integral indicators of the danger of violators in the field of physical protection. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, 2020; 3: 45–52. (In Russ)

Сведения об авторе:

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

Information about author:

Roman A. Zhilin, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer; zhilin99.zhilin@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 06.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reved 30.06.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 30.06.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 536.2 (075)

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-92-99



Оригинальная статья/ Original article

**Дополнительные функции и дополнительные краевые условия в задачах
теплопроводности для многослойных тел**

Р.М. Клеблеев

Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования состоит в разработке методики получения аналитического решения задачи теплопроводности для 2-х слойной пластины при граничных условиях 1-го рода. **Метод.** В основу метода исследования положен интегральный метод. При этом вводится дополнительная функция (ДФ), дополнительные краевые условия (ДКУ) и локальные системы координат. ДФ описывает температуру во времени в одной из точек двухслойной системы. Ее использование сводит уравнение в частных производных к обыкновенному уравнению. ДКУ позволяют выполнить уравнения на границах. **Результат.** Показано, что удовлетворение уравнений на границах приводит к их выполнению и внутри области. Отметим, что дополнительные краевые условия выполняются при любом другом методе получения аналитических решений. Отличие лишь в том, что они не принимаются в виде условий, подлежащих отдельному рассмотрению. Дополнительная функция также является величиной, которая определяется при любом другом методе получения решения. Отличие лишь в том, что она не выделяется для отдельного рассмотрения. **Вывод.** Можно констатировать, что введение дополнительной функции и дополнительных краевых условий не искажает исходную постановку задачи и является лишь средством для существенного упрощения процесса получения приближенного аналитического решения и окончательного выражения для него.

Ключевые слова: многослойные конструкции, дополнительная функция, ДКУ, интегральный метод, локальные координаты, приближенное решение.

Для цитирования: Р.М. Клеблеев. Дополнительные функции и дополнительные краевые условия в задачах теплопроводности для многослойных тел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):92-99. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-92-99

**Additional functions and additional boundary conditions in heat conduction problems
for multilayer bodies**

R.M. Klebleev

Samara State Technical University,
244 Molodogvardeyskaya St., Samara 443100, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop a technique for obtaining an analytical solution to the thermal conductivity problem for a 2-layer plate under boundary conditions of the 1st kind. **Method.** The research method is based on the integral method. In this case, an additional function (DF), additional boundary conditions (ABC) and local coordinate systems are introduced. The DF describes the temperature over time at one of the points of the two-layer system. Its use reduces the partial differential equation to an ordinary equation. DKUs allow you to perform equations on boundaries. **Result.** It is shown that satisfying the equations on the boundaries leads to their fulfillment inside the domain. Note that additional boundary conditions are satisfied for any other method of obtaining analytical solutions. The only difference is that they are not accepted as conditions subject to separate consideration. An additional function is also a

quantity that is determined by any other method of obtaining a solution. The only difference is that it is not singled out for separate consideration. **Conclusion.** It can be stated that the introduction of an additional function and additional boundary conditions does not distort the original formulation of the problem and is only a means to significantly simplify the process of obtaining an approximate analytical solution and the final expression for it.

Key words: multilayer structures, additional function, DKU, integral method, local coordinates, approximate solution.

For citation: R.M. Klebleev. Additional functions and additional boundary conditions in heat conduction problems for multilayer bodies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):92-99. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-92-99

Введение. При получении аналитических решений краевых задач для многослойных тел должны удовлетворяться условия сопряжения. Их получение затрудняется тем, что относительно собственных чисел получаются многопараметрические трансцендентные уравнения, решения которых находятся численными методами [2-4].

На основе обобщённых функций в работах [2-4] многослойное тело сводится к одному слою, имеющему переменные свойства, что позволяет исключить проблему выполнения условий сопряжения. В работах [5-7] решение задач для многослойных тел выполняется путем применения точных и приближенных методов при использовании координатных функций, удовлетворяющих условиям сопряжения. В конечном итоге решению подлежит алгебраический полином для нахождения собственных чисел. В настоящей работе используется метод, основанный на определении ДФ и ДКУ [8 - 18], а также локальных систем координат.

Постановка задачи. Цель исследования состоит в разработке методики получения аналитического решения задачи теплопроводности для 2-х слойной пластины при граничных условиях 1-го рода. Рассмотрим теплопроводность в двухслойной пластине в постановке вида (рис.1)

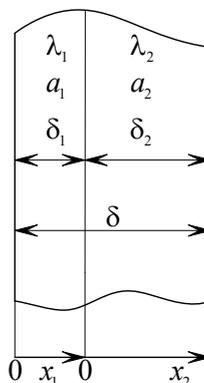


Рис. 1. Схема локальных координат
Fig. 1. Local coordinate scheme

$$\frac{\partial T_1(x_1, t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x_1, t)}{\partial x_1^2}; \quad (t > 0; \quad 0 < x_1 < \delta_1); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x_2, t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x_2, t)}{\partial x_2^2}; \quad (t > 0; \quad 0 < x_2 < \delta_2); \quad (2)$$

$$T_1(x_1, 0) = T_0; \quad (3)$$

$$T_2(x_2, 0) = T_0; \quad (4)$$

$$T_1(0, t) = T_{cr}; \quad (5)$$

$$T_1(\delta_1, t) = T_2(0, t); \quad (6)$$

$$\lambda_1 \partial T_1(\delta_1, t) / \partial x_1 = \lambda_2 \partial T_2(0, t) / \partial x_2 ; \quad (7)$$

$$\partial T_2(\delta_2, t) / \partial x_2 = 0 , \quad (8)$$

где $T_i, x_i, (i = 1, 2)$ – температура и координата; t – время; $\delta_i, a_i, \lambda_i, (i = 1, 2)$ – толщина, температуропроводность и теплопроводность; T_0 – начальная температура; $T_{ст}$ – температура стенки; $\delta = \delta_1 + \delta_2$.

Обозначим

$$\Theta_i = \frac{T_i - T_{ст}}{T_0 - T_{ст}}, (i = 1, 2) ; Fo = \frac{a_1 t}{\delta^2} ; \xi_1 = \frac{x_1}{\delta} ; \xi_2 = \frac{x_2}{\delta} ; \Delta_1 = \frac{\delta_1}{\delta} ; \Delta_2 = \frac{\delta_2}{\delta} , \quad (9)$$

где $\Theta_i, (i = 1, 2)$ – безразмерная температура; Fo – безразмерное время; ξ_1, ξ_2 – безразмерные координаты слоев; Δ_1, Δ_2 – безразмерные толщины каждого слоя.

С учётом (9) задача (1) – (8) будет

$$\frac{\partial \Theta_1(\xi_1, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta_1(\xi_1, Fo)}{\partial \xi_1^2} , (Fo > 0; 0 < \xi_1 < \Delta_1) ; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Theta_2(\xi_2, Fo)}{\partial Fo} = \frac{a_2}{a_1} \frac{\partial^2 \Theta_2(\xi_2, Fo)}{\partial \xi_2^2} , (Fo > 0; 0 < \xi_2 < \Delta_2) ; \quad (11)$$

$$\Theta_1(\xi_1, 0) = 1 ; \quad (12)$$

$$\Theta_2(\xi_2, 0) = 1 ; \quad (13)$$

$$\Theta_1(0, Fo) = 0 ; \quad (14)$$

$$\Theta_1(\Delta_1, Fo) = \Theta_2(0, Fo) ; \quad (15)$$

$$\lambda_1 \partial \Theta_1(\Delta_1, Fo) / \partial \xi_1 = \lambda_2 \partial \Theta_2(0, Fo) / \partial \xi_2 ; \quad (16)$$

$$\partial \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2 = 0 . \quad (17)$$

Методы исследования. Рассмотрим ДФ, представляющую температуру в точке $\xi_2 = \Delta_2$.

$$q(Fo) = \Theta_2(\Delta_2, Fo), \quad (18)$$

Решение разыскивается в виде

$$\Theta_1(\xi_1, Fo) = \sum_{k=1}^n b_k(q) \varphi_{1k}(\xi_1) ; (19) \quad \Theta_2(\xi_2, Fo) = \sum_{k=1}^n b_k(q) \varphi_{2k}(\xi_2), \quad (20)$$

где $b_k(q)$ – неизвестные коэффициенты; $\varphi_{1k}(\xi_1), \varphi_{2k}(\xi_2)$ – координатные функции.

Ввиду принятия для каждого слоя одинаковой системы коэффициентов $b_k(q)$, двухслойная пластина приводится к однослойной, но с переменными свойствами среды.

Рассмотрим построение координатных функций, удовлетворяющих условиям (14) – (17). Формулы для них запишем в виде

$$\varphi_{1k}(\xi_1) = \xi_1 - \xi_1^{2k} ; \quad (21)$$

$$\varphi_{2k}(\xi_2) = B_{1k} + B_{2k} \xi_2 - B_{3k} \xi_2^{2k} , \quad (22)$$

где B_{1k}, B_{2k}, B_{3k} – неизвестные константы.

Соотношение (19) с функцией (21) удовлетворяет граничному условию (14).

Для определения B_{1k}, B_{2k}, B_{3k} подставим (21), (22) в (15) – (17).

Из решения системы трех алгебраических уравнений находим: $B_{1k} = \Delta_1 - \Delta_1^{2k}$; $B_{2k} = N(1 - 2k\Delta_1^{2k-1})$; $B_{3k} = B_{2k} / (2k\Delta_2^{2k-1})$; $N = \lambda_1 / \lambda_2$. С учётом B_{1k} , B_{2k} , B_{3k} (22) будет

$$\varphi_{2k}(\xi_2) = \Delta_1 - \Delta_1^{2k} + N(1 - 2k\Delta_1^{2k-1}) \left(\xi_2 - \frac{\xi_2^{2k}}{2k\Delta_2^{2k-1}} \right). \quad (23)$$

Учитывая (21) – (23) формулы (19), (20) удовлетворяют условиям (14) – (17). Неизвестные коэффициенты $b_k(q)$ находятся из (18) и некоторых ДКУ. Для их нахождения продифференцируем (14) по Fo

$$\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial Fo} = 0. \quad (24)$$

С учётом (10) соотношение (24) приводится к ДКУ вида

$$\partial^2 \Theta_1(0, Fo) / \partial \xi_1^2 = 0. \quad (25)$$

Продифференцируем (25) по Fo

$$\frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} \left(\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial Fo} \right) = 0. \quad (26)$$

С учётом (10) соотношение (26) приводится к еще одному ДКУ

$$\partial^4 \Theta_1(0, Fo) / \partial \xi_1^4 = 0. \quad (27)$$

Следовательно, дифференцируя любое предыдущее ДКУ по Fo, с учётом (10) можно найти любое их число. Их общая формула будет

$$\partial^{2i} \Theta_1(0, Fo) / \partial \xi_1^{2i} = 0, \quad (i = 1, 2, 3, \dots). \quad (28)$$

В точке $\xi_2 = \Delta_2$ имеем также условие (18), поэтому необходимо найти ДКУ на основе этого соотношения. Производная от (18) по Fo имеет вид

$$\partial q(Fo) / \partial Fo = \partial \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial Fo. \quad (29)$$

С учётом (11) выражение (29) приводится к ДКУ вида

$$\partial^2 \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^2 = \partial q(Fo) / \partial Fo. \quad (30)$$

Определяя производную от Fo, с учётом (11) получаем ещё одно ДКУ

$$\partial^4 \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^4 = d^2 q(Fo) / dFo^2. \quad (31)$$

Запишем общую формулу для ДКУ в точке $\xi_2 = \Delta_2$

$$\partial^{2i} \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^{2i} = \partial^i q(Fo) / \partial Fo^i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots). \quad (32)$$

Кроме найденных ДКУ, которые необходимо выполнять в точках $\xi_1 = 0$ и $\xi_2 = \Delta_2$, необходимо также найти ДКУ в точке $\xi_2 = \Delta_2$, используя условие (17). Продифференцируем (17) по Fo

$$\frac{\partial}{\partial \xi_2} \left(\frac{\partial \Theta_2(\Delta_2, Fo)}{\partial Fo} \right) = 0. \quad (33)$$

Используя (11), находим ДКУ

$$\partial^3 \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^3 = 0. \quad (34)$$

Определяя производную от Fo, учитывая (11) получаем ещё одно ДКУ при $\xi_2 = \Delta_2$

$$\partial^5 \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^5 = 0. \quad (35)$$

Запишем общую формулу для них

$$\partial^{2i-1} \Theta_2(\Delta_2, Fo) / \partial \xi_2^{2i-1} = 0, \quad (i = 1, 2, 3, \dots) . \quad (36)$$

Отметим, что формула (20) с учетом (22) удовлетворяет ДКУ (36).

ДКУ обладают тем свойством, что их выполнение эквивалентно выполнению на границах уравнений (18), (11). В [17, 18] доказывается, что в этом случае исходные уравнения оказываются выполненными и внутри области.

В первом приближении, подставив (19), (20) в (18), (28), (32) ($i = 1$), получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} b_1 \varphi_{21}(\Delta_2) + b_2 \varphi_{22}(\Delta_2) - b_3 \varphi_{23}(\Delta_2) &= q(Fo); \\ b_1 \varphi''_{11}(0) + b_2 \varphi''_{12}(0) - b_3 \varphi''_{13}(0) &= 0; \end{aligned} \quad (37)$$

$$b_1 \varphi''_{21}(\Delta_2) + b_2 \varphi''_{22}(\Delta_2) - b_3 \varphi''_{23}(\Delta_2) = q'(Fo),$$

где $\varphi''_{11} = d^2 \varphi_{11} / \partial \xi_1^2$; $\varphi''_{12} = d^2 \varphi_{12} / \partial \xi_1^2$; $\varphi''_{13} = d^2 \varphi_{13} / \partial \xi_1^2$; $\varphi''_{21} = d^2 \varphi_{21} / \partial \xi_2^2$; $\varphi''_{22} = d^2 \varphi_{22} / \partial \xi_2^2$; $\varphi''_{23} = d^2 \varphi_{23} / \partial \xi_2^2$; $q' = dq(Fo) / dFo$.

Решение системы (37)

$$b_1(q) = 0; \quad b_2(q) = -\frac{2}{3}(q'\eta_1 + q\eta_2)/\eta; \quad b_3(q) = (q'\eta_3 + q\eta_4)/\eta, \quad (38)$$

где

$$\begin{aligned} \eta &= \lambda_2 / (\lambda_1 (28\lambda_2 \Delta_1^4 + 72\lambda_2 \Delta_1^9 + 120\Delta_2 \lambda_1 \Delta_1^8 - 20\Delta_2 \lambda_1 \Delta_1^3 - 108\lambda_2 \Delta_1^6 - 30\Delta_2 \lambda_1 \times \\ &\times \Delta_1^5 + 8\lambda_2 \Delta_1 + 5\Delta_2 \lambda_1)); \quad \eta_1 = \Delta_2 (6\lambda_2 \Delta_1^6 + 30\Delta_2 \Delta_1^5 \lambda_1 - 5\Delta_2 \lambda_1 - 6\lambda_2 \Delta_1); \quad \eta_2 = 30 \times \\ &\times \lambda_1 (6\Delta_1^5 - 1); \quad \eta_3 = \Delta_2 (12\lambda_1 \Delta_1^3 \Delta_2 - 3\Delta_2 \lambda_1 + 4\lambda_2 \Delta_1^4 - 4\lambda_2 \Delta_1); \quad \eta_4 = 12\lambda_1 (4\Delta_1^3 - 1). \end{aligned}$$

Формулы (19), (20) с учетом (38) будут

$$\Theta_1(\xi_1, Fo) = -\frac{2}{3}(q'\eta_1 + q\eta_2)\varphi_{12}/\eta + (q'\eta_3 + q\eta_4)\varphi_{13}/\eta; \quad (39)$$

$$\Theta_2(\xi_2, Fo) = -\frac{2}{3}(q'\eta_1 + q\eta_2)\varphi_{22}/\eta + (q'\eta_3 + q\eta_4)\varphi_{23}/\eta. \quad (40)$$

Потребуем выполнения следующего интегрального уравнения

$$\begin{aligned} \int_0^{\Delta_1} \left(\frac{\partial \Theta_1(\xi_1, Fo)}{\partial Fo} - \frac{\partial^2 \Theta_1(\xi_1, Fo)}{\partial \xi_1^2} \right) d\xi_1 + \\ + \int_0^{\Delta_2} \left(\frac{\partial \Theta_2(\xi_2, Fo)}{\partial Fo} - \frac{a_2}{a_1} \frac{\partial^2 \Theta_2(\xi_2, Fo)}{\partial \xi_2^2} \right) d\xi_2 = 0. \end{aligned} \quad (41)$$

Подставив (39), (40) в (41), имеем

$$K \frac{d^2 q}{dFo^2} + L \frac{dq}{dFo} + Mq = 0, \quad (42)$$

где $K = 0,58$, $L = 1,082$, $M = 0,0766$ при исходных данных вида: $a_1 = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_1 = 45,24 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_2 = 16,24 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\delta_1 = 0,002 \text{ м}$; $\delta_2 = 0,004 \text{ м}$; $\Delta_1 = 0,33$; $\Delta_2 = 0,67$.

Из решения (42) имеем

$$q(Fo) = C_1 \exp\left(-\frac{(L^2 - 4KM)^{1/2} + L}{2K} Fo\right) + C_2 \exp\left(\frac{(L^2 - 4KM)^{1/2} - L}{2K} Fo\right), \quad (43)$$

где C_1, C_2 – константы интегрирования.

Составим интегралы взвешенных невязок условий (12), (13), и потребуем выполнения условия их ортогональности к функциям $\varphi_{1k}(\xi_1)$, $\varphi_{2k}(\xi_2)$ ($k = 1, 2$). Отсюда получаем

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{\Delta_1} [\Theta_1(\xi_1, 0) - 1] \varphi_{11}(\xi_1) d\xi_1 + \int_0^{\Delta_2} [\Theta_2(\xi_2, 0) - 1] \varphi_{21}(\xi_2) d\xi_2 = 0; \\ \int_0^{\Delta_1} [\Theta_1(\xi_1, 0) - 1] \varphi_{12}(\xi_1) d\xi_1 + \int_0^{\Delta_2} [\Theta_2(\xi_2, 0) - 1] \varphi_{22}(\xi_2) d\xi_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Подставляя (39), (40) в (44), для C_1 и C_2 получаем два алгебраических уравнения, решение которых: $C_1 = -1,307$; $C_2 = 1,608$.

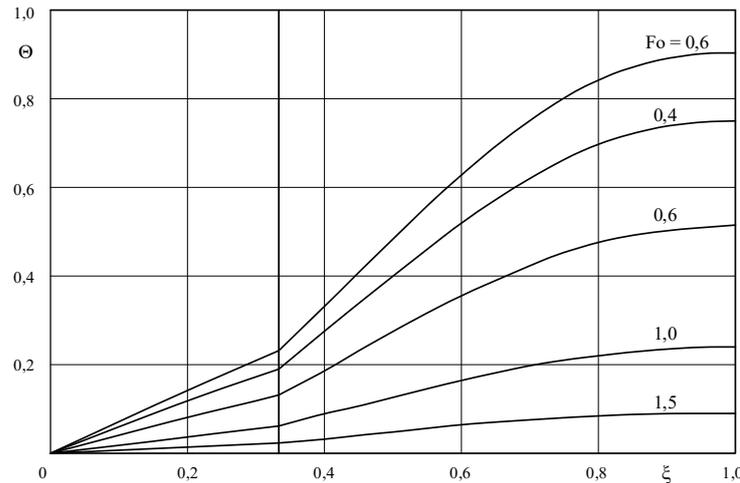


Рис. 2. Распределение температуры: расчеты по (19), (20) при $n = 3$

Fig. 2. Temperature distribution: calculations according to (19), (20) at

Обсуждение результатов. На рис. 2 даны результаты, полученные по формулам (19), (20) ($n = 3$). На рис. 3 даны результаты для случая приведения двухслойной системы к однослойной ($n = 3$), то есть при $\lambda_1 = \lambda_2$, $a_1 = a_2$. Из анализа следует, что при $0,4 < Fo < \infty$ отличие от точного решения [19, 20] не более 6 %.

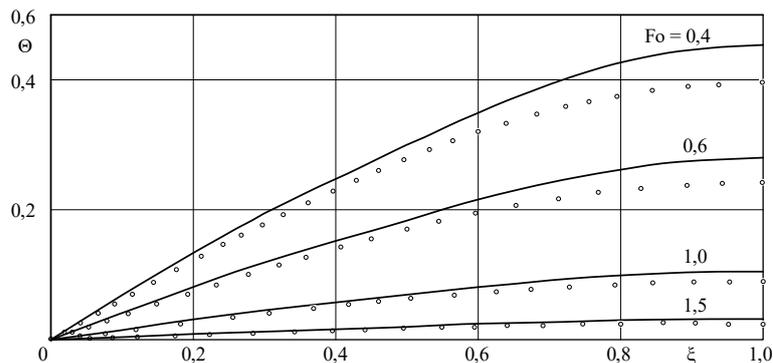


Рис. 3. Распределение температуры при $\lambda_1 = \lambda_2$ и $a_1 = a_2$. — по (19), (20) при $n = 3$; \circ – точное решение [19, 20]

Fig. 3. Temperature distribution at and $\lambda_1 = \lambda_2$ и $a_1 = a_2$. – according to (19), (20) at ; $n = 3$; \circ – exact solution [19, 20]

Вывод. Используя координатные функции, удовлетворяющие граничным условиям и условиям сопряжения, на основе ДФ и ДКУ разработана методика нахождения приближенного решения задачи теплопроводности для двухслойной пластины.

Для упрощения получения решения использованы локальные координаты, что позволяет упростить процесс получения решения, и окончательные выражения для него.

ДФ вводятся с целью приведения уравнения в частных производных к обыкновенному уравнению. ДКУ позволяют выполнить исходные дифференциальные уравнения на границах, что приводит к их выполнению и внутри областей.

Библиографический список:

1. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978. 328 с.
2. Коляно Ю.М. Применение обобщенных функций в термомеханике кусочно-однородных тел. В кн.: Математические методы и физико-механические поля. Вып.7. Киев: наукова думка, 1978. С.7
3. Коляно Ю.М., Попович В.С. Нестационарное температурное поле в состыкованных пластинах // Физика и химия обработки материалов. 1975. №5. С.16
4. Кеч В., Теодореску П. Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике. М.: Мир, 1978.
5. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: Высшая школа, 2005. 430 с.
6. Цой П.В. Методы расчета отдельных задач тепломассопереноса. М.: Энергия, 1971. 384с.
7. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.
8. Био М. Вариационные принципы теплообмена. М.: Энергия, 1975. 208с.
9. Глазунов Ю.Т. Вариационные методы. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. 470 с.
10. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена. Сборник научных трудов. М.: Атомиздат, 1967. С. 41 – 96.
11. Кудинов В.А., Еремин А.В., Кудинов И.В. Получение аналитического решения задачи Стефана с учетом абляции на основе определения фронта температурного возмущения // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 6. С.1332 – 1342.
12. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Методы решения параболических и гиперболических уравнений теплопроводности. М.: ЛИБРОКОМ, 2011. 280 с.
13. Кудинов В.А., Стефанюк Е.В. Аналитический метод решения задач теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82, №3. С. 540 – 558.
14. Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях. М.: Высшая школа, 2008. 305с.
15. Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В., Назаренко С.А. Анализ нелинейной теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения // Теплофизика высоких температур, 2006. Т. 44, №5, С. 577 – 585.
16. Кудряшов Л.И., Меньших Н.Л. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Машиностроение, 1979. 232с.
17. Кудинов И.В., Котова Е.В., Кудинов В.А. Метод получения аналитических решений краевых задач на основе определения дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций. Сибирский журнал вычислительной математики. Новосибирск. 2019. Т. 22, № 2. С.153 – 165.
18. Федоров Ф.М. Граничный метод решения прикладных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 2000. 220 с.
19. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
20. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

References

1. Belyaev N.M., Ryadno A.A. Methods of unsteady thermal conductivity. M.: Higher School, 1978; 328 (In Russ).
2. Kolyano Yu.M. Application of generalized functions in thermomechanics of piecewise homogeneous bodies. In the book: Mathematical methods and physical and mechanical fields. Issue 7. Kiev: Naukova Dumka, 1978; 7
3. Kolyano Yu.M., Popovich V.S. Unsteady temperature field in joined plates. Physics and chemistry of materials processing. 1975; 5:16 (In Russ).
4. Kech V., Teodorescu P. Introduction to the theory of generalized functions with applications in technology. M.: Mir, 1978. (In Russ).
5. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Kalashnikov V.V. Analytical solutions to problems of heat and mass transfer and thermoelasticity for multilayer structures. M.: Higher School, 2005; 430. (In Russ).
6. Tsoi P.V. Methods for calculating individual heat and mass transfer problems. M.: Energy, 1971; 384. (In Russ).
7. Tsoi P.V. Methods for calculating heat and mass transfer problems. M.: Energoatomizdat, 1984; 416. (In Russ).

8. Biot M. Variational principles of heat transfer. M.: Energy, 1975; 208 (In Russ).
9. Glazunov Yu.T. Variational methods. M.: Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics"; Institute for Computer Research, 2006; 470. (In Russ).
10. Goodman T. Application of integral methods in nonlinear problems of unsteady heat transfer./ Problems of heat transfer. Collection of scientific papers. M.: Atomizdat, 1967; 41 – 96. (In Russ).
11. Kudinov V.A., Eremin A.V., Kudinov I.V. Obtaining an analytical solution to the Stefan problem taking into account ablation based on determining the front of a temperature disturbance. *Engineering and Physical Journal*. 2012;85(6):1332 – 1342.(In Russ).
12. Kudinov V.A., Kudinov I.V. Methods for solving parabolic and hyperbolic heat equations. M.:LIBROKOM, 2011;280 .(In Russ).
13. Kudinov V.A., Stefanyuk E.V. Analytical method for solving heat conduction problems based on determining the front of temperature disturbance and additional boundary conditions. *Engineering and Physical Journal*. 2009; 82(3): 540 – 558(In Russ).
14. Kudinov V.A., Averin B.V., Stefanyuk E.V. Thermal conductivity and thermoelasticity in multilayer structures. M.: Higher School, 2008; 305 (In Russ).
15. Kudinov V.A., Averin B.V., Stefanyuk E.V., Nazarenko S.A. Analysis of nonlinear thermal conductivity based on determining the front of temperature disturbance . *Thermophysics of high temperatures*, 2006; 44 (5): 577 – 585. (In Russ).
16. Kudryashov L.I., Menshikh N.L. Approximate solutions of nonlinear heat conduction problems. M.: Mechanical Engineering, 1979; 232.(In Russ).
17. Kudinov I.V., Kotova E.V., Kudinov V.A. A method for obtaining analytical solutions to boundary value problems based on the determination of additional boundary conditions and additional required functions. *Siberian Journal of Computational Mathematics*. Novosibirsk 2019;22,(2):153 – 165.(In Russ).
18. Fedorov F.M. Boundary method for solving applied problems of mathematical physics. Novosibirsk: Nauka, 2000; 220 (In Russ).
19. Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. M.: Higher School, 2001; 550 (In Russ).
20. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. M.: Higher School, 1967; 600 (In Russ).

Сведения об авторе:

Клеблеев Руслан Мухтарович, старший преподаватель, кафедра «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», uio1123@list.ru

Information about the author:

Ruslan M. Klebleev, Senior Lecturer, Department of "Theoretical foundations of heat engineering and hydromechanics", uio1123@list.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 23.07.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 14.08.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 14.08.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 623.76, 004.056.53

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-100-109



Обзорная статья / Review article

Защита верхней полусферы объекта критической информационной инфраструктуры

И.А. Лоскутов¹, В.А. Репенко²

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,

¹Политехнический колледж им. Н.Н. Годовикова,

¹125130, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских, 19, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

²115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является структурирование общедоступной информации для обеспечения защиты верхней полусферы объектов КИИ. **Метод.** В качестве методов научного познания используются: систематизация, описание, анализ, дедукция. Статья состоит из трех разделов. Вначале проводится анализ текущего состояния вопроса о потребности в защите от БПЛА. Учет идет не только военной инфраструктуры, но и также гражданской. Кроме того, для анализа проводится разделение атак дронов с целью физического уничтожения объекта КИИ / его части или же атаки на техническую составляющую. Во второй части работы проводится анализ нормативно-правовой базы России и стран ЕС. Наибольший акцент делается на отечественное законодательство и выявлении проблемных участков по теме исследования. В третьей части работы приводится проект предложений по защите объектов КИИ от угроз, исходящих от БПЛА. Для этого проведен анализ разновидностей дронов, определяются требования к системе защиты и поиска вторженцев. **Результат.** Проведено исследование проблем защиты объектов КИИ от атак дронов. Отмечен постоянный рост атак БПЛА на гражданскую и военную инфраструктуру; выявлены проблемы нормативно-правовой базы России по направлению, разработано предложение по защите верхней полусферы. **Выводы.** Проведенное исследование носит обзорный характер. Материалы, представленные в работе могут послужить базисом как для дальнейших исследований по направлению, так и для сознания соответствующих нормативных документов.

Ключевые слова: безопасность верхней полусферы, КИИ, угрозы, дроны, БПЛА.

Для цитирования: И.А. Лоскутов, В.А. Репенко. Защита верхней полусферы объекта критической информационной инфраструктуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):100-109. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-100-109

Protection of the upper hemisphere of a critical information infrastructure facility

I.A. Loskutov¹, V.A. Repenko²

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation
"Space Monitoring Systems, information management and electromechanical complexes",

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

¹N.N. Godovikova Polytechnic College,

¹19 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh St., Moscow 125130, Russia,

²National Research Nuclear University MEPhI,

²31 Kashirskoe highway, Moscow 2115409, Russia

Abstract. Objective. Structuring of publicly available information regarding the protection of the upper hemisphere of CII objects. **Method.** The following methods of scientific cognition are used: systematization, description, analysis, deduction. The article consists of three sections. First, an analysis of the current state of the issue of the need for protection from UAVs is carried out. Accounting is not only military infrastructure, but also civil. In addition, for analysis, the separation of drone attacks is carried out in order to physically destroy the CII object / its part or attack the technical component. In the second part of the work, the analysis of the regulatory framework of Russia and the EU countries is carried out. The greatest emphasis is placed on domestic legislation and the identification of problem areas in relation to the research topic. In the third part of the work, a draft of proposals for the protection of CII objects from threats emanating from UAVs is presented. To do this, the analysis of drone varieties is carried out, the requirements for the system of protection and search for intruders are determined. **Result.** The article investigates the problems of protecting CII objects from drone attacks. A constant increase in UAV attacks on civilian and military infrastructure was noted, problems of the regulatory framework of Russia in the direction were identified, a proposal for the protection of the upper hemisphere was developed. **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 and for the development of relevant regulatory documents.

Keywords: upper hemisphere security, cues, threats, drones, UAV

For citation: I.A. Loskutov, V. A. Repenko. Protection of the upper hemisphere of a critical information infrastructure facility. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):100-109. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-100-109

Введение. Современные технологии постоянно развиваются, особенно это касается робототехники. Одним из значимых направлений отмеченной части научно-технического прогресса, стоит считать производство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которых в просторечье именуют Дронами [1]. Причина популярности данных механизмов кроется в многофункциональности их применения [2]. Среди областей, в которых задействованы БПЛА можно отметить работу в правоохранительных органах [3], внутренних войсках [4], министерства чрезвычайных ситуаций [5], исследование окружающей среды [6] и т.п. Однако, кроме использования в мирных целях, в последнее время набирают обороты атаки при помощи БПЛА на различные объекты, в том числе и на критические информационные инфраструктуры (КИИ) [7].

Постановка задачи. Действительно, нападения дронов на промышленные предприятия и иные значимые объекты все больше начинают волновать специалистов по защите [8], т.к. кроме использования в компьютерных диверсиях, они могут нести взрывчатые и ядовитые вещества, вооружение и т.п. [9]. Кроме того, сложность отслеживания столь малых воздушных объектов [10] создает значимую проблему по их обезвреживанию и недопущению происшествий. Особенно, среди прочих, атакам подвержена верхняя полусфера объектов КИИ. Из чего следует, необходимость в повышении ее защищенности.

С начала XXI века, количество нападений с применением БПЛА постоянно растет. Проявляют интерес к современным техническим системам беспилотного управления не только конкурирующие организации [11], но и в том числе различные террористические организации [12]. Именно поэтому государственные структуры пытаются обезопасить особо важные объекты, а также сохранить жизнь простых граждан путем поиска защиты от вновь возникшей угрозы. Для этого уже сейчас создаются спецподразделения в органах внутренних дел [13], разрабатываются специнструменты в армиях мира [14]. Однако, при всем при этом, остается открытым вопрос об оправданности учета дронов в качестве явной угрозы обыкновенным предприятиям, тем из них, что относятся к КИИ.

Безусловно приведенный во введении довод об увеличении количества нападений неголословен, однако ответ на вопросы - насколько значимо это число, насколько сильно оказывается влияние на отмеченные организации? - в данном разделе постараемся

определить. Причем рассмотрение будем вести с наиболее незащищенной области – верхней полусферы. Кроме того, предварительно следует разделить предприятия КИИ на две части – те, что работают с военными, причем не зависимо от того обрабатывается в них информация грифа «Гостайна» или же нет, и те, что работают в открытом частном секторе.

Атаки БПЛА, в свою очередь, тоже условно можно разделить по целенаправленности – физическое уничтожение объекта, его части (применение ракетных снарядов, авиационных бомб и т.п.) и атака на техсоставляющую (с целью вывести из строя компьютерные компоненты, провести компьютерную атаку и т.д.)

Методы исследования. Рассмотрим сведения касательно физических атак на объекты критической информационной инфраструктуры.

Первым примером следует считать недавний инцидент в республике Иран [15]. Атака была произведена на оборонное предприятие с помощью авиабомб. В результате было множество разрушений и данный объект на долгое время был выведен из строя.

Второй пример – атака дронов в Саудовской Аравии на объект КИИ, занятый в отрасли нефтепереработки. Функционирование объекта было восстановлено за несколько дней, однако достижения максимальной мощности работы было невозможно в течении нескольких месяцев [16]

Третий пример – атака БПЛА на Брянское КИИ [17]. В результате атаки были повреждены резервуары с нефтепродуктами, возникло возгорание, взрывы, работоспособность предприятия была нарушена.

Кроме отмеченных выше, вследствие проведения специальной военной операции на Украине, интернет версии средств массовой информации имеют различные заголовки о применении БПЛА при атаки (или их попытках) на российские оборонные предприятия в Крыму или континентальной России. Как не сложно догадаться, все атаки проводились в верхней полусфере.

Таким образом сложилась картина значительной опасности подобного рода нападений дронов на оборонные объекты КИИ, и явно наблюдается потребность в обеспечении их безопасного функционирования.

Перейдем ко второму случаю – атакам БПЛА на частный сектор с применением взрыво-ядотехнических средств.

К первому примеру следует отнести новость [18], в которой на сайте информационного портала констатируется возникновение чрезвычайного происшествия в нескольких регионах России, в том числе и в Московской области. Во всех происшествиях виноваты БПЛА, и, как следует из упоминания столичного региона, опасности подвергаются не только районы, находящиеся близ военного конфликта.

Второй пример показан в [19] и затрагивает опять регион Подмосковья. Атака, пусть и не реализована, но направлена она была против гражданской инфраструктуры и рядом расположенной КИИ.

Третий пример [20] затрагивает поселок Адыгеи. БПЛА сломал инфраструктуру животноводческого объекта, что привело к финансовым потерям предпринимателя.

Как видно, атаки БПЛА не делают различий между гражданскими и оборонными КИИ, т.е. необходимость в обеспечении комплексной защиты на лицо.

Однако, несмотря на действительную опасность со стороны дронов для КИИ, с точки зрения атаки бомбами или иными средствами взрыво-химотехники, многие руководители отмеченных объектов могут не согласиться с потребностью в покупке дорогого оборудования для борьбы с БПЛА. В том же случае, если рассматриваемые в работе малые летательные аппараты способны уничтожить или «украсть» информацию с объектов, то это уже будет куда более весомым доводом для данных индивидуумов. Потому далее исследуем информационный поток по данному направлению.

В качестве первого примера можно рассмотреть новость [21]. В данном случае, атака проводилась с помощью БПЛА целенаправленно на базу данных (БД) финансовой

компании. Специалисты службы информационной безопасности (ИБ) случайно смогли отследить данное устройство, хотя по сути оно уже работало продолжительное время.

Вторым примером является атака дрона на банк [22]. В данном случае два БПЛА подключились к внутренней WiFi сети, перехватили пару «логин-пароль» и внедрились внутрь БД корпоративной сети. Однако, служба ИБ успела вовремя заметить подозрительную активность и найти данные устройства.

Другой подобный случай закончился уже в пользу взломщиков [23]. В результате физического использования дрона, злоумышленники смогли украсть 150000 евро из банкомата.

Таким образом складывается неблагоприятная картина и, как и в предыдущих двух случаях, потребность в обеспечении верхней полусферы КИИ не вызывает сомнений.

Поскольку приведенные ранее примеры относились к объектам гражданской инфраструктуры, в дополнительных доводах о потребности в защите оборонных предприятий нет необходимости.

Как уже было определено, угрозы, исходящие от дронов для объектов КИИ значительны и применение специальных средств борьбы – необходимость. Однако, для обеспечения комплексной безопасности объектов, всегда необходимо наличие двух главных компонентов – непосредственно системы защиты и нормативно-правовой базы. Именно последняя и будет рассмотрена в данном разделе.

Обратимся к нормативной правовой базе (НПБ) Европейского союза (ЕС). Причина – наиболее активное обсуждение проблем с дронами [24].

Регламенты: 923/2012 [25]; 1035/2011 [26].

В отмеченных документах жестко регламентируется понятие БПЛА, его допустимые характеристики и параметры. Кроме того, в документах приводится одна из классификаций дронов. На основании отмеченных регламентов и близкородственных НПБ, реализованных на их базе, в странах – участницах ЕС строятся правила использования БПЛА, особенности регистрации, учета, использования. Кроме того, данные регламенты заложили принципы работы с дронами больших размеров.

Отметим, что в других странах, в целом, аналогичный подход. Например, в нашем отечестве существует постановление №658 от 2019 года [27], заставляющее пользователей ставить БПЛА на учет. Более подробно нормы использования дронов по большинству стран представлены в документе [28]. Кроме того, применительно к Российской Федерации, нельзя не отметить, что из-за принадлежности БПЛА к авиационной технике, на них автоматически распространяются НПБ по направлению. Наиболее подробно они показаны в работе [29]. В данном случае учитывается не только требования по сертификации, узаконивание права собственности, но и также правила полета, особенности применения в спасательных мероприятиях и т.п.

Кроме вышеперечисленных, нельзя обойти внимание санкции, которые вводятся относительно владельцев-нарушителей БПЛА. Так, в соответствии с кодексом России [30], на нарушителей территорий и воздушного пространства, к коей в полной мере относится верхняя полусфера объекта КИИ, налагается штраф в размере от двух тысяч рублей до полумиллиона.

Однако, нельзя обойти вниманием тот факт, что законодательно, в рассматриваемом документе, статья 11, предусмотрена возможность доказать непричастность пилота к потенциальному вреду объекта КИИ, что говорит о печальных последствиях для защищаемого комплекса [31] и не проработанности законодательного акта.

Учитывая, что кроме свода НПБ об административных правонарушениях, в Российской Федерации существует и уголовный кодекс [32], рассмотрим его с точки зрения защиты верхней полусферы. В данном документе также имеется ряд статей, указывающих на ответственность нарушителя. Так, на основании Статьи 263.1 – за нарушение транспортной безопасности, максимальный срок обозначен вплоть до пяти лет; Статьи 271.1 за нарушение использование пространством над объектом КИИ с соответствующими последствиями – до трех лет. Как видно, данная НПБ подразумевает больше санкций относительно злоумышленника, однако, в текущем случае все может быть перекалифицировано как

в сторону административного нарушения, так и уголовного, от чего необходимо дальше продолжить рассмотрение уголовного кодекса.

Как уже было верно подмечено в первом разделе, атаки дронов с верхней полусферы могут носить желание нарушения хищения информации или же уничтожения ее и техники. Соответственно, о наказании за совершение подобных злодеяний ответственны Статьи 167 (слом имущества), Глава 27 (кибер преступления различного характера).

Максимальный срок за совершение данных злодеяний равняется семи годам, хотя большинство держатся в среднем на планке между тремя – четырьмя годами.

Также, говоря о регулировании защиты верхней полусферы, нельзя не отметить значимое решение радиочастотного комитета № 07-20-03-001 от 2007 года [33]. Так, в соответствии с отмеченным документом, проводится жесткая регламентация частот, на которых осуществляется управления БПЛА. Важность данного НПБ сводится к тому, что в случае нарушения периметра объекта КИИ, можно использовать специальные технические средства, которые будут создавать помехи и / или перехватывать управление над незаконно вторгшемся дроном.

Также, интересным следует считать законопроект №323987-8, поскольку он направлен на создание новых правок в НПА в части противодействия БПЛА. Так, в Статье 4 отмечается охрана объектов, к коим в полной мере относятся КИИ. Наиболее значимым в отмеченном параграфе следует считать стремление законодателей в обязательном порядке иметь средства пресечения незаконного попадания дронов. Более того, в последнем абзаце явно выделяются ответственные за защиту объектов КИИ. Кроме того, в поддержку необходимости введения данного законопроекта следует практический опыт, полученный в результате специальной военной операции [34].

Обсуждение результатов. Рассматриваемые в статье КИИ, по своей сути, представляют не обязательно военные объекты. Как показывает практика, при поиске способов обеспечения защиты верхней полусферы, в большинстве случаев будут рассматриваться гражданские системы. От того и методологию защиты следует выбирать особым способом. В частности, для формирования предложений по защите, лучше абстрагироваться от разработок, подобных [35] и тем более [36], поскольку они используют активные методы защиты - снаряды и их заменители, т.е. недоступные и опасные для большинства окружающих системы.

В целом, первоначально следует обратиться к уже отмеченному во втором разделе требованию законодателей России в части выделения определенных радиочастот для БПЛА. Заранее зная каналы передачи информации «человек-машина», значительно проще определить геоположение дронов. Так, из источника [37] следует, что данный процесс достаточно тривиален, соответственно и обезопасить себя КИИ сможет тоже за малые деньги. Однако, кроме стандартных «усовершенствованных игрушек», возможны и другие варианты исполнения летательных механизмов. К первым будут относиться самодельные БПЛА. Действительно, не имея явных ограничений, творцы-создатели подобного рода дронов могут использовать нестандартные модули и специфическую программно-аппаратную часть, что вызовет проблемы в части обеспечения безопасности. Однако тут важно заметить, что подобные системы дороги и от того не всем предприятиям следует беспокоиться о возможности нападения на них. Объекты КИИ с низкими финансовыми потоками будут с минимальной долей вероятности атакованы подобными средствами.

Второй вариант – применение специальных БПЛА военного образца. Тут важно отметить, что их тоже условно можно подразделить на: 2.1 – массового исполнения, 2.2 – тактического. В первом подварианте уже создаются значительные угрозы объектам КИИ, поскольку частоты их работы отличаются от вышеупомянутых требований. Кроме того, как и следует ожидать, данные устройства очень неплохо защищены от перехвата и имеют несколько контуров связи и поддержания заданного курса [38]. Второй подтип использует уже сверхсовременные БПЛА, такие как Global Hawk или Triton [38], которые на данный момент ни разу не были перехвачены. Данные аппараты представляют наивысшую угрозу для объектов КИИ. Следует констатировать один важный факт – интерес подобного рода

дронов возможен только к очень узкому кругу предприятий, поскольку они крайне дороги и, если первые еще можно попытаться найти на «черном» рынке, то последние – без шансов. Однако даже в первом случае вопрос цены будет колоссальным, соответственно информационные ограбления, показанные в первом разделе данной работы просто будут нерентабельны для них. По большей части данные дроны будут использоваться только военными, из-за чего и объекты обрабатывающие данные с грифом «Гостайна» – чуть ли не единственные потенциальные цели для них.

Определив некоторые особенности нападений дронов на объекты КИИ, можно перейти к разработке предложений по защите верхней полусферы.

В данном случае необходимо, чтобы система отвечала определенным требованиям. Они верно подмечены в работе [39]:

1. Система защиты от беспилотных летательных аппаратов (СЗоБПЛА) должна глушить частоты передачи телеметрии и иной управляющей информации;
2. СЗоБПЛА должна уметь определять наличие оптических средств съема информации у дронов и слепить их;
3. СЗоБПЛА должна применять активные средства защиты невоенного дела (система ускорения потоков воздуха, дым и т.п.);
4. СЗоБПЛА должна комплексно взаимодействовать с физическими элементами защиты (сети, решетки и т.п. ограждения, не дающие попасть дрону в воздушное пространство объекта КИИ);
5. СЗоБПЛА должна содержать аналогичные атакующим системы защиты (дропо-перехватчиков).

Таким образом должна решаться в СЗоБПЛА комплексная задача, состоящая из трех глобальных частей [33]:

1. Определение нарушителей-дронов;
2. Перехват управления БПЛА;
3. Анализатор состояния защищаемой области.

Кроме того, в СЗоБПЛА обязательно должны быть заложены принципы защиты на подобие тех, что описаны в работе [40], т.е. реализовать всевозможные угрозы БПЛА, среди которых GPS-spoofing из-за доказанной эффективности [41] должен занимать лидирующие позиции.

Главными требованиями к СЗоБПЛА [42]:

1. Эффективность работы должна быть на уровне вне зависимости от внешней окружающей среды;
2. Система должна входить в рабочее состояние после простоя / ремонта или иного подобного действия за минимальное количество времени;
3. Программное обеспечение должно состоять из компонентов интуитивно понятных пользователю, способное самостоятельно информировать о возможных угрозах верхней полусферы объекта КИИ.

Кроме того, в качестве борьбы с БПЛА может быть предложена идея о дистанционном выключении двигателей. В результате крушения дрона, угроза соответственно автоматически будет нивелирована. В данном случае изначально необходимо СЗоБПЛА определить какой тип двигателя установлен на летательном аппарате [43] и как его отключить. Например, при использовании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) можно использовать тот же дым. С одной стороны, визуальная составляющая будет снижена, с другой потенциальное засорение ДВС приведет к падению дрона. Сам комплекс СЗоБПЛА должен содержать все доступные системы поиска дронов-нарушителей, среди которых [44]: радиолокационные; радиотехнические; оптико-электронные; акустические.

Вывод. Проведенный в работе анализ носит обзорный характер и затрагивает ключевые моменты, связанные с защитой верхней полусферы объекта КИИ и потребностью в данном деянии. Постоянный рост атак БПЛА на гражданскую и военную инфраструктуру

позволяет судить об угрозе всем объектам КИИ, вне зависимости от обрабатываемой в них информации. Отдельно важно отметить, что рассмотренная в статье НПБ показала весьма неутешительную картину – на данный момент нет явной структурированной базы и накопленного мирового опыта по безопасности верхней полусферы. Законодательные акты разрознены, нововведения распределены по старым законам, но мало друг с другом синергируют. Безусловно имеется законопроект №323987-8, направленный на решение отмеченной проблемы, но он пока не принят. Кроме того, даже при его включении в НПБ возможны правовые коллизии, вследствие отсутствия явных приказов федеральных органов исполнительной власти, а также документов, посвященных тематике.

В статье указывается на те минимальные требования к безопасности верхней полусферы которые должны быть прописаны в законе и учитывают возможности большинства игроков. При создании защитных механизмов зачастую неоправданно опираться на разработки активной борьбы с БПЛА, реализованных посредством ракетно-технической составляющей вследствие ее опасности для окружающих и недоступности большинству объектов КИИ. Среди главных параметров определения положения дронов в пространстве оправдан геолокационный поиск по частотам, наиболее распространенным (законодательно) на потребительском рынке БПЛА. Важно учитывать тот факт, что большую опасность для объектов КИИ будут представляла дроны, созданные кустарными методами, поскольку защиту от стандартных модификаций относительно легко реализовать, а вероятность применения военных технологий для большинства КИИ крайне маловероятна. Для борьбы с БПЛА рационально применять дымовую завесу, т.к. она сильно вредит дронам с ДВС и с высокой вероятностью вызовет его отказ. Параллельно необходимо выполнять показанные требования к СЗОБПЛА и использовать все возможные системы поиска. Именно такая синергия обеспечит максимальную защищенность объектов КИИ.

Библиографический список:

1. Тимченко Б.Г. Исследование задачи посадки БПЛА на судно-носитель. - СПб, 2018. - 41 с.
2. Жолымбаев А.О. Особенности гражданского применения беспилотных летательных аппаратов на примере возможностей их использования при ликвидации чрезвычайных ситуаций // Научный альманах. - 2016. - № 1-3(15). - С. 23-30
3. Дронова О.Б., Храмова Е.С. Генезис совершенствования функциональных возможностей беспилотных летательных аппаратов, используемых в качестве технико-криминалистических средств // Сибирские уголовно-процессуальные и криминалистические чтения. - 2022. - №1 (35). - С. 77-87
4. Терех Е.Г., Мещеряков С.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в интересах МЧС и внутренних войск республики Беларусь // Обеспечение безопасности жизнедеятельности : проблемы и перспективы : сборник материалов IX международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) : в 2-х ч. Ч.1. - Минск : КИИ, 2015. С.136-137
5. Воропаев Н.П. Применение беспилотных летательных аппаратов в интересах МЧС России // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского государственного университета Государственной противопожарной службы МЧС России». - 2014. - № 4. - С. 13-17
6. Полякова Е.В. Возможности подспутникового ДЗЗ с использованием беспилотного летательного аппарата CropCam в условиях Европейского Севера // Arctic Environmental Research. - 2010. - №2. - С.22-26
7. Запорожцев Д.В. Критически важные инфраструктурные объекты Каспийского региона как цели террористических атак и диверсий // Вестник Академии военных наук. - 2022. - № 1(78). - С. 33-37
8. В РФ растёт количество атак на информационные системы и физическую инфраструктуру предприятий, согласно данным от «Лаборатории Касперского». - URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/12/12/v-rf-rastjot-kolichestvo-atak-na-informacionnye-sistemy-i-fizicheskuju-infrastrukturu-predpriyatij-soglasno-laboratorii.html> (дата обращения 24.03.2023)
9. Шилов О.В. Защита верхней полусферы объектов ТЭК и промышленности от атак с воздуха с применением искусственного интеллекта // Деловая Россия. ТБ Форум. Технологии защиты периметра и верхней полусферы для крупных и распределенных объектов. - 2023. - 25с.
10. Дажунц Б.Э., Тазетдинов А.А., Бабушкин И.Н., Лушпай И.В. Вопросы управления и обеспечения защиты беспилотных летательных аппаратов от помех // Студенческий форум. - 2022. - № 17-2(196). - С. 67-68
11. Захаров А.Н. Корпоративная безопасность фирмы в контексте развития Арктических регионов России // Мировые цивилизации. - 2021. -Т.6. -№ 1. - С. 44-49
12. Блохин К.В., Вихрян А.П. Высокотехнологический терроризм – угроза цивилизации XXI века// Международный правовой курьер. - 2020. -№5. - С.8-13
13. На Кубани создадут подразделение полиции по пресечению атак беспилотников. - URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5889828> (дата обращения 24.03.2023)
14. Защиту от боевых дронов отработали на пунктах управления Каспийской флотилии. - URL: https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12273065@egNews (дата обращения 12.03.2023)

15. Появились подробности атаки дронов на оборонный завод в Иране. - URL: <https://www.mk.ru/politics/2023/01/29/poyavilis-podrobnosti-ataki-dronov-na-oboronnyy-zavod-v-irane.html> (дата обращения 12.03.2023)
16. Атака XXI века: как маленькие дроны нанесли огромный урон Саудовской Аравии. - URL: <https://tech.onliner.by/2021/06/26/malenkie-drony-nanesli-ogromnyj-uron> (дата обращения 10.03.2023)
17. Брянское предприятие пострадало после атаки беспилотников. - URL: <https://bel.ru/news/2022-12-06/bryanskoe-predpriyatie-postradalo-posle-ataki-bespilotnikov-2608444> (дата обращения 12.03.2023)
18. СК выяснит обстоятельства атак беспилотников на объекты на территории России. - URL: <https://www.forbes.ru/society/485524-sk-vyasnit-obstoatelstva-atak-bespilotnikov-na-ob-ekty-na-territorii-rossii> (дата обращения 18.03.2023)
19. Власти подтвердили атаку БПЛА на объект гражданской инфраструктуры в Подмосковье. - URL: https://www.dp.ru/a/2023/02/28/Vlasti_podtverdil_ataku (дата обращения 18.03.2023)
20. Атака беспилотников на российские города и закрытие неба в Петербурге. Что известно. - URL: <https://rtvi.com/news/ataka-bespilotnikov-na-rossijskie-goroda-i-zakrytie-neba-v-peterburge-chto-izvestno/> (дата обращения 18.03.2023)
21. Финансовая компания обнаружила, что ее пытаются взломать с помощью дрона с WiFi Pineapple на борту. - URL: <https://haker.ru/2022/10/13/drone-hacking/> (дата обращения 20.03.2023)
22. Хакеры использовали дроны DJI для взлома банка. - URL: <https://quadronews-ru.turbopages.org/quadronews.ru/s/hakery-vzломali-bank-dronom-dji.html/> (дата обращения 20.03.2023)
23. Высокотехнологичное ограбление банка с помощью дрона DJU Mini. - URL: <https://dronomania.ru/news/vysokotehnologichnoe-ograblenie-banka-s-pomoshhyu-drona-dju-mini.html?ysclid=ley9qf8q9192940977> (дата обращения 20.03.2023)
24. Мотасова Д.Д. Международно-правовое регулирование использования беспилотных летательных аппаратов // Транспортное право и безопасность. - 2019. - № 1(29). - С.116-128
25. Commission Implementing Regulation (EU) No 923/2012 of 26 September 2012 laying down the common rules of the air and operational provisions regarding services and procedures in air navigation and amending
26. Регламент за изпълнение (ЕС) No 1035/2011 на комисията от 17 октомври 2011 година за определяне на общи изисквания при доставянето на авионавигационни услуги
27. Постановление Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 г. № 658 Об утверждении Правил учета беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0,25 килограмма до 30 килограммов, ввезенных в Российскую Федерацию или произведенных в Российской Федерации
28. Курченко Н.Ю., Труфляк Е.В. Нормативно-правовая база использования беспилотных авиационных систем. - Краснодар : КубГАУ, 2020 - 45 с.
29. Анализ современного состояния нормативной правовой базы Российской Федерации в области использования воздушного пространства беспилотными авиационными системами и разработка предложений по ее совершенствованию. - URL: <https://russiandrone.ru/publications/4-analiz-sovremennoy-sostoyaniya-normativnoy-pravovoy-bazy-rossiyskoy-federatsii-v-oblasti-ispolzov/> (дата обращения 28.03.2023)
30. Закон N 195-ФЗ от 30.12.2001 «Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях»
31. Винокурова В.В., Вытовтов А.В., Шумилин В.В. Административно правовое регулирование использования беспилотных летательных аппаратов в Российской Федерации // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. - 2015. - №1. - 6 с.
32. Закон N 63-ФЗ от 13.06.1996 «Уголовный кодекс Российской Федерации»
33. Решение ГКРЧ при Мининформсвязи России от 07.05.2007 N 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия»
34. Депутаты Госдумы запустили реформу защиты РФ от беспилотников. - URL: <https://ura.news/news/1052630111> (дата обращения 28.03.2023)
35. Пат. 2755951 Российская Федерация, МПК F41H 11/02, F41H 13/00. Способ активной защиты объекта со стороны верхней полусферы / В.А. Подгорнов, М.Ю. Науменко, С.Г. Вагин, А.Е. Кипкаев, Г.А. Крестьянинов, С.В. Подгорнов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Акад. Е.И. Забахина» - № 2020144323 ; заявл. 29.12.2020 ; опубл. 23.09.2021, Бюл. №27
36. Пат. 185949 Российская Федерация, МПК F41H 11/04, B64D 1/00, F41H 13/00. Устройство борьбы с беспилотными летательными аппаратами / А.Г. Нескин, В.И. Бзыга, А.Н. Зеленов, М.Л. Соколов, В.А. Подгорнов, А.Е. Кипкаев ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Акад. Е.И. Забахина» - № 2018131051 ; заявл. 08.10.2018 ; опубл. 25.12.2018, Бюл. №36
37. Атакующие БПЛА и системы противодействия им, обзор. - URL: <https://habr.com/ru/post/365625/> (дата обращения 29.03.2023)
38. Уязвимость каналов управления штатовскими тактическими БПЛА: технологические моменты. - URL: <https://topwar.ru/106252-uyazvimost-kanalov-upravleniya-shtatovskimi-takticheskimi-bpla-tehnologicheskie-momenty.html> (дата обращения 29.03.2023)
39. Противодействие БПЛА. Защита от дронов и квадрокоптеров. - URL: <https://www.a0-avtomatika.ru/media/blog/protivodeystvie-bpla-zashchita-ot-dronov-i-kvadrokoptero/> (дата обращения 29.03.2023)
40. База знаний об атаках на беспилотные летательные аппараты / Е.С. Басан, А.С. Басан, А.В. Некрасов [и др.] // Системный синтез и прикладная синергетика : сборник научных работ X Всероссийской научной конференции, пос. Нижний Архыз, 28 сентября – 02 октября 2021 года. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. С. 170-178

41. Кривенков Д.В. Противодействие несанкционированному добыванию информации дронами // Технические и математические науки. Студенческий научный форум : Электронный сборник статей по материалам II студенческой международной научно-практической конференции. Том 2 (2) : ООО «Международный центр науки и образования», 2018. - С. 34-39
42. Методы против БПЛА. - URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/1601-metody-protivodejstviya-bpla> (дата обращения 29.03.2023)
43. Костюченко А.Н., Минин В.П., Клементьев С.А., Федин А.В. Научно-технические проблемы создания и производства роторно-поршневых двигателей для БПЛА за рубежом // Инноватика и экспертиза: научные труды. - 2019. - № 3(28). - С. 143-156
44. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. - СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. - 204 с.

References

1. Timchenko B.G. Issledovanie zadachi posadki BPLA na sudno-nositel'. SPb, 2018; 41. (In Russ)
2. Zholymbayev A.O. Especially civil applications of unmanned aerial vehicles on the example of the possibilities of their use in emergency situations. *Nauchnyj al'manah*. 2016;1-3(15): 23-30 (In Russ)
3. Dronova O.B., Khranova E.S. The Genesis of Improving Functional Capabilities of Unmanned Aerial Vehicles Used as Forensic Equipment. *Siberian Criminal Procedure and Criminalistic Readings*. 2022;1(35): 77-87 (In Russ)
4. Tereh E.G., Meshcheryakov S.A. The use of unmanned aerial vehicles in the interests of the Ministry of Emergency Situations and internal troops of the Republic of Belarus. Ensuring life safety: problems and prospects: collection of materials of the IX international scientific and practical conference of young scientists: cadets (students), master's students and adjuncts (graduate students): in 2 hours. Part 1. - Minsk: KII, 2015;136-137
5. Voropaev N.P. Use of unmanned aerial vehicles in the interests of emercom of Russia. Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2014.;4: 13-17(In Russ)
6. Polyakova E.V. Possibilities of undersatellite remote sounding of the earth with use of CropCam unmanned aerial vehicles in the conditions of the European North. *Arctic Environmental Research*. 2010; 2:22-26
7. Zaporozhtsev D.V. Critical infrastructure facilities in the Caspian region as targets of terrorist attacks and sabotage *Vestnik Akademii voennyh nauk*. 2022;1(78):33-37(In Russ)
8. V RF rastyot kolichestvo atak na informacionnye sistemy i fizicheskuyu infrastrukturu predpriyatij, soglasno dannym ot «Laboratorii Kasperskogo». - URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/12/12/v-rf-rastjot-kolichestvo-atak-na-informacionnye-sistemy-i-fizicheskuyu-infrastrukturu-predpriyatij-soglasno-laboratorii.html> (date of request 24.03.2023) (In Russ)
9. Shilov O.V. Protection of the upper hemisphere of fuel and energy complex and industrial facilities from air attacks using artificial intelligence. *Business Russia. TV Forum. Perimeter and upper hemisphere protection technologies for large and distributed objects*.2023; 25. (In Russ)
10. Dazhunts B.E., Tazetdinov A.A., Babushkin I.N., Lushpay I.V. Issues of managing and ensuring the protection of unmanned aerial vehicles from interference. *Student Forum* 2022;17-2(196): 67-68(In Russ)
11. Zakharov A.N. Corporate security of the company in the context of the development of the Arctic regions of Russia. *World civilizations*. 2021;6(1): 44-49(In Russ)
12. Blokhin K.V., Vikhryan A.P. High-tech terrorism is a threat to civilization of the 21st century. *International Legal Courier*. 2020;5:8-13(In Russ)
13. A police unit will be created in Kuban to suppress drone attacks. - URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5889828> (access date 03/24/2023) (In Russ)
14. Protection against combat drones was practiced at the control points of the Caspian flotilla. - URL: https://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12273065@egNews (date accessed 03/12/2023) (In Russ)
15. Details have emerged of a drone attack on a defense plant in Iran. - URL: <https://www.mk.ru/politics/2023/01/29/poyavilis-podrobnosti-ataki-dronov-na-oboronnyy-zavod-v-irane.html> (access date 03/12/2023) (In Russ)
16. Attack of the 21st century: how small drones caused huge damage to Saudi Arabia. - URL: <https://tech.onliner.by/2021/06/26/malenkie-drony-nanesli-ogromnyj-uron> (date accessed 03/10/2023)
17. The Bryansk enterprise suffered after a drone attack. - URL: <https://bel.ru/news/2022-12-06/bryanskoe-predpriyatie-postradalo-posle-ataki-bespilotnikov-2608444> (date accessed 03/12/2023)
18. The Investigative Committee will find out the circumstances of drone attacks on objects on Russian territory. - URL: <https://www.forbes.ru/society/485524-sk-vyasnit-obstoatel-stva-atak-bespilotnikov-na-ob-ekty-na-territorii-rossii> (access date 03/18/2023)
19. Authorities confirmed a UAV attack on a civilian infrastructure facility in the Moscow region. - URL: https://www.dp.ru/a/2023/02/28/Vlasti_podtverdili_ataku (access date 03/18/2023) (In Russ)
20. Drone attacks on Russian cities and the closure of the sky in St. Petersburg. What is known. - URL: <https://rtvi.com/news/ataka-bespilotnikov-na-rossijskie-goroda-i-zakrytie-neba-v-peterburge-cto-izvestno/> (date accessed 03/18/2023) (In Russ)
21. A financial company discovered that they were trying to hack it using a drone with WiFi Pineapple on board. - URL: <https://xakep.ru/2022/10/13/drone-hacking/> (date accessed 03/20/2023) (In Russ)
22. Hackers used DJI drones to hack a bank. - URL: <https://quadronews-ru.turbopages.org/quadronews.ru/s/hakery-vzlomali-bank-dronom-dji.html/> (date accessed 03/20/2023) (In Russ)
23. High-tech bank robbery using a DJU Mini drone. - URL: <https://dronomania.ru/news/vysokotehnologichnoe-ograblenie-banka-s-pomoshhyu-drona-dji-mini.html?ysclid=leyp8qf8q9192940977>(date accessed 03/20/2023)(In Russ)
24. Motasova D.D. International legal regulation of the use of pilotless aerial vehicles. *Transport law and security*. 2019;1(29):116-128(In Russ) (In Russ)
25. Commission Implementing Regulation (EU) No 923/2012 of 26 September 2012 laying down the common rules of the air and operational provisions regarding services and procedures in air navigation and amending

26. Reglament za izp"nenie (ES) No 1035/2011 na komisijata ot 17 oktombri 2011 godina za opredelyane na obshchi iziskvaniya pri dostavyaneto na aeronavigacionni uslugi
27. Decree of the Government of the Russian Federation of May 25, 2019 No. 658 On approval of the Rules for accounting for unmanned civil aircraft with a maximum take-off weight from 0.25 kilograms to 30 kilograms imported into the Russian Federation or produced in the Russian Federation (In Russ)
28. Kurchenko N.Yu., Truflyak E.V. Regulatory framework for the use of unmanned aerial systems. - Krasnodar: KubSAU, 2020; 45 . (In Russ)
29. Analysis of the current state of the regulatory legal framework of the Russian Federation in the field of use of airspace by unmanned aircraft systems and development of proposals for its improvement. - URL: <https://russiadrone.ru/publications/4-analiz-sovremennogo-sostoyaniya-normativnoy-pravovoy-bazy-rossiyskoy-federatsii-v-oblasti-ispolzov/> (date accessed 03/28/2023) (In Russ)
30. Law No. 195-FZ of December 30, 2001 "Code of the Russian Federation on Administrative Offences" (In Russ)
31. Vinokurova V.V., Vytovtov A.V., Shumilin V.V. Administrative and legal regulation of the use of unmanned aerial vehicles in the Russian Federation. Problems of ensuring security during the liquidation of consequences of emergency situations. 2015;1: 6. (In Russ)
32. Law No. 63-FZ of June 13, 1996 "Criminal Code of the Russian Federation" (In Russ)
33. Decision of the SCRF under the Ministry of Information and Communications of Russia dated 05/07/2007 N 07-20-03-001 "On the allocation of radio frequency bands to short-range devices"
34. State Duma deputies launched a reform of the protection of the Russian Federation from drones. - URL: <https://ura.news/news/1052630111> (access date 03/28/2023) (In Russ)
35. Pat. 2755951 Russian Federation, MPK F41H 11/02, F41H 13/00. Method of active protection of an object from the upper hemisphere / V.A. Podgornov, M.Yu. Naumenko, S.G. Vagin, A.E. Kipkaev, G.A. Krestyaninov, S.V. Podgornov; applicant and patent holder Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center - VNIITF named after Academician E.I. Zabakhin" - No. 2020144323; application 12/29/2020 ; publ. 09/23/2021, Bulletin. No. 27(In Russ)
36. Pat. 185949 Russian Federation, MPK F41H 11/04, B64D 1/00, F41H 13/00. Device for combating unmanned aerial vehicles / A.G. Neskin, V.I. Bzyta, A.N. Zelenov, M.L. Sokolov, V.A. Podgornov, A.E. Kipkaev; applicant and patent holder Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center - VNIITF named after Academician E.I. Zabakhin" - No. 2018131051; application 10/08/2018 ; publ. 12/25/2018; 36(In Russ)
37. Attacking UAVs and systems to counter them, review. - URL: <https://habr.com/ru/post/365625/> (access date 03/29/2023) (In Russ)
38. Vulnerability of control channels for US tactical UAVs: technological aspects. - URL: <https://topwar.ru/106252-uyazvimost-kanalov-upravleniya-shtatovskimi-takticheskimi-bpla-tehnologicheskie-momenty.html> (access date 03/29/2023) (In Russ)
39. Countering UAVs. Protection against drones and quadcopters. URL: <https://www.ao-avtomatika.ru/media/blog/protivodeystvie-bpla-zashchita-ot-dronov-ikvadrokopterov/> #%D0%92%D0%B8%D0%B4%D1%8B1%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%20% (date of access 03/29/2023) (In Russ)
40. Knowledge base about attacks on unmanned aerial vehicles / E.S. Basan, A.S. Basan, A.V. Nekrasov [and others] // System synthesis and applied synergetics: collection of scientific works of the X All-Russian scientific conference, pos. Nizhny Arkhyz, September 28 – October 2, 2021; Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University, 2021; 170-178(In Russ)
41. Krivenkov D.V. Countering unauthorized acquisition of information by drones Technical and mathematical sciences. Student Scientific Forum: Electronic collection of articles based on materials from the II Student International Scientific and Practical Conference. LLC "International Center for Science and Education", 2018;2: 34-39(In Russ)
42. Methods against UAVs. - URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/1601-metody-protivodejstviya-bpla> (date accessed 03/29/2023) (In Russ)
43. Kostyuchenkov A.N., Minin V.P., Klementyev S.A., Fedin A.V. Scientific and technical problems of the creation and production of rotary piston engines for UAVs abroad. Innovation and expertise: scientific works. 2019; 3(28):143-156(In Russ)
44. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles. Monograph. St. Petersburg: High technology, 2020; 204.(In Russ)

Сведения об авторах:

Лоскутов Иван Андреевич, Инженер – конструктор, отдел 55; преподаватель автоматизации; faxvex@ya.ru

Репенко Виктор Андреевич, Магистрант, faxvex@ya.ru

Information about the authors:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor in the Department 55, faxvex@ya.ru

Viktor A. Repenko, Master's student; faxvex@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 28.06.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.07.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 20.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004. 032.26

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-110-117



Оригинальная статья/ Original article

**Анализ и комплексная оценка развития и применения нейросетевой
диалоговой системы ChatGPT**

Д.А. Мачуева, Д.Р. Бараев, Т. М.-А. Бечуркаев

Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,
364061, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100, Россия

Резюме. Цель. На сегодняшний день значимые и во многом сенсационные результаты достигаются в области систем искусственного интеллекта, а бот ChatGPT, в основе которого лежит нейронная сеть GPT-3, называют настоящей революцией в мире технологий. **Цель.** Целью исследования является анализ и оценка особенностей применения, преимуществ и ограничений, а также факторов развития и причин необычайной популярности нейросетевой диалоговой системы ChatGPT. **Методы.** Проведен обзор отечественных и зарубежных источников, систематизация данных, анализ архитектуры и механизма действия нейронной сети. **Результат.** Обобщены и оценены функции, возможности, сферы и риски применения ChatGPT. **Вывод.** Основная функция ChatGPT – генерация текста на основе заданных входных данных – позволяет эффективно решать широкий спектр задач, ранее не поддававшихся автоматизации, причем качество решения сопоставимо с работой человека. Важно избегать рисков, связанных с возможностью злоупотребления и получения некорректных и вредоносных ответов от искусственного интеллекта. Для этого необходимы меры контроля, разработка и введение стандартов и норм.

Ключевые слова: искусственный интеллект, языковая модель, нейронная сеть, генерация текста.

Для цитирования: Д.А. Мачуева, Д.Р. Бараев, Т. М.-А. Бечуркаев. Анализ и комплексная оценка развития и применения нейросетевой диалоговой системы ChatGPT. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):110-117. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-110-117

**Analysis and comprehensive assessment of the development and application
of the neural network dialogue system ChatGPT**

D.A. Machueva, D.R. Baraev, T.M.-A. Bechurkaev

M.D. Millionshchikov Academician Grozny State Petroleum Technical University,
100 Kh. Isaev Ave., Grozny 364061, Russia

Abstract. Objective. Today, significant and in many ways sensational results are being achieved in the field of artificial intelligence systems, and the ChatGPT bot, which is based on the GPT-3 neural network, is called a real revolution in the world of technology. The aim of the study is to analyze and evaluate the application features, advantages and limitations, as well as development factors and reasons for the extraordinary popularity of the neural network dialogue system ChatGPT. **Method.** A review of domestic and foreign sources, systematization of data, analysis of the architecture and mechanism of action of the neural network was carried out. **Result.** Functions, opportunities, scopes and risks of using ChatGPT are summarized and evaluated. **Conclusions.** The main function of ChatGPT – text generation based on given input data – allows to effectively solve a wide range of tasks that have not been automated before, and the quality of the solution is comparable to human work. However, it is important to avoid the risks associated with the possibility of abuse and receiving incorrect and malicious responses

from artificial intelligence. This requires control measures, the development and introduction of standards and norms.

Keywords: artificial intelligence, language model, neural network, text generation

For citation: D. A. Machueva, D.R. Baraev, T. M.-A. Bechurkaev. Analysis and comprehensive assessment of the development and application of the neural network dialogue system ChatGPT. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):110-117. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-110-117

Введение. В современном мире постоянно растет уровень развития информационных технологий, скорость обработки данных, мощность техники. На сегодняшний день значимые и во многом сенсационные результаты достигаются в области систем искусственного интеллекта (ИИ). Появление новых архитектур нейронных сетей позволяет значительно расширить сферы их применения и наглядно продемонстрировать их эффективность и перспективность. Одним из ключевых направлений исследований в технологиях интеллектуальной обработки информации является обработка естественного языка (англ. Natural Language Processing, NLP), включающая автоматизацию задач анализа, понимания и генерации текстов на естественном языке.

Обзор литературы показывает, что данная тема исключительно востребована [1-5]. К задачам NLP относят морфологический анализ, распознавание именованных существностей, моделирование предложений, категоризацию текстов и анализ эмоциональной окраски, определение слов и предложений, имеющих информационную значимость, анализ тематики, ответы на вопросы и машинный перевод [6, 7]. Это позволяет систематизировать, обобщать информацию и составлять отчеты, проверять подлинность документов, проводить автоматическое рецензирование, определять стиль текста и его тональность, выдавать рекомендации, составлять описания и логично строить повествование [8-11]. Все перечисленное в настоящее время с успехом выполняет нейросеть GPT, наиболее крупная и продвинутая языковая модель в мире.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение принципов работы, анализ и оценка особенностей применения, преимуществ и ограничений, а также факторов развития и причин необычайной популярности чат-бота с искусственным интеллектом ChatGPT. Generative Pre-Trained Transformers (GPT) – это языковые модели, разработанные компанией OpenAI. Они используются для генерации текста, ответов на вопросы, перевода и других задач, связанных с обработкой естественного языка [12].

Первая модель GPT, обученная на больших массивах текстов, была выпущена в июне 2018 года. Эта нейронная сеть, имевшая 117 миллионов параметров, позволила показать, как генеративная языковая модель может обрабатывать зависимости между словами и предложениями. В дальнейшем была выпущена модель GPT-2, в которую уже были заложены некоторые ограничения из-за опасений возможного злоупотребления. Данная модель имела 1,5 миллиарда параметров, была обучена на датасете WebText, содержащем тексты из интернета, и могла обрабатывать большие объемы текстов [13].

Нейросеть GPT-3, выпущенная в 2020 году, представляет собой улучшенную версию GPT-2 с более чем 175 миллиардами параметров. Эта модель имеет значительный потенциал в области решения задач, связанных с естественным языком (рис. 1).



Рис. 1. Развитие моделей семейства GPT

Fig. 1. Development of GPT models

В целом модели GPT являются мощными инструментами для обработки и генерации текста. Их дальнейшее исследование и разработка необходимы, чтобы повысить точность и стабильность этих моделей и развить эффективные методы безопасного использования. Однако уже сейчас бот ChatGPT, в основе которого лежит нейронная сеть GPT-3, называют настоящей революцией в мире искусственного интеллекта.

ChatGPT – чат-бот с искусственным интеллектом, т.е. программа, с которой пользователи могут взаимодействовать в режиме диалога. По данным официальной статистики (рис. 2) [14-16]:

1. В первую неделю после запуска ChatGPT набрал 1 миллион пользователей, что является рекордом по самому быстрому росту пользовательской базы в истории.
2. В настоящее время сайт ChatGPT ежемесячно посещает более 600 миллионов человек, а число активных пользователей составляет около 100 миллионов.
3. По прогнозам OpenAI, доход ChatGPT составит 200 миллионов долларов к концу 2023 года и 1 миллиард долларов к концу 2024 года.
4. Обучение модели заняло 34 дня.
5. Стоимость работы инструмента на облаке Azure Cloud компании Microsoft составляет около 100000 долларов в день или 3 миллиона долларов в месяц.
6. Согласно опросам, в среднем 53% людей не могут определить, что контент ChatGPT сгенерирован искусственным интеллектом.

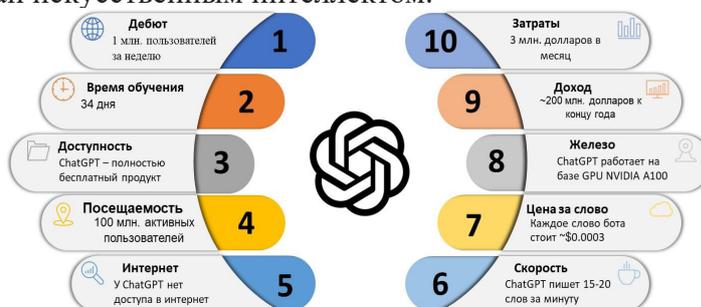


Рис. 2. Данные статистики ChatGPT

Fig. 2. ChatGPT statistics data

Методы исследования. Ключевой особенностью нейросети GPT-3 является архитектура, называемая трансформером. Идея трансформеров заключается в том, чтобы токенизировать текст, то есть разделить его на отдельные слова для анализа.

Задача ChatGPT, в общем случае, – продолжить текст наиболее логичным образом, подобрав подходящий вариант для следующего добавляемого слова – токена [17]. При этом вводится понятие «механизма внимания», что позволяет нейросети расставлять акценты и при принятии решения больше учитывать те или иные определенные части последовательности – «запоминать» более ранние значимые слова.

Токены представляются в виде массивов (векторов) чисел – эмбеддингов (от англ. embedding – «вложение»). GPT-3 оперирует векторами длиной 12288 (рис. 3). Также в эмбеддинг включена информация о позиции токена в тексте (индекс) [18].

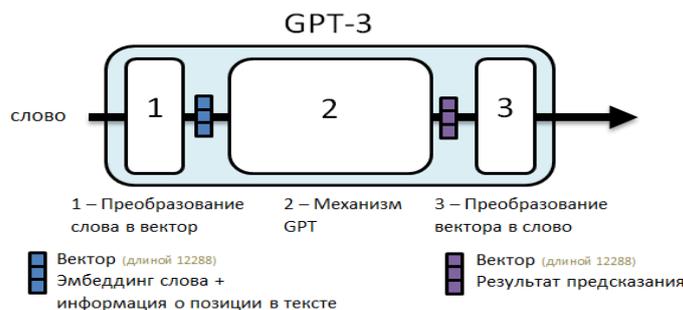


Рис. 3. Работа модели GPT-3

Fig. 3. Operation of the GPT-3 model

Полученные векторы поступают на рассмотрение стека декодеров (их 96 в GPT-3). Каждый из 96 блоков использует механизм внимания и работает независимо с разными фрагментами эмбедингов (рис. 4).

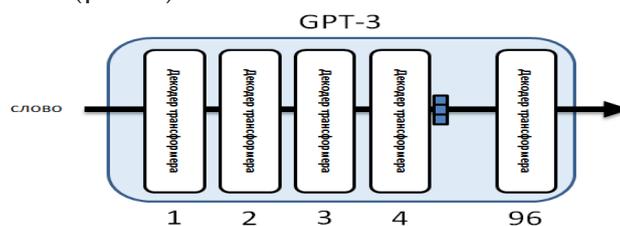


Рис. 4. Стек декодеров

Fig. 4. Decoder stack

Каждый блок имеет свой собственный шаблон весов внимания и выдает новый «взвешенный» вектор. Происходит рекомбинация фрагментов в эмбедингах, связанных с различными токенами, имеющими определенный вес. Когда весь список эмбедингов проходит через последний блок, после всех преобразований на выходе получается распределение вероятностей следующего токена для продолжения текста.

Следует уточнить, что используемые нейросетью веса не задаются явно, а являются результатом ее обучения [19]. Тренировочной базой для нейронной сети является огромное множество текстов, написанных людьми в цифровой форме, – порядка 5 миллионов оцифрованных книг (примерно 100 миллиардов слов текста), а также все общедоступные страницы в глобальной сети.

На первом этапе сеть GPT училась расставлять приоритеты слов на предоставленном ей наборе примеров (обучение с учителем). Второй этап, значительно повысивший точность работы и оказавший большое влияние на успех системы, – обучение с подкреплением. Этот способ подразумевает прямое взаимодействие чат-бота с реальными людьми и получение от них обратной связи [20].

Обсуждение результатов. Как искусственный интеллект ChatGPT имеет множество возможностей, которые могут быть использованы в различных областях. Его основная функция – генерация текста на основе заданных входных данных – может быть полезна во многих сферах человеческой деятельности.

Одним из главных преимуществ ChatGPT является способность к автоматическому созданию контента: он может использоваться для создания текстов на различные темы, включая новости, статьи, рекламные материалы и многое другое. В частности, в области образования ИИ может применяться как инструмент для создания обучающих материалов, тестовых заданий, лекций и учебников. Нейронная сеть может анализировать тексты и генерировать схожие материалы с высоким процентом уникальности. Это позволит преподавателям экономить время, затрачиваемое на создание учебных материалов, и улучшать качество обучения [21]. В бизнесе ChatGPT может быть использован для автоматической генерации текста для сайтов, брендинга (создания положительного образа компании), рекламы и маркетинга. Он способен создавать тексты, основанные на определенных ключевых словах и фразах, а также адаптировать контент под различные целевые аудитории [22]. Также ИИ может найти применение в медицине при автоматической генерации медицинских отчетов, диагностических заключений, исследовательских статей. Способность анализировать большие объемы информации поможет медицинским специалистам в повышении точности диагностики и лечения [23, 24].

ChatGPT может работать в качестве персонального ассистента или помощника, например, автоматически составлять ответы на электронные письма, заметки и напоминания, а также выполнять другие рутинные задачи. Благодаря способности обучаться на больших объемах данных ChatGPT постоянно улучшает свою производительность и точность по мере получения новой информации. Кроме того, чат-бот может быть настроен на работу с конкретной тематикой или отраслью, что позволяет ему генерировать более точный и релевантный контент. Он отвечает на вопросы, не просто копируя готовый ответ из имеющихся в его распоряжении материалов,

а анализируя и структурируя его для удобства восприятия. Благодаря этому, ChatGPT может поддерживать беседу, давать пояснения [25]. Важнейшей особенностью является способность ChatGPT «запоминать» разговор, в дальнейшем используя сложившийся контекст для продолжения диалога с пользователем, доработки и исправления своих ответов. Ответы ChatGPT можно корректировать, давая дополнительную информацию или задавая наводящие вопросы.

Необходимо отметить, что результаты обучения на корпусах WebText и других больших объемах текстов могут иметь свои ограничения и приводить к проблемам с точностью из-за невозможности полностью охватить огромное количество возможных контекстов и вариантов предложений в естественном языке. ChatGPT требует огромных объемов данных для своей работы, и это может стать проблемой, так как не всегда возможно найти достаточно качественных и объемных наборов данных, необходимых для обучения модели.

Вторым фактором является время обучения. Длительный период обучения нейросети может быть непрактичным для ряда задач, которые требуют быстрого ответа. Также для обучения модели ИИ требуется мощное оборудование, что создает финансовые проблемы для организаций или индивидуальных пользователей. Иногда ChatGPT генерирует текст, который имеет недостаточную логическую связность между предложениями. Это может сделать текст непонятным для читателя и усложнить задачу обработки естественного языка. Также у искусственного интеллекта наблюдаются сложности с восприятием сарказма и иронии, что в свою очередь может привести к неправильному пониманию текста. В некоторых нетривиальных случаях ChatGPT сложно даются предсказания последовательности, вследствие чего бот может выдавать ошибки в ответах на вопросы.

Обобщая сказанное, возможности, преимущества и ограничения чат-бота приведены в табл. 1 в формате SWOT-анализа.

Таблица 1. SWOT-анализ продукта ChatGPT
Table 1. SWOT analysis of the ChatGPT product

Сильные стороны (Strengths)	Слабые стороны (Weaknesses)
Высокая скорость генерации и выдачи ответа Широкий спектр заложенных знаний Экономия времени и усилий пользователя Персонализация взаимодействия с пользователем Универсальность High speed of generating and issuing a response Wide range of embedded knowledge Saving user time and effort Personalizing the user experience Versatility	Необходимость больших объемов данных Длительный период обучения Необходимость мощного оборудования Недостаточная логическая связность ответов Сложности с восприятием сарказма и иронии The need for large amounts of data Long training period The need for powerful equipment Insufficient logical coherence of answers Difficulty understanding sarcasm and irony
Возможности (Opportunities)	Угрозы (Threats)
Автоматическое создание контента и адаптация под различные целевые аудитории Улучшение качества образования Помощь в ведении бизнеса Повышение точности постановки диагнозов и лечения Персональный помощник Возможность работы с большими объемами данных Automatic content creation and adaptation for various target audiences Improving the quality of education Business assistance Improving the accuracy of diagnoses and treatment Personal assistant Ability to work with large volumes of data	Неправильное интерпретирование текста, что может привести к неверным рекомендациям и ответам Нарушение конфиденциальности данных Возможность злоупотреблений, связанных с генерацией, некорректных и вредоносных ответов Misinterpretation of text, which can lead to incorrect recommendations and answers Data breach Possibility of abuse associated with the generation of incorrect and malicious responses

Вывод. Бурное развитие технологий искусственного интеллекта в целом и нейронных сетей в частности стало возможным благодаря росту вычислительных мощностей и доступности больших корпусов текстовых данных для обучения [26]. Новые архитектуры позволили эффективно решать широкий спектр задач, ранее не поддававшихся автоматизации, причем качество решения сопоставимо с работой человека, а во многих случаях – ее превосходит.

Система ChatGPT взаимодействует с пользователями в режиме естественного диалога. Такой подход послужил популяризации ИИ как среди обычных потребителей, так и среди крупных компаний. Один из основателей Microsoft Билл Гейтс опубликовал текст о том, как нейросети изменят нашу жизнь, и что принесет человечеству искусственный интеллект: «Эра искусственного интеллекта началась» [27].

Использование моделей GPT может привести к новым достижениям во многих областях, однако следует помнить, что их внедрение может представлять опасность при злоупотреблениях их возможностями. Без должного контроля, введения соответствующих стандартов и норм ИИ может генерировать некорректные, нежелательные или даже вредоносные ответы в зависимости от контекста и используемого массива данных.

Таким образом, необходим взвешанный подход, тщательное планирование и учет рисков, связанных с потенциальными отрицательными последствиями. Именно это утверждается в открытом письме с призывом приостановить обучение нейросетей, которое подписали и опубликовали предприниматель Илон Маск, сооснователь Apple Стив Возняк и более тысячи экспертов в сфере высоких технологий и искусственного интеллекта: «Мощные ИИ-системы должны разрабатываться лишь при условии того, что человечество будет уверено, что их воздействие будет позитивным, а риски – управляемыми» [28].

Библиографический список:

1. Гринин И.Л. Работа модели генерации текста с помощью нейронных сетей как составной системы: модульный анализ модуль первый. Языковая модель: работа с текстовыми вхождениями // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 7. – С. 118-122.
2. Харламов А.А., Ле Мань Ха. Нейросетевые подходы к классификации текстов на основе морфологического анализа // Труды МФТИ. – 2017. – № 2(34). – С. 143-150.
3. Богомолов Ю.А. Обзор моделей нейронных сетей для обработки естественного языка // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2020. – № 4. – С. 203-217.
4. Кручинин В.В., Кузовкин В.В. Обзор существующих методов автоматической генерации задач с условиями на естественном языке // Компьютерные инструменты в образовании. – 2022. – № 1. – С. 85-96. DOI: 10.32603/2071-2340-2022-1-85-96.
5. Прошина М.В. Современные методы обработки естественного языка: нейронные сети // Экономика строительства. – 2022. – № 5. – С. 27-42.
6. Курейчик В.В., Родзин С.И., Бова В.В. Методы глубокого обучения для обработки текстов на естественном языке // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2(226). – С. 189-199. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-2-189-199.
7. Маслова М.А. Методы определения целевого предложения для автоматизированной генерации тестовых вопросов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5(89). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n5y2022/7673>
8. Митренина О.В. Нейронные сети и компьютерная обработка языка // Journal of Applied Linguistics. – 2019. – № 2. – С. 399-408.
9. Козловский А.В., Мельник Я.Э., Волощук В.И. О подходе для автоматической генерации сюжетно связанного текста // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 160-167. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-160-168.
10. Хазеев Д.Р. Приложение нейронных сетей к определению стиля текста // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2019. – № 22. – С. 121-124.
11. Черкасов А.Н., Туркин Е.А. Выбор оптимальной архитектуры искусственной нейронной сети для задачи классификации текстов // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – № 1(276). – С. 62-66.
12. Generative pre-trained transformer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Generative_pre-trained_transformer (дата обращения 24.04.2023).
13. GPT-1, GPT-2 and GPT-3 models explained [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://360digitmg.com/blog/types-of-gpt-in-artificial-intelligence> (дата обращения 24.04.2023).

14. Статистика чат-бота ChatGPT в 2023 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inclient.ru/chatgpt-stats/> (дата обращения 20.04.2023).
15. 91 Important ChatGPT Statistics & User Numbers in April 2023 (GPT-4, Plugins Update) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nerdynav.com/chatgpt-statistics/> (дата обращения 20.04.2023)
16. ChatGPT Statistics 2023 All the latest statistics about OpenAI's chatbot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tooltester.com/en/blog/chatgpt-statistics/> (дата обращения 20.04.2023).
17. How does ChatGPT work? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zapier.com/blog/how-does-chatgpt-work/> (дата обращения 25.04.2023).
18. What Is ChatGPT Doing ... and Why Does It Work? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://writings.stephenwolfram.com/2023/02/what-is-chatgpt-doing-and-why-does-it-work/> (дата обращения 25.04.2023).
19. How ChatGPT actually works [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.assemblyai.com/blog/how-chatgpt-actually-works/> (дата обращения 20.04.2023).
20. How ChatGPT Works: The Model Behind The Bot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/how-chatgpt-works-the-models-behind-the-bot-1ce5fca96286> (дата обращения 20.04.2023).
21. Elgohary H.K. A., Al-Dossary H.K. The effectiveness of an educational environment based on artificial intelligence techniques using virtual classrooms on training development // International Journal of Instruction. – 2022. – № 15(4). – pp. 1133-1150. DOI: 10.29333/iji.2022.15460a.
22. Обзор чат-бота ChatGPT: что это, возможности и примеры использования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/mtt/articles/711052/> (дата обращения 20.04.2023).
23. Наркевич А.Н., Виноградов К.А., Параскевопуло К.М., Мамедов Т.Х. Интеллектуальные методы анализа данных в биомедицинских исследованиях: сверточные нейронные сети // Экология человека. – 2021. – № 5. – С. 53-64.
24. Almazaydeh L., Abuhelaleh M., Tawil A., Elleithy K. Clinical text classification with word representation features and machine learning algorithms // International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE). – 2023. – № 19(04). – pp. 65-76. DOI: 10.3991/ijoe.v19i04.36099.
25. Казанцев Т. ChatGPT и революция искусственного интеллекта / Т. Казанцев. – Серия: Технологии, 2023. – 190 с.
26. Ермоленко Т.В. Классификация ошибок в тексте на основе глубокого обучения // Проблемы искусственного интеллекта. – 2019. – № 3(14). – С. 47-57.
27. Gates Notes. The Age of AI has begun [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gatesnotes.com/The-Age-of-AI-Has-Begun> (дата обращения 25.03.2023).
28. Pause Giant AI Experiments: An Open Letter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/> (дата обращения 25.03.2023).

References

1. Grinin I.L. Operation of the text generation model using neural networks as a composite system: modulus analysis the module first. NLP-model: working with text embeddings. *Innovacii i investicii*, 2020; 7:18-122 (In Russ).
2. Kharlamov A.A., Le Manh Ha. Neural network approaches to the classification of texts based on morphological analysis. *Trudy MFTI*, 2017; 2(34): 143-150 (In Russ).
3. Bogomolov Yu. A. Overview of neural network models for natural language processing. *Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal dlja studentov i prepodavatelej «StudNet»*, 2020; 4: 203-217 (In Russ).
4. Kruchinin V.V., Kuzovkin V.V. Overview of Existing Methods for Automatic Generation of Tasks with Conditions in Natural Language. *Computer tools in education*, 2022; 1:85-96. DOI: 10.32603/2071-2340-2022-1-85-96 (In Russ).
5. Proshina M.V. Modern methods of natural language processing: neural networks. *Jekonomika stroitel'stva*, 2022; 5: 27-42 (In Russ).
6. Kureichik V.V., Rodzin S.I., Bova V.V. Deep learning methods for natural language text processing. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2022;2(226):189-199. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-2-189-199 (In Russ).
7. Maslova M.A. Methods for determining the target offer for automated generation of test questions. *Inzhenernyj Vestnik Dona*, 2022;5(89). Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7673> (In Russ).
8. Mitrenina O.V. Artificial neural networks and natural language processing. *Journal of Applied Linguistics*, 2019; 2: 399-408 (In Russ).
9. Kozlovsky A.V., Melnik Ya.E., Voloshchuk V.I. On the approach for automatic generation of narrative-linked text. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2022; 9:160-167. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-160-168 (In Russ).
10. Hazeev D.R. Application of neural networks to determining text style. *Novye informacionnye tehnologii v avtomatizirovannyh sistemah*, 2019;22:121-124 (In Russ).

11. Cherkasov A.N., Turkin E.A. Choosing the appropriate artificial neural network architecture for text classification. Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 4: Estestvenno-matematicheskie i tehnicheckie nauki, 2021;1(276):62-66 (In Russ).
12. Generative pre-trained transformer. Available at: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Generative_pre-trained_transformer (accessed 24.04.2023).
13. GPT-1, GPT-2 and GPT-3 models explained. Available at: <https://360digitmg.com/blog/types-of-gpt-in-artificial-intelligence> (accessed 24.04.2023).
14. Statistics of chatbot ChatGPT in 2023. Available at: <https://inclient.ru/chatgpt-stats/> (accessed 20.04.2023).
15. 91 Important ChatGPT Statistics & User Numbers in April 2023 (GPT-4, Plugins Update). Available at: <https://nerdynav.com/chatgpt-statistics/> (accessed 20.04.2023)
16. ChatGPT Statistics 2023 All the latest statistics about OpenAI's chatbot. Available at: <https://www.tooltester.com/en/blog/chatgpt-statistics/> (accessed 20.04.2023).
17. How does ChatGPT work. Available at: <https://zapier.com/blog/how-does-chatgpt-work/> (accessed 25.04.2023).
18. What Is ChatGPT Doing ... and Why Does It Work. Available at: <https://writings.stephenwolfram.com/2023/02/what-is-chatgpt-doing-and-why-does-it-work/> (accessed 25.04.2023).
19. How ChatGPT actually works. Available at: <https://www.assemblyai.com/blog/how-chatgpt-actually-works/> (accessed 20.04.2023).
20. How ChatGPT Works: The Model Behind The Bot. – Available at: <https://towardsdatascience.com/how-chatgpt-works-the-models-behind-the-bot-1ce5fca96286> (accessed 20.04.2023).
21. Elgohary H.K. A., Al-Dossary H.K. The effectiveness of an educational environment based on artificial intelligence techniques using virtual classrooms on training development. International Journal of Instruction, 2022, no. 15(4), pp. 1133-1150. DOI: 10.29333/iji.2022.15460a.
22. ChatGPT chatbot overview: what it is, features and use cases. Available at: <https://habr.com/ru/companies/mtt/articles/711052/> (accessed 20.04.2023).
23. Narkevich A.N., Vinogradov K.A., Paraskevopulo K.M., Mamedov T.H. Intelligent data analysis in biomedical research: convolutional artificial neural networks. Human Ecology, 2021;5: 53-64 (In Russ).
24. Almazaydeh L., Abuhelaleh M., Tawil A., Elleithy K. Clinical text classification with word representation features and machine learning algorithms. International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 2023;19(04):65-76. DOI:10.3991/ijoe.v19i04.36099.
25. Kazancev T. ChatGPT and the AI revolution. Serija: Tehnologii, 2023;190.
26. Yermolenko T.V. Classification of errors in the text based on deep learning. Problems of Artificial Intelligence, 2019;3(14):47-57 (In Russ).
27. Gates Notes. The Age of AI has begun. Available at: <https://www.gatesnotes.com/The-Age-of-AI-Has-Begun> (accessed 25.03.2023).
28. Pause Giant AI Experiments: An Open Letter. Available at: <https://futureoflife.org/open-letter/pause-giant-ai-experiments/> (accessed 25.03.2023).

Сведения об авторах:

Мачуева Дина Алуевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационные технологии»; ladyd_7@mail.ru ORCID 0000-0001-6827-8998

Бараев Дени Рамзанович, студент, кафедра «Информационные технологии»; skyrim23451@gmail.com

Бечуркаев Тимур Магомед-Алиевич, студент, кафедра «Информационные технологии»; timurkekq@gmail.com

Information about authors:

Dina A. Machueva, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department Department of Information Technologies; ladyd_7@mail.ru ORCID 0000-0001-6827-8998

Denis R. Baraev, Student, Department of Information Technologies; skyrim23451@gmail.com

Timur M.-A. Bechurkaev, Student, Department of Information Technologies; timurkekq@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 28.06.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 20.07.2023.

Принята в печать / Accepted for publication 20.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.032



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-118-123

Оригинальная статья /Original article

Анализ и обучение модели нейронной сети распознавания дорожных знаков

А.У. Менциев¹, Т.Г. АйгуMOV², Э.М. Абдулмукминова²

¹Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова»,

¹364060, г. Грозный, Бульвар Дудаева, 17а, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр-т. Имама Шамиля, д. 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка и обучение модели нейронной сети на основе сверточных нейронных сетей для эффективного распознавания дорожных знаков на изображениях. **Метод.** Используются методы глубокого обучения, а именно сверточные нейронные сети, которые позволяют автоматически извлекать характеристики изображений и обучаться на большом наборе данных. Методика исследования включала следующие этапы: сбор и подготовку разнообразных данных дорожных знаков, создание и обучение модели нейронной сети на основе сверточных слоев, применение методов увеличения данных для повышения производительности модели, и оценку эффективности модели на тестовом наборе данных. **Результат.** Разработана модель нейронной сети, способная классифицировать различные типы дорожных знаков на основе входных изображений с высокой точностью. Модель была обучена на разнообразных и качественных данных, что позволило ей обобщать и распознавать дорожные знаки в различных условиях освещения и ракурсах камеры. Применение методов увеличения данных существенно повысило производительность модели и улучшило ее способность к обобщению. **Вывод.** Исследование подчеркивает важность использования разнообразных и качественных данных для обучения модели и применение методов увеличения данных для повышения ее производительности. Исследование подтверждает эффективность использования нейронных сетей, особенно сверточных нейронных сетей, для задачи распознавания дорожных знаков на изображениях.

Ключевые слова: анализ данных, нейронная сеть, распознавание данных, сверточные сети, машинное обучение.

Для цитирования: А.У. Менциев, Т.Г. АйгуMOV, Э.М. Абдулмукминова. Анализ и обучение модели нейронной сети распознавания дорожных знаков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):118-123. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-118-123

Analysis and training of a traffic sign recognition neural network model

A.U. Mentsiev¹, T.G. Aigumov², E.M. Abdulkumminova²

¹A.A. Kadyrov Chechen State University,

¹17a Dudaeva Boulevard, Grozny 364060, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the research is to develop and train a neural network model based on convolutional neural networks for effective recognition of road signs in images. **Method.** Deep learning methods were used, namely convolutional neural networks, which allow you to automatically extract image characteristics and train on a large data set. The research methodology included the following steps: collecting and preparing a variety of road sign data, creating and training a neural network model based on convolutional layers, applying data

augmentation methods to improve model performance, and evaluating the model's effectiveness on a test data set. **Result.** A neural network model is developed that can classify various types of road signs based on input images with high accuracy. The model was trained on diverse and high-quality data, allowing it to generalize and recognize road signs in different lighting conditions and camera angles. The use of data augmentation techniques significantly increased the model's performance and improved its generalization ability. **Conclusion.** The study highlights the importance of using diverse and high-quality data to train a model and applying data augmentation techniques to improve its performance. The study confirms the effectiveness of using neural networks, especially convolutional neural networks, for the task of recognizing road signs in images.

Keywords: data analysis, neural network, data recognition, convolutional networks, machine learning.

For citation: A.U. Mentsiev, T.G. Aigumov, E.M. Abdulmukminova. Analysis and training of a traffic sign recognition neural network model. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):118-123. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-118-123

Введение. Целью данного исследования является разработка и обучение модели нейронной сети для распознавания дорожных знаков на изображениях. Задача состоит в создании модели, способной классифицировать различные типы дорожных знаков на основе входных изображений. Для достижения этой цели будут использованы методы глубокого обучения, в частности, сверточные нейронные сети, а также алгоритмы увеличения данных для повышения производительности модели.

Постановка задачи. Научная новизна данного исследования заключается в применении нейронных сетей и методов глубокого обучения для задачи распознавания дорожных знаков. В частности, использование сверточных нейронных сетей позволяет изучать особенности изображений дорожных знаков и автоматически извлекать характеристики, которые помогут в их классификации. Также, применение методов увеличения данных позволяет улучшить производительность модели и повысить ее способность к обобщению.

Нейронные сети были впервые предложены в 1940-х годах как вычислительная модель, вдохновленная структурой и функцией биологических нейронов в мозге. Однако только в 1980-х годах был открыт алгоритм обратного распространения для обучения нейронных сетей, что привело к возрождению интереса и развитию в этой области. С тех пор было сделано много достижений в архитектуре, алгоритмах обучения и приложениях нейронных сетей, включая разработку сверточных нейронных сетей (convolutional neural networks CNN) для обработки изображений и видео, рекуррентных нейронных сетей (recurrent neural networks RNN) для последовательных данных и генеративно-сопоставительных сетей (generative adversarial networks GAN) для генерации новых данных. На современном уровне развития нейронных сетей преобладают модели глубокого обучения, которые представляют собой многоуровневые нейронные сети, и их успешное применение в таких областях, как компьютерное зрение, обработка естественного языка и обучение с подкреплением [1].

Методы исследования. Распознавание объектов. Исследования в области нейронных сетей – это динамичная и активная область с большим и растущим сообществом исследователей и практиков. Некоторые текущие области исследований включают разработку более эффективных и точных алгоритмов обучения, улучшение интерпретируемости нейронных сетей, изучение новых архитектур и типов слоев, разработку методов работы с неструктурированными и неполными данными, а также исследование связей между нейронными сетями и другими областями. машинное обучение и искусственный интеллект. Кроме того, продолжают исследования теоретических свойств нейронных сетей, таких как их выразительность и способность аппроксимировать функции, а также этические и социальные последствия их использования в различных приложениях [2]. Исследования нейронных сетей направлены на углубление нашего понимания этих мощных моделей и улучшение их возможностей для решения сложных задач.

Нейронные сети успешно применяются для распознавания дорожных знаков, то есть обнаружения и классификации дорожных знаков на изображениях или видеопотоках.

Обычно для этой задачи используются сверточные нейронные сети. Они хорошо подходят для задач обработки изображений, поскольку они могут изучать особенности необработанных данных пикселей, которые затем можно использовать для классификации. Входом в сеть является изображение дорожного знака, а выходом – классификация типа знака. Для обучения сети требуется большой набор данных дорожных знаков. Этот набор данных должен быть разнообразным и включать широкий спектр дорожных знаков, условий освещения и ракурсов камеры. Затем сеть обучается с помощью «обучения с учителем», когда оператор показывает сети изображение дорожного знака и правильную классификацию для этого знака [3]. После обучения сети ее можно использовать для обнаружения и классификации дорожных знаков в новых изображениях или видеопотоках. Это можно сделать в режиме реального времени, что делает его полезным для таких приложений, как беспилотные автомобили или усовершенствованные системы помощи водителю (advanced driver assistance systems ADAS) [4].

Нейронные сети продемонстрировали большие перспективы для распознавания дорожных знаков и являются ключевой технологией для развития транспорта и автономных транспортных средств.

Существует множество инструментов языков программирования для создания нейронных сетей, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны. В данной работе рассмотрим наиболее популярные инструменты.

1. Python + Keras: Python – популярный выбор для разработки нейронных сетей благодаря простоте использования и большому сообществу пользователей. Keras – это высокоуровневый API нейронной сети, созданный на основе Python и упрощающий создание и обучение нейронных сетей.
2. TensorFlow: TensorFlow – это платформа машинного обучения с открытым исходным кодом, разработанная Google, которая предоставляет ряд инструментов для создания и обучения нейронных сетей. Это одна из наиболее широко используемых сред для глубокого обучения, которая обеспечивает поддержку ряда языков, включая Python, C++ и Java.
3. PyTorch: PyTorch – еще одна популярная библиотека машинного обучения с открытым исходным кодом, разработанная Facebook. Она предоставляет ряд инструментов для построения и обучения нейронных сетей и особенно хорошо подходит для исследований и экспериментов благодаря динамическому графу вычислений.
4. Caffe: Caffe – это среда глубокого обучения, разработанная Berkeley Vision and Learning Center, которая хорошо подходит для задач классификации и сегментации изображений. Она обеспечивает поддержку C++, Python и MATLAB.
5. MATLAB: MATLAB – это популярный инструмент для научных вычислений, который предоставляет ряд инструментов для построения и обучения нейронных сетей. Он особенно хорошо подходит для прототипирования и экспериментов.

В конечном итоге, выбор языка программирования для создания нейронных сетей будет зависеть от конкретных потребностей проекта, а также предпочтений и навыков разработчика. Факторы, которые следует учитывать, включают простоту использования, производительность, гибкость и поддержку сообщества [5].

Обсуждение результатов. В рамках данного исследования был выбран Python совместно с библиотекой Keras по ряду причин:

1. Python является наиболее популярным языком программирования для научных вычислений и машинного обучения, обладая богатым набором библиотек и инструментов, включая Keras, TensorFlow, PyTorch, NumPy и другие;
2. Keras является модульной и гибкой библиотекой, позволяющей ясное и компактное описание моделей, что существенно облегчает процесс их отладки и анализа.

3. И Python, и Keras обладают крупными и активными сообществами, что обеспечивает хорошую поддержку и обилие доступных руководств и примеров кода, что значительно облегчает изучение и применение этих инструментов [6].

Рассмотрим в качестве примера часть кода для распознавания некоторых дорожных знаков на Python с использованием библиотеки Keras на рис. 1.

```
aug = ImageDataGenerator(
    rotation_range=10,
    zoom_range=0.15,
    width_shift_range=0.1,
    height_shift_range=0.1,
    shear_range=0.15,
    horizontal_flip=False,
    vertical_flip=False,
    fill_mode="nearest")

history = model.fit(aug.flow(X_train, y_train, batch_size=32), epochs=epochs, validation_data=(X_val, y_val))
```

Рис. 1. Код по увеличению изображения на обучающих данных

Fig. 1. Code for enlarging an image on training data

Предоставленный код обучает модель классификации дорожных знаков с использованием методов увеличения изображения. Создается объект ImageDataGenerator с именем aug, который будет выполнять различные операции по увеличению изображения на обучающих данных.

Указанные методы увеличения включают вращение, масштабирование, сдвиг и сдвиг, в то время как горизонтальное и вертикальное отражение отключено. Эти методы увеличения помогают преумножить разнообразие обучающих данных за счет создания дополнительных вариантов исходных изображений.

Затем модель обучается с использованием дополненных данных с помощью model.fit(), сгенерированных aug.flow(X_train, y_train, batch_size=32).

Метод потока генерирует увеличенные пакеты изображений и меток на лету, что позволяет проводить обучение с эффективным использованием памяти. Он принимает обучающие данные X_train и y_train, а также размер пакета 32.

Обучение проводилось в течение 30 эпох (epoch). Показатели хода обучения и проверки, включая потери и точность, записываются в объект истории (рис. 2).

Данные проверки (X_val, y_val) предоставляются для оценки производительности модели во время обучения (val_loss, val_acc).

```
Epoch 1/30
858/858 [-----] - 105s 123ms/step - loss: 1.1208 - acc: 0.7001 - val_loss: 0.1252 - val_acc: 0.9604
Epoch 2/30
858/858 [-----] - 100s 116ms/step - loss: 0.1849 - acc: 0.9443 - val_loss: 0.0338 - val_acc: 0.9903
Epoch 3/30
858/858 [-----] - 100s 116ms/step - loss: 0.1019 - acc: 0.9691 - val_loss: 0.0228 - val_acc: 0.9944
Epoch 4/30
858/858 [-----] - 100s 116ms/step - loss: 0.0790 - acc: 0.9765 - val_loss: 0.0121 - val_acc: 0.9967
Epoch 5/30
858/858 [-----] - 100s 117ms/step - loss: 0.0621 - acc: 0.9803 - val_loss: 0.0312 - val_acc: 0.9908
Epoch 6/30
858/858 [-----] - 106s 124ms/step - loss: 0.0553 - acc: 0.9828 - val_loss: 0.0142 - val_acc: 0.9961
Epoch 7/30
858/858 [-----] - 107s 125ms/step - loss: 0.0514 - acc: 0.9843 - val_loss: 0.0137 - val_acc: 0.9958
Epoch 8/30
858/858 [-----] - 108s 126ms/step - loss: 0.0410 - acc: 0.9872 - val_loss: 0.0144 - val_acc: 0.9952
Epoch 9/30
858/858 [-----] - 109s 127ms/step - loss: 0.0364 - acc: 0.9886 - val_loss: 0.0076 - val_acc: 0.9981
Epoch 10/30
858/858 [-----] - 109s 127ms/step - loss: 0.0344 - acc: 0.9892 - val_loss: 0.0068 - val_acc: 0.9979
Epoch 11/30
858/858 [-----] - 108s 126ms/step - loss: 0.0326 - acc: 0.9901 - val_loss: 0.0077 - val_acc: 0.9974
Epoch 12/30
858/858 [-----] - 107s 125ms/step - loss: 0.0305 - acc: 0.9906 - val_loss: 0.0070 - val_acc: 0.9974
Epoch 13/30
858/858 [-----] - 107s 125ms/step - loss: 0.0257 - acc: 0.9917 - val_loss: 0.0059 - val_acc: 0.9984
Epoch 14/30
858/858 [-----] - 107s 124ms/step - loss: 0.0233 - acc: 0.9934 - val_loss: 0.0069 - val_acc: 0.9979
Epoch 15/30
```

Рис. 2. Показатели хода обучения

Fig. 2. Training progress indicators

Во время обучения прогресс модели отображается для каждой эпохи, включая показатели потерь и точности как для обучающего, так и для проверочного наборов. Отображаемая информация показывает текущую эпоху, количество обработанных шагов или пакетов (858/858), время, затрачиваемое на шаг, а также значения потерь и точности. После каждой эпохи производительность модели оценивается на проверочном наборе.

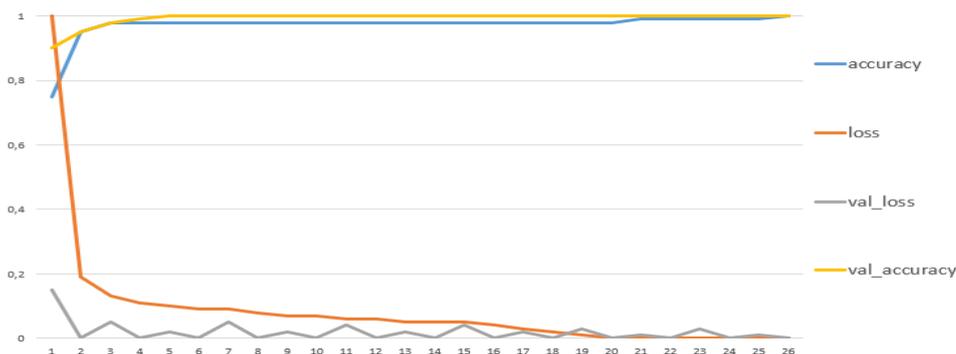
История обучения визуализируется (рис.3) с помощью pd.DataFrame(history.history).plot(), создавая линейный график показателей обучения и проверки (рис.4).

```
pd.DataFrame(history.history).plot(figsize=(8, 5))
plt.grid(True)
plt.gca().set_ylim(0, 1)
plt.show()
```

Рис.3. Код визуализации истории обучения**Fig. 3. Learning history visualization code**

Здесь значения потерь и точности при обучении и проверке отображаются в зависимости от эпох, что дает обзор производительности модели и потенциального переобучения или недообучения. Результирующий график отображается с помощью `plt.show()`.

Команды `plt.grid(True)` и `plt.gca().set_ylim(0,1)` соответственно включают сетку на графике и устанавливают пределы оси Y в диапазоне от 0 до 1.

**Рис.4. Визуализация истории обучения модели****Fig. 4. Visualization of model training history**

В целом, этот код демонстрирует процесс увеличения данных, обучения модели, сохранения модели и визуализации истории обучения для задачи классификации дорожных знаков. Важно подчеркнуть, что представленный код требует точного следования всем этапам обработки данных, которые были использованы при обучении модели. Данный подход гарантирует правильность и точность входных данных и обеспечивает верные результаты прогнозирования [7]. Рассмотренный пример демонстрирует, как можно использовать современные инструменты и библиотеки для создания и применения моделей глубокого обучения. Это подтверждает эффективность использования нейронных сетей в задачах классификации изображений, которые могут быть весьма востребованы в различных областях, включая автомобильную индустрию и системы безопасности дорожного движения.

Развитие нейронных сетей проложило путь для широкого спектра приложений в таких областях, как здравоохранение, финансы, транспорт и другие. Они стали незаменимым инструментом для решения сложных проблем и расширения нашего понимания окружающего мира [8].

Данное исследование имеет практическую значимость, поскольку распознавание дорожных знаков является важным компонентом различных приложений, включая системы безопасности дорожного движения и автономные транспортные средства. Предложенная модель может быть использована для автоматического распознавания и классификации дорожных знаков на основе входных изображений, что повышает эффективность и безопасность таких систем.

Вывод. Исследование нейронных сетей и их применение в распознавании дорожных знаков позволяет лучше понять и использовать возможности глубокого обучения в различных областях. Результаты исследования показывают, что использование нейронных сетей для распознавания дорожных знаков обладает высокой точностью и применимо для реальных сценариев, таких как автономные транспортные средства и системы помощи водителю. Однако, для достижения оптимальной производительности, необходимо обеспечить разнообразный и качественный набор данных для обучения моделей.

Дальнейшее развитие исследований в области нейронных сетей может привести к улучшению алгоритмов обучения, увеличению интерпретируемости моделей и расширению их применения в других сферах. Продвижение в этом направлении может принести значительный вклад в развитие искусственного интеллекта и повышение безопасности и эффективности транспортных систем.

Библиографический список:

1. Чухраев И.В., Ильичев В.Ю. Распознавание характерных объектов на изображении с использованием технологий компьютерного зрения // E-Scio. 2021. №8 (59). С. 1-10
2. Карпов К.Д., Холмогоров В.В. Система оценки качества изображения на основе компьютерного зрения // International Journal of Open Information Technologies. 2022. №12. С.62-66
3. Примкулов О.Д.У., Тожиев М.Р., Хасанов Д.Р.У. Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда // Academic research in educational sciences. 2021. №9. С. 582-585
4. Менциев А.У., АйгуMOV Т.Г., Эмирова Г.А. Анализ характеристик и функциональных возможностей устройств IoT//Инженерный вестник Дона. 2023. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8191
5. Федутинов К.А. Машинное обучение в задачах поддержки принятия решений при управлении охраной природы//Инженерный вестник Дона. 2022. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7186
6. Ветохин В.В., Ракитин Я.Е., Нестеренко И.А. Выбор средств реализации при разработке автоматизированной информационной системы с применением технологий машинного зрения // Столыпинский вестник. 2022. №4. С. 1958-1967
7. Шемарулин И.А., Карпычев В.Ю. Распознавание дорожных знаков на основе цветных контуров // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2016. №2 (113). С. 1-7
8. Захаров В.С. Технологии компьютерного зрения на российском и мировом рынках и их перспективы // Вестник ТИУиЭ. 2022. №1 (35). С. 114-115

References

1. Chukhraev I.V., Ilyichev V.Yu. Recognition of characteristic objects in the image using computer vision technologies. *E-Scio*. 2021;8 (59):1-10
2. Karpov K.D., Kholmogorov V.V. Image quality assessment system based on computer vision. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022; 12:62-66
3. Primkulov O.D.U., Tozhiev M.R., Khasanov D.R.U. Computer vision as a means of extracting information from video. *Academic research in educational sciences*. 2021; 9: 582-585
4. Mentsiev A.U., Aigumov T.G., Emirova G.A. Analysis of the characteristics and functionality of IoT devices. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023; 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8191 (In Russ)
5. Fedutinov K.A. Machine Learning in Decision Support Problems in Nature Conservation Management. *Inzhenerny Vestnik Dona*. 2022; 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7186(In Russ)
6. Vetokhin V.V., Rakitin Ya.E., Nesterenko I.A. The choice of means of implementation in the development of an automated information system using machine vision technologies. *Stolypinskiy Vestnik*. 2022;4: 1958-1967(In Russ)
7. Shemarulin I.A., Karpichev V.Yu. Recognition of road signs based on colored contours. *Proceedings of the NNSTU im. R. E. Alekseeva*. 2016; 2 (113): 1-7(In Russ)
8. Zakharov V.S. Computer vision technologies in the Russian and world markets and their prospects. *Bulletin of TIUE*. 2022;1 (35):114-115(In Russ)

Сведения об авторах:

Менциев Адам Умалтович, старший преподаватель, кафедра программирования и инфокоммуникационных технологий; a.mentsiev@chesu.ru

АйгуMOV Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, доцент; заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем 915533@mail.ru

Абдулмукуминова Элиза Мурадовна, студентка; eguri@inbox.ru

Information about the authors:

Adam U. Mentsiev, Senior Lecturer, Department of Programming and Infocommunication Technologies; a.mentsiev@chesu.ru

Timur G. Aigumov, Cand. Sci. (Econom), Assoc. Prof.; Head of Department, Department of Computer Software and Automated Systems 915533@mail.ru

Eliza M. Abdulkuminova, Student; eguri@inbox.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 23.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 18.07.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 18.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 517.9:621.3



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-124-131

Оригинальная статья /Original article

**Коррекция оптимального регулятора на основе решения обратной задачи
оптимальной стабилизации с векторным управлением**

В.В. Никулин, П.А. Мишин, П.А. Мишина

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,
430005, г. Саранск, ул. Большевикская, строение 68, Россия

Резюме. Цель. Задача о проектировании регуляторов, которые реализуют заданное программное движение объекта управления и задача определения движения динамической системы – две основные задачи в классической теории управления. В статье рассматривается решение прямой и обратной задач оптимальной стабилизации. Вектор состояния принимается доступным для измерения полностью. **Метод.** Опираясь на соотношение оптимальности, связывающее весовые коэффициенты квадратичного функционала качества и оптимальную матрицу усиления, на которую замыкается объект управления, предлагается использовать численный метод определения матриц функционала. Для исследования использовались математические модели автономных полностью управляемых объектов, формирование которых осуществлялось случайным образом, в частности, по нормальному закону распределения. **Результат.** Первоначальный этап решения связан с модальным синтезом, результатом которого является пропорциональный регулятор, обеспечивающий стабилизацию объекта управления по расположению полюсов синтезированной системы. Затем, определены весовые коэффициенты функционала путем численного решения соотношения оптимальности. Заключительным этапом является решение прямой задачи оптимальной стабилизации, в основе которого лежит вариационная задача Лагранжа. В результате вычисляется оптимальный регулятор, который при включении в замкнутую систему вместо модального позволяет уменьшить длительность переходного процесса. **Вывод.** Авторский подход позволяет минимизировать в определенной степени переходные процессы скорректированной системы управления.

Ключевые слова: автономный объект управления, оптимальная стабилизация, квадратичный функционал, модальное управление, оптимальный регулятор, соотношение оптимальности.

Для цитирования: В.В. Никулин, П.А. Мишин, П.А. Мишина. Коррекция оптимального регулятора на основе решения обратной задачи оптимальной стабилизации с векторным управлением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):124-131. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-124-131

**Correction of the optimal regulator based on solving the inverse problem
of optimal stabilization with vector control**

V.V. Nikulin, P.A. Mishin, P.A. Mishina

National Research Mordovia State University,
68 building Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia

Abstract. Objective. The problem of designing controllers that implement a given programmed movement of a controlled object and the problem of determining the movement of a dynamic system are two main problems in classical control theory. This article discusses the solution of direct and inverse optimal stabilization problems. The state vector is assumed to be completely available for measurement. **Method.** Based on the optimality ratio linking the weight coefficients of the quadratic quality functional and the optimal gain matrix, which closes the control object, it is

proposed to use a numerical method for determining the functional matrices. Mathematical models of autonomous fully controlled objects were used for the study, the formation of which was carried out randomly, in particular, according to the normal distribution law. **Result.** The initial stage of the solution is associated with modal synthesis, the result of which is a proportional regulator that provides stabilization of the control object by the location of the poles of the synthesized system. The next step is to determine the weighting coefficients of the functional by numerically solving the optimality ratio. The final stage is the solution of the direct optimal stabilization problem, which is based on the Lagrange variational problem. As a result, the optimal regulator is calculated, which, when switched on in a closed system instead of a modal one, reduces the duration of the transient process. **Conclusion.** The proposed approach of the authors allows minimizing to a certain extent the transients of the adjusted control system.

Keywords: autonomous control object, optimal stabilization, quadratic functional, modal control, optimal controller, optimality ratio.

For citation: V.V.Nikulin, P.A. Mishin, P.A. Mishina. Correction of the optimal regulator based on solving the inverse problem of optimal stabilization with vector control. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):124-131. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-124-131

Введение. Решение задач оптимального управления постоянно совершенствуется, и осуществляется поиск новых решений, позволяющих упростить соответствующую задачу в плане вычислений и проектных реализаций.

Постановка задачи. В соответствии с этим авторами затрагиваются вопросы разработки инженерной методики коррекции переходных процессов в синтезированных системах автоматического управления. Как известно, оптимальное стабилизирующее управление определяется коэффициентами квадратичного функционала качества (quadratic quality functional), вычисление которых связано непосредственно с решением нелинейного матричного уравнения Риккати (nonlinear matrix Riccati equation) [1]. Этот подход применялся в работах при решении прямой задачи оптимальной стабилизации с векторным [2, 3] и со скалярным управлением [4].

Методы исследования. Для решения поставленной задачи авторы предлагают опираться на соотношение оптимальности [5, 6]. Приведенное название «соотношение оптимальности» относится к задаче о линейно-квадратичном регуляторе (задаче оптимальной стабилизации) с квадратичным функционалом качества и линейной стационарной системе дифференциальных уравнений. Значимость данного соотношения заключается в том, что оно связывает между собой матрицы объекта управления (ОУ), матрицу оптимального регулятора и весовые коэффициенты функционала качества.

Математическая постановка линейно-квадратичной задачи управления (linear-quadratic control problem) предполагает, что весовые коэффициенты функционала уже известны. Решение обратной задачи оптимальной стабилизации базируется на знании модального регулятора (управления) и заключается в вычислении данных коэффициентов, путем решения соотношения оптимальности с помощью численных методов [7–9] при условии, что вектор состояния ОУ полностью доступен для измерения.

Решение данной проблемы позволяет уменьшить время переходных процессов (transition process). Математическая модель автономного ОУ описывается следующими уравнениями состояния и выхода

$$dX(t)/dt = AX(t) + BU(t), \quad (1)$$

$$Y(t) = CX(t). \quad (2)$$

где $X(t)$ – n -мерный вектор состояния объекта управления, $r > 1$ – векторное управляющее входное воздействие размера $r > 1$ ($r > 1$), $n \times r$ – постоянная числовая матрица (матрица состояния) размера $n \times r$, $n \times r$ – постоянная числовая матрица (матрица входа)

размера $n \times r$, Y – m -мерный вектор выхода, $m \times n$ – постоянная числовая матрица (матрица выхода) размера $m \times n$.

Для системы (1–2) необходимо, чтобы выполнялось условие полной управляемости по Калману [10] с целью дальнейшего применения методов стабилизации

$$\text{rank}[B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n,$$

где $B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B$ – матрица управляемости (controllability matrix).

В задаче стабилизации критерий качества задан в виде квадратичного функционала

$$J = \int_0^{\infty} [X^T Q X + U^T R U] dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Q – весовая неотрицательно определенная матрица размера $n \times n$, R – весовая положительно определенная матрица размера $r \times r$, T – символ транспонирования.

Задача (1; 3) базируется на решении матричного нелинейного алгебраического уравнения Риккати [1], решение которого позволяет определить оптимальную матрицу усиления (матрицу оптимального регулятора) K_p , на которую замыкается ОУ (1). Известно, что данная задача может быть сведена к решению линейных матричных неравенств, что упрощает процедуру поиска решений [11]. Однако первый подход, по мнению авторов, является инженерным более понятным и решение более упрощено с получением необходимого результата.

Замкнутая система (синтезированная система) с приложенным к ней входным воздействием (управлением) будет иметь следующий вид

$$dX(t)/dt = (A - BK_p)X(t) + BU(t), \quad (4)$$

где $(A - BK_m)$ – гурвицева матрица.

При включении в систему модального регулятора вместо оптимальной синтезированной системы будет иметь аналогичную структуру, как и (4), лишь с заменой K_p на K_m

В то же время собственные числа матрицы $(A - BK_m)$ (матрицы состояния) системы типа (4) должны быть равны заданным предварительно (выбранным проектировщиком) до начала синтеза. В таком случае необходимо для замкнутой системы решать задачу по расположению полюсов [12, 13].

Приведем выражение соотношения оптимальности, которое применяется в задачах стабилизации с векторным управлением:

$$R = B^T S^T Q S B + (E + B^T S^T K^T) R (E + K S B), \quad (5)$$

где $K = K_p$, $S = (A - BK_p)^{-1}$, E – единичная квадратная матрица, размерность которой соответствует размерности входного управления A .

Вычисление матрицы A целесообразно производить с помощью псевдообращения, например, использовать матрицу Мура-Пенроуза [14, 15]. В случае, когда матрицы плохо обусловленные, использование в расчетах псевдообратной матрицы позволяет защититься от непредвиденных результатов.

Обсуждение результатов. Для проведения эксперимента авторами была выбрана система MATLAB, в которой функции *place*, *fsolve*, *reshape*, *poly*, *eig* и *pinv* включены с начала 2000-х годов. С выходом версии MATLAB R2021b функции *pinv* и *eig* были улучшены. Первоначальный этап решения связан с определением модального управления. Для систем с несколькими входами и выходами (MIMO – Multiple Input Multiple Output) синтез модального регулятора осуществляет функция *place*, входными параметрами которой являются матрицы A и Q , а также вектор полюсов, который выбирает проектировщик.

Возвращаемым значением данной функции является матрица коэффициентов модального регулятора. Далее, необходимо сформировать начальные условия поиска в виде одномерного массива вещественных чисел для численного решения уравнения (5).

В общем случае с векторным управлением имеем $n^2 + r^2$ неизвестных: первые Q неизвестных относятся к весовой матрице Q , а последние R неизвестных – к весовой матрице R . В случае диагональных матриц Q и R – 10^{-3} неизвестных. Минимальную границу поиска для указанных матриц установим в значение 10^{-3} . Исходя из возможностей системы MATLAB, в качестве решателя нелинейных алгебраических уравнений была выбрана функция *fsolve* (solve system of nonlinear equations) с установленными дополнительными опциями.

Программная реализация вышеописанных действия приведена в листинге 1.

```
% Листинг 1
Q = rand(n);
R = rand(r);
QR = [Q(:); R(:)];
Km = place(A, B, p);
minQ = 0.001*ones(size(Q(:)));
minR = 0.001*ones(size(R(:)));
MinQR = [minQ(:); minR(:)];
option = optimoptions('fsolve','Display','none','Algorithm',
'levenberg-marquardt','FunctionTolerance',1.0e-09);
[XoptimalQR, Fzero] = fsolve(@FunQR,MinQR,options,B,S,Er,Km,n,r);
```

Функция *rand* формирует случайные матрицы по нормальному закону распределения размерами 10^{-7} и 10^{-7} , соответственно. В опциях для функции *fsolve* установлен алгоритм решения Левенберга-Марквардта, и точность вычислений по исследуемой функции равна 10^{-9} . Возвращаемое значение функции – одномерный массив *XoptimalQR* (вычисленные коэффициенты весовых матриц Q и R), скаляр *Fzero* (значение функции *FunQR*).

```
Функция FunQR, установленная первым параметром в fsolve, приведена в листинге 2.% Листинг 2
function f = FunQR(QR, B, S, Er, Km, n, r)
Qn = QR(1:n*n);
Q = reshape(Qn, n, n);
Q = (Q * Q')/100;
Rr = QR(n*n + 1:end);
R = reshape(Rr, r, r);
R = (R * R')/100;
rightSide = ((B')*(S')*Q*S*B + (Er+B'*S'*Km')*R*(Er+Km*S*B));
fr = R - rightSide;
f = max(abs(fr(:)));
end
```

Первым аргументом функции *FunQR* является одномерный массив начальных приближений, остальные параметры принадлежат правой части соотношения оптимальности. Матрица S рассчитывается следующим образом: $S = (A - BK_m)^{-1}$, однако рекомендуется вычислять ее с помощью псевдообращения. Для этой цели MATLAB предоставляет функцию псевдообращения *pinv* (pseudoinverse). Первоначально массив R разбивается на матрицы R и R размерами ζ и ζ , соответственно, с помощью библиотечной функции *reshape*, после чего делаются симметрическими. Затем, рассчитывается правая часть соотношения оптимальности, вычисляется разница относительно левой части, и результат записывается в матрицу *fr*: Возвращаемое значение функции – максимальная разность левой и правой частей соотношения оптимальности.

Следующим этапом программной реализации является обработка результатов функции *fsolve* и переход к матрицам Фробениуса. Результат численного решения соотношения оптимальности в виде одномерного массива *XoptimalQR* записывается в соответствующие матрицы Q и Q с помощью функции *reshape*. Системная функция *eig* (eigenvalues) позволяет получить собственные числа матрицы, а *poly* (polynomial) – сформировать вектор коэффициентов характеристического полинома. По определению, весовые коэффициенты квадратичного функционала качества являются симметричными положительно определенными. Для достижения симметричности приведенные к матрицам Фробениуса весовые коэффициенты Q и Q^T умножим на их транспонированные

образы R^T и R^T , соответственно (операция транспонирования в MATLAB обозначается как «'» или «.'»). Для того чтобы уверенно получить неотрицательные коэффициенты данных матриц, авторы рекомендуют добавить небольшое положительное значение ко всем элементам. Например, величину $\text{sqrt}(\text{eps})$, примерно равную $1.4901e-08$.

На данном этапе завершается решение обратной задачи оптимальной стабилизации. Теперь необходимо произвести коррекцию переходных процессов путем решения прямой задачи оптимальной стабилизации, которая также находит широкое применение в различных работах [16–19], на основе полученных весовых коэффициентов. При решении данной проблемы авторы, опираясь на результаты работы [20], отдают предпочтение подходу, основанному на вариационной задаче Лагранжа. Проведем эксперимент, приняв следующие матрицы объекта (1–2) и начальные условия поиска уравнения (5):

Матрица состояния (матрица A) 7-го порядка:

0.1143	1.1695	0.1370	0.1961	-0.4125	0.1690	-0.9763
0.1431	-0.3801	-0.2744	1.4701	-0.1427	-1.3123	0.4121
0.4055	-0.0956	-1.2651	-0.7575	-0.4488	-0.6744	1.1313
0.0863	0.5198	-0.1194	-0.6494	-1.4745	-0.0714	0.2440
-0.7640	0.6937	0.7209	-1.1753	0.3293	-0.7510	0.2992
-1.6547	-0.7745	1.0948	-0.3404	0.8274	-0.9691	1.5421
1.2796	-0.6089	-1.2139	0.0479	-0.5039	-1.1611	1.7961

Матрица входа (матрица B) размерностью 7×4 :

0.8851	0.2756	0.2202	0.2087
0.9535	0.8198	0.3043	0.4124
0.3451	0.0848	0.6404	0.1164
0.4570	0.9969	0.3319	0.0099
0.9350	0.6484	0.3271	0.6886
0.2431	0.3768	0.0292	0.8946
0.1684	0.5285	0.8357	0.9129

Матрица выхода (матрица C): 1 1 1 1 1 1 1

Матрица связи $D = 0$.

Допущение для начальных условий матрицы Q (7×7):

0.0254	0.5898	0.0698	0.6123	0.4995	0.6787	0.4412
0.5865	0.5134	0.9304	0.8344	0.6693	0.6350	0.9772
0.9352	0.1253	0.4969	0.2423	0.9711	0.0057	0.2566
0.5290	0.9051	0.0691	0.0076	0.5679	0.0953	0.3142
0.1907	0.7804	0.3191	0.4413	0.0182	0.9862	0.5644
0.9886	0.2671	0.9480	0.0701	0.5247	0.8972	0.5458
0.3528	0.9613	0.8286	0.7500	0.6999	0.6866	0.3871

Допущение для начальных условий весовой матрицы R (4×7):

0.7184	0.4566	0.6679	0.4503
0.6501	0.7360	0.8778	0.6908
0.8912	0.0486	0.5498	0.7116
0.4328	0.4760	0.5170	0.1509

Коэффициенты матрицы модального управления K_m (4×7):

0.4137	1.8202	0.6789	-1.5894	1.7552	-0.5661	-2.1370
-0.4065	-0.4871	-0.1384	3.0131	-3.3887	1.4571	0.8644
2.0799	-0.6385	-2.3872	-1.5309	0.0249	-2.2994	1.4771
-1.0201	-0.5112	0.7979	-0.3175	1.7495	0.0056	1.7693

Далее приведены искомые величины, полученные в результате моделирования.

Матрица Q (результат функции *fsolve*):

0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003

Матрица R (результат функции *fsolve*):

0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
0.0011	0.0011	0.0011	0.0011

Коэффициенты матрицы оптимального регулятора K_p :

1.1242	-1.6758	-0.6913	1.9640	-4.1209	2.2014	1.5183
-1.4109	-0.2359	0.6167	-2.1230	2.5343	-1.0746	-0.4844
-0.3155	-0.0487	-0.0838	-0.4095	0.5632	-0.0119	-0.2536
2979.7545	973.0285	-1386.0966	3482.9799	-5352.8649	-1.1767349	319.2348

Длительность переходного процесса для системы с модальным регулятором: 33 с.

Длительность переходного процесса для системы с оптимальным регулятором: 6 с.

Ниже приведены диаграммы переходных процессов по всем переменным состояния ОУ (1) для системы с модальным (рис. 1) и оптимальным (рис. 2) регуляторами.

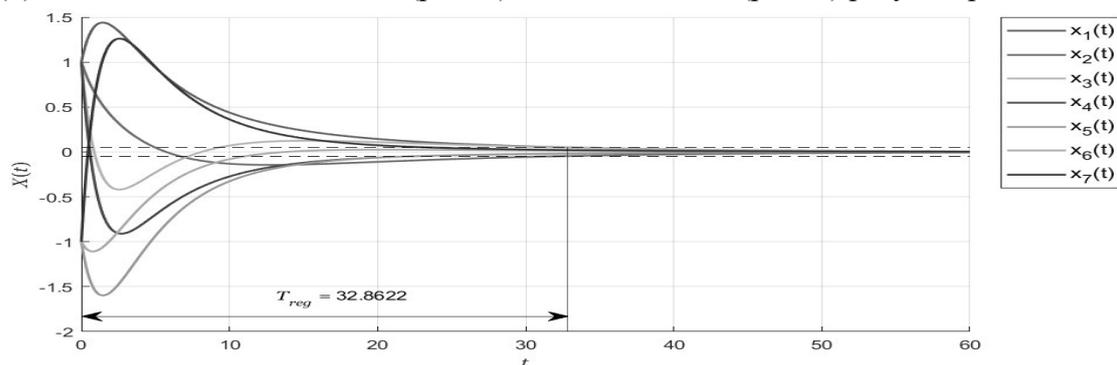


Рис 1. Переходные функции системы 7-го порядка с модальным регулятором
Fig. 1. Transitional functions of a 7th order system with a modal regulator

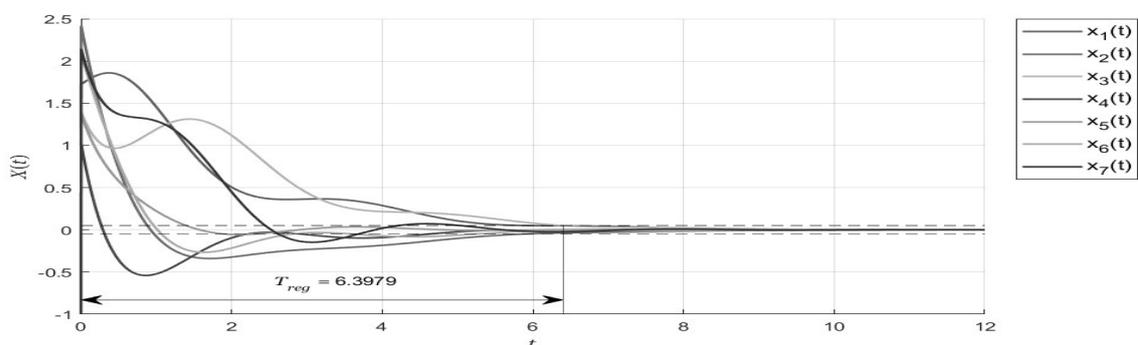


Рис 2. Переходные функции системы 7-го порядка с оптимальным регулятором
Fig. 2. Transitional functions of a 7th order system with an optimal regulator

Построение приведенных выше диаграмм рекомендуется осуществлять с помощью команды *initial* (initial condition), которая позволяет моделировать движение системы из заданных начальных условий $X(0) = X_0$. В данном примере вектор X_0 равен: 1 1 1 1 -1 -1 -1. Для наглядности диапазон допустимого отклонения переходных функций от установившегося

значения выбран относительно начальных условий путем уменьшения максимального значения на 95%. Таким образом, длительность переходного процесса будет определена, если в некоторый момент времени значение каждой из переходных функций будет меньше по абсолютной величине 0,05 и в последующем не нарушит данное условие.

Вывод. Анализируя результаты эксперимента, можно сделать вывод о том, что регулятор, полученный путем расчета линейно-квадратичной задачи на основе решения обратной задачи оптимальной стабилизации, позволяет существенно уменьшить время регулирования T_{reg} (длительность переходного процесса). Обратная задача оптимальной стабилизации находит свое отражение в публикациях многих авторов при различных постановках и подходах к решению, что подчеркивает актуальность данной проблемы.

Авторами проведены эксперименты численного решения соотношения оптимальности для систем до 15-го порядка включительно. Матрицы систем управления формировались случайным образом по нормальному закону распределения и отвечали критерию полной управляемости по Калману. На практике зачастую размерности исследуемых ОУ не превышают 10-го порядка. Элемент новизны, предложенной авторами инженерной методики, заключается в совокупности модального и оптимального управления на основе соотношения оптимальности, что позволяет существенно уменьшить время переходного процесса в скорректированной системе управления.

Библиографический список:

1. Petersen I. R., Hollot C. V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems / I. R. Petersen, C. V. Hollot //Automatica. – 1986. – Vol. 22, №. 4. – P. 397-411.
2. Мишин П. А., Немчинова П. А. Аналитический контроль решения задачи оптимальной стабилизации стационарного объекта с векторным управлением //E-Scio. – 2022. – № 4 (67). – С. 231-238.
3. Мишин П. А., Немчинова П. А. Аналитический контроль решения задачи оптимальной стабилизации стационарного объекта с векторным управлением/ П. А. Мишин, П. А. Немчинова //Математика и математическое моделирование. –2022. – С. 377-378.
4. Афонин В. В. Аналитический контроль решения задачи оптимальной стабилизации стационарного объекта со скалярным управлением//Вестник Мордовского университета. 1998. № 3-4. – С. 122-123.
5. Мишин П. А., П. А. Немчинова. Анализ точности вычисления оптимального регулятора на основе соотношения оптимальности в системе matlab и языке Python //E-Scio. 2022. № 11 (74). – С. 511-518.
6. Афонин В. В., Мурюмин С. М. Соотношения оптимальности в линейно-квадратичной задаче управления. //Журнал Средневолжского математического общества. – 2014. –Т. 16, № 2. – С. 118-120.
7. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2003. – 632 с.
8. Балашевич Н. В., Габасов Р., Кириллова Ф. М. Численные методы программной и позиционной оптимизации линейных систем управления//Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2000. – Т. 40, №. 6. – С. 838-859.
9. Киреев В. И., Пантелеев А. В. Численные методы в примерах и задачах. Высшая школа, 2008. 480 с.
10. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению//Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 7-46.
11. S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Ferron, V. Balakrishnan. Linear matrix inequalities in system and control theory. / Boyd S., El Ghaoui L., Ferron E., Balakrishnan V. – SIAM, 1994. – 193 p.
12. Polyak B. T., Shcherbakov P. S. Optimization and asymptotic stability//International Journal of Control. – 2016. – С. 1-7.
13. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. / Е. И. Юревич. – М.: Энергия, 1969. – 375 с.
14. Зубов Н. Е., Рябченко В. Н. О вычислении псевдообратной матрицы. Общий случай / Н. Е. Зубов, В. Н. Рябченко //Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2018. – №1 (76). – С. 16-25.
15. Германенко М. И., Панюков А. В. Параллельные алгоритмы безошибочного вычисления матрицы Мура-Пенроуза. //Параллельные вычислительные технологии. – 2008. – С. 215-215.
16. Veremey E. Spectral approach to H-optimization of plasma control//International Journal of Modern Physics A. – 2009. – Т. 24, №. 5. – С. 1009-1018.
17. Аполонский В. В., Тарарыкин С. В. Методы синтеза редуцированных регуляторов состояния линейных динамических систем//Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – №. 6. – С. 25-33.
18. Антоник В. Г., Срочко В. А. Метод проекций в линейно-квадратичных задачах оптимального управления //Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38, №. 4. – С. 564-572.
19. Романова И. К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний / И. К. Романова // Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – №. 4. – С. 105-129.

20. Афонин В. В., Мишин П. А., Мишина П. А. Вариационный подход к синтезу оптимального регулятора в задаче стабилизации // E-Scio. – 2023. – № 1 (76). – С. 299-315.

References

1. Petersen I. R., Hollot C. V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems / I. R. Petersen, C. V. Hollot. *Automatica*. 1986; 22(4): 397-411.
2. Mishin P. A., Nemchinova P. A. Analytical control of solving the problem of optimal stabilization of a stationary object with vector control. *E-Scio*. 2022;4 (67): 231-238. (In Russ)
3. Mishin P. A., Nemchinova P. A. Analytical control of solving the problem of optimal stabilization of a stationary object with vector control. *Mathematics and mathematical modeling*. 2022; 377-378. (In Russ)
4. Afonin V. V. Analytical control of solving the problem of optimal stabilization of a stationary object with scalar control. *Bulletin of the Mordovian University*. 1998;3-4:122-123. (In Russ)
5. Mishin P. A., P. A. Nemchinova. Analysis of the accuracy of calculating the optimal regulator based on the optimality ratio in matlab and Python,. *E-Scio*. 2022;11 (74):511-518. (In Russ)
6. Afonin V. V., Muryumin S. M. Optimality relations in a linear-quadratic control problem. *Journal of the Middle Volga Mathematical Society*. 2014;16(2):118-120. (In Russ)
7. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobelkov G. M. Numerical methods. M.: Binom. Laboratory of Knowledge, 2003; 632. (In Russ)
8. Balashevich N. V., Gabasov R., Kirillova F. M. Numerical methods of software and positional optimization of linear control systems. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2000; 40(6): 838-859. (In Russ)
9. Kireev V.I., Pantelev A.V. Numerical methods in examples and problems. *Higher School*,2008;480.(In Russ)
10. Polyak B. T., Shcherbakov P. S. Difficult problems of linear control theory. Some approaches to the solution. *Automation and telemechanics*. 2005; 5:7-46. (In Russ)
11. S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Ferron, V. Balakrishnan. Linear matrix inequalities in system and control theory. SIAM, 1994;193.
12. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Optimization and asymptotic stability. *International Journal of Control*. 2016; 1–7.
13. Yurevich E. I. Theory of automatic control. M.: *Energiya*, 1969; 375. (In Russ)
14. Zubov N.E., Ryabchenko V.N. On the calculation of a pseudo-inverse matrix. General case. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The series «Natural Sciences»*. 2018;1 (76):16-25.(In Russ)
15. Germanenko M. I., Panyukov A.V. Parallel algorithms for error-free calculation of the Moore-Penrose matrix. *Parallel computing technologies*. 2008; 215-215. (In Russ)
16. Veremey E. Spectral approach to H-optimization of plasma control. *International Journal of Modern Physics A*. 2009; 24(5):1009-1018.
17. Apolonsky V.V., Tararykin S.V. Methods of synthesis of reduced state regulators of linear dynamical systems. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences.Theory and control systems*.2014;6:25-33.(In Russ)
18. Antonik V. G., Urgent V. A. Projection method in linear-quadratic optimal control problems. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1998; 38 (4): 564-572. (In Russ)
19. Romanova I.K. On one approach to determining the weight coefficients of the state space method. *Science and Education: Scientific Edition of Bauman Moscow State Technical University*.2015;4:105-129(In Russ)
20. Afonin V. V., Mishin P. A., Mishina P. A. Variational approach to synthesis of optimal regulator in the stabilization problem. *E-Scio*. 2023;1 (76): 299-315.(In Russ)

Сведения об авторах:

Владимир Валерьевич Никулин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи; nikulinvv@mail.ru

Мишин Павел Александрович, студент, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; pavel.mishinfz@gmail.com

Мишина Полина Андреевна, студент, кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; polya.nemchinova@gmail.com

Information about the authors:

Vladimir V. Nikulin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems; nikulinvv@mail.ru

Pavel A. Mishin, Student, Department of Automated Information Processing and Control Systems; pavel.mishinfz@gmail.com

Polina A. Mishina, Student, Department of Automated Information Processing and Control Systems; polya.nemchinova@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 06.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 01.08.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 01.08.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.75

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-132-141



Оригинальная статья /Original article

Разработка клиентских приложений на блокчейн

О.Д. Окладникова, А. В. Буков, Н. Н. Жуков

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

Резюме. Цель. В статье рассмотрены вопросы, связанные с процессом разработки клиентских Web-приложений для IT-проектов, в основе которых заложены принципы технологии децентрализованных сетей - блокчейн. Исследуются практические способы реализации процесса авторизации пользователя и его взаимодействия с сетью блокчейн через клиентское приложение. **Метод.** В качестве инструмента исследования было выбрано браузерное расширение MetaMask, позволяющее разрабатывать, тестировать и запускать собственные программные модули. **Результат.** Проведён анализ инструментов MetaMask, рассмотрены процессы связанные с началом работы как с точки зрения разработчика, так и с точки зрения пользователя кошелька. Понимание организации данных процессов позволит сформировать у пользователей необходимые знания в области разработки клиентских приложений, построенных на блокчейн. **Вывод.** Разработанные шаблоны программных кодов могут быть использованы в качестве типовых при разработке клиентских приложений в децентрализованной сети Ethereum. Преимущество предложенных решений заключается в использовании простых программных конструкций, позволяющих сформировать базовые принципы.

Ключевые слова: блокчейн, майнер, Ethereum, Web-приложение, авторизация, криптокошелек, криптовалюта, MetaMask, информационная безопасность.

Для цитирования: О.Д. Окладникова, А.В. Буков, Н.Н. Жуков. Разработка клиентских приложений на блокчейн. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):132-141. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-132-141

Development of client applications on Blockchain

O.D. Okladnikova, A.V. Bukov, N.N. Zhukov

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

Abstract. Objective. The article discusses issues related to the process of developing client Web applications for IT projects, which are based on the principles of decentralized network technology - blockchain. The authors explore practical ways to implement the user authorization process and its interaction with the blockchain network through a client application. **Method.** The MetaMask browser extension was chosen as a research tool, which allows you to develop, test and run your own software modules. **Result.** In the course of the study, the analysis of MetaMask tools was carried out, the processes associated with the start of work were considered both from the point of view of the developer and from the point of view of the wallet user. Understanding the organization of these processes will allow users to form the necessary knowledge in the development of client applications built on blockchain. **Conclusion.** The program code templates developed by the authors can be used as standard ones in the development of client applications in the decentralized Ethereum network. The advantage of the proposed solutions lies in the use of simple software structures that allow the formation of basic principles.

Keywords: blockchain, miner, Ethereum, Web application, authorization, crypto wallet, cryptocurrency, MetaMask, information security.

For citation: O.D. Okladnikova, A.V. Bukov, N.N. Zhukov. Development of client applications on Blockchain. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):132-141. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-132-141

Введение. К одной из наиболее динамичной и постоянно развивающейся сферой в IT-индустрии относится разработка информационных систем и Web – приложений на основе баз данных распределённого типа (децентрализованного реестра данных – блокчейн технологии). Основная концепция блокчейн – это прозрачность распределения данных, реализация которой в цифровых решениях повышает доверие между участниками обмена данными. Согласно исследованию, проведенному Cambridge Centre For Alternative Finance [1], крупнейшим пользователем технологии распределенного реестра является финансовый сектор, т.к. блокчейн технология обладает прорывным инновационным потенциалом в сфере платежей, клиринга, расчетов и других операций. Использование блокчейн изменяет систему обслуживания и хранения активов, урегулирования обязательств, исполнения контрактов и управления рисками.

Например, Ripple – блокчейн-проект, запущенный в 2012 году и работающий на базе сети XRP Ledger является конкурентом централизованной системы Swift. Преимущество Ripple заключается в высокой скорости производства блока (в среднем за 3 - 4 сек.) и низкой комиссии за переводы (около 0.00001 XRP или \$0.0000053) [2]. Для сравнения в Swift международные платежи проводятся от 3 до 5 дней, а стоимость за транзакции зависит от банка отправителя, банков посредников и банка получателя [3].

Первыми сетевыми платформами были Bitcoin – платформа для хранения данных о перемещении цифровых денежных ресурсов между пользователями, и Ethereum – платформа для создания «честных» сделок (смарт контрактов) [4]. На основе блокчейн создаются децентрализованные банки, например, Cescabank, Grant Thornton, основной деятельностью которых является поддержка бизнеса, страховых компаний и государственных программ [5]. Одной из проблем цифровизации остается защита данных. Развитие онлайн услуг в государственном и финансовом секторах, телекоммуникационных компаниях, медицинских учреждениях и др., а также активное использование пользователей социальных сетей увеличивает рост утечек конфиденциальной информации.

В аналитическом отчете InfoWatch, опубликованном в апреле 2023 года, объем утечек персональных данных в России в 2022 году составил 667 млн. записей, что почти в 2,7 раза больше, чем в 2021 году. Каждая вторая утечка данных в России происходила в финансовой отрасли. В 2022 г. утечек данных из финансового сектора в России стало больше в 1,7 раза. При этом 90% составляют данные о финансовых операциях, персональные данные клиентов и сотрудников, материалы, классифицируемые как коммерческая тайна (инвестиционные планы, данные маркетинговых исследований, внутренняя закупочная информация и др.) [6]. Одна из причин утечки данных, по мнению экспертов, заключается в недостаточной проработанности архитектурного решения системы с точки зрения обеспечения защиты данных на клиентской стороне приложения.

Использование онлайн сервисов пользователем означает, в первую очередь, доверие своих данных другому лицу. Компании, в которых не заботятся в достаточной степени о безопасности данных, в результате чего происходят утечки, подвергаются как финансовым, так и репутационным потерям. В 2022 году крупные утечки информации произошли в сервисах «Яндекс.Еда» и «Яндекс. Практикум», в онлайн-кинотеатре Start, в сервисе экспресс-доставки СДЭК, сети электроники DNS, компании «Билайн». 15 ноября 2022 г. хакеры выставили на продажу в даркнете за \$4200 данные 7,2 млн. пользователей российского сервиса аренды электросамокатов Whoosh. За 1 квартал 2023 года объем утечек данных вырос в 2,3 раза по сравнению с этим же периодом прошлого года. Крупнейшими утечками первого квартала стали: выложенные в открытый доступ данные бонусной программы «СберСпасибо» (суммарно 52,5 млн записей) и сети «Спортмастер» (46 млн записей), выставленная на продажу база интернет-аптеки zdravcity.ru (8,9 млн записей) [7].

Постановка задачи. В качестве решения проблемы по обеспечению безопасности данных в Интернет разработчики IT-продуктов все больше обращаются к технологии децентрализованных систем, построенных на основе блокчейн. Информация, записанная в цепочку блокчейн, имеет более высокий уровень защиты по сравнению с централизованными системами за счёт шифрования данных непосредственно владельцем данных, а не сервисом, обеспечивающим обработку и защиту данных. Различные системы используют отличающиеся друг от друга способы и методы шифрования, которые напрямую влияют не только на степень защищённости данных, но и на скорость обработки запросов, так как слишком сложные методы шифрования требуют значительно больших временных и вычислительных ресурсов для совершения операций по кодированию и декодированию данных. В блокчейн системах с быстрым временем подтверждения транзакции в данный момент могут возникнуть ситуации, снижающие безопасность данных.

Созданием блоков занимаются майнеры - программа-пользователь блокчейн сети выполняющая вычисления, необходимые для формирования транзакций в блоки. Для того чтобы сформированный блок был принят в цепь необходимо распространить его между более чем 51% участников. Однако, в результате задержки распространения информации, связанной с интернет-соединением и децентрализованной архитектурой сети, может возникнуть ситуация, когда блок с этим же порядковым номером параллельно начнет обрабатываться другим майнером. В результате в цепочку блокчейн войдёт тот блок, который был обработан ранее пользователем с ресурсами большей вычислительной мощности. Блок, обработанный другим майнером станет «потерянным» (Uncle-Block) [8]. При систематически возникающих подобных «накладках» майнеры с меньшей мощностью вычислительных ресурсов будут многократно «проигрывать» майнерам с большой мощностью вычислительных ресурсов. Вследствие этого, майнеры с меньшей мощностью будут объединяться в крупные пулы (от англ. Pool - объединение, общность) и транзакции в блокчейн сетях с небольшим количеством участников будут обрабатываться на нескольких крупных объединениях, что приведет к централизации данных, и значительно снизит безопасность сети [9]. Так как данные хранятся не в одном месте, а распределяются между множеством устройств-клиентов, может возникнуть ситуация, когда одни устройства будут считать актуальными данные, полученные в результате обработки запроса от одного майнера, а другая часть устройств – от другого майнера. Например, пользователь «А» (покупатель) в рамках одной транзакции пополнил свой электронный кошелек и проводит оплату в магазине. А пользователь «Б» (продавец) не видит в своей версии блокчейн сети информацию о том, что у пользователя «А» есть нужное количество денег. В данной ситуации сеть не может функционировать, так как между участниками сети отсутствует договорённость о свойствах тех или иных объектов.

Методы исследования. С целью устранения угроз, возникающих при описанной выше ситуации, был разработан алгоритм GHOST («Greedy Heaviest Observed Subtree»), который представляет собой сквозной протокол шифрования с заложенными в нем правилами выбора цепочки на основе ранее потерянных блоков и добавления их в основной блокчейн с частичным вознаграждением майнера. Такой подход повышает сложность атаки на сеть, т.к. майнер – победитель, не единственный, кто владеет вычислительной мощностью. Большое количество узлов сохраняет мощность и устраняет необходимость в централизованных пулах майнинга в более крупных цепочках [10].

Наибольшей уязвимостью с точки зрения информационной безопасности остается процесс авторизации пользователя, особенно в различных WEB-приложениях, например, в социальных сетях, онлайн-магазинах так как проверка аутентификация пользователя производится централизованно сервисом в отношении данных, размещенных на сервере. Например, разработанный функционал для восстановления забытого пароля требует от пользователя ввода личных данных (номера телефона, секретного вопроса или паспортных данных). Мошенники, завладевшие ими, могут получить нелегитимный доступ к системе.

Преимущество блокчейн заключается в том, что данные шифруются с помощью специальных алгоритмов и распределяются между всеми участниками сети, а не хранятся в едином датацентре, что делает невозможным их изменение. Т.к. по факту время расшифровки данных значительно превышает время жизни человека или системы. [11].

Понимание принципов работы блокчейн сети важно как для разработчиков систем, работающих на блокчейн платформе, так и для пользователей, совершающих те или иные действия в этих системах. Выбор правильного инструмента для работы даст пользователю уверенность в надёжности той или иной системы. Для разработчиков, в свою очередь, важно охватить как можно больший спектр клиентских систем, с которыми можно выстроить интеграцию, но также важно понимать как с точки зрения безопасности устроены не или иные клиентские системы.

В централизованных системах и сетях криптография используется для защиты хранилища данных или для их шифрования при передаче по незащищённым каналам связи, а так же направлена на то, чтобы избежать вмешательства третьих лиц к доступу и получению информации, с помощью которой можно идентифицировать личность человека, его электронную почту и др. Технологической основой блокчейн является хранение данных не на общих серверах (как в централизованных сетях), а распределение этих данных по миллионам компьютеров, находящихся в разных точках планеты. Безопасность обеспечивается за счет используемых криптографических методов и алгоритмов [12].

Появление блокчейн расширяет возможности цифровой экосистемы (смарт-контракты, криптовалюта и пр.), при этом сохраняются и угрозы информационной безопасности пользователей (мошенничество, хищение персональных данных, идентификаторов, капитала и пр.). Задача, поставленная авторами статьи – исследовать реализацию процесса авторизации пользователя и его взаимодействия с сетью блокчейн через клиентское приложение с точки зрения информационной безопасности.

В централизованных системах данные хранятся в базе данных или сервисе кэширования (отдельный узел, занимающийся хранением данных), размещенных на одном физическом узле и многократно копируются. В децентрализованных системах данные не копируются, а хранятся в блоках, распространяемых между узлами. Каждый узел системы доверяет только той информации, которая по общепринятому алгоритму считается корректной. Ответственность за процесс проверки информации переносится с одного регулирующего узла на все узлы сети. Отключение одного узла не ведёт к потере данных и при первом (или повторном) подключении узел получает необходимый для работы набор блоков. Такой подход к хранению данных повышает устойчивость системы, однако может оказать влияние на снижение скорости обработки входящих запросов (транзакций), так как для поиска нужных данных необходимо последовательно обработать большое количество блоков, в которых записаны трансформации данных, и сформировать итоговое состояние. Снижение скорости обработки транзакций особенно критично для сферы финансовых услуг, например, при проведении различных платежных операций, таких как онлайн или безналичный расчет.

Обработка денежных операций в блокчейн сетях происходит с помощью токенов. Токены представляют собой запись в регистре, распределенную в блокчейн-цепочке, т.е. по сути это цифровая версия криптовалюты, используемая для совершения онлайн покупок, передачи, а так же оплаты комиссии за проведение тех или иных операций. В каждой блокчейн сети существует своя криптовалюта, как правило название котрой совпадает с названием самой сети (Ethereum, Bitcoin, ZCash и др.). Монета одной сети не может быть использована в другой, но может быть обменена с учётом курса на специальных крипто-биржах. Взаимодействие пользователя с блокчейн сетью осуществляется на основе программного интерфейса – криптокошелек. В настоящее время одним из популярных криптокошельков в мире является МетаМаск, представляющий собой браузерное расширение (или его мобильное приложение для устройств с iOS и Android) с открытым исходным кодом. Кошелек МетаМаск предназначен для хранения и перевода криптовалюты и NFT, созданных в экосистеме Ethereum и других

совместимых с ним сетях (например, Binance Smart Chain, Polygon Network (Matic), Optimism Ethereum и др.). Кроме собственной валюты Ethereum, MetaMask также может работать с токенами, построенными на стандартах ERC20, BEP20 и BEP2. Расширение MetaMask можно подключить к децентрализованным сервисам (DeFi): обменникам, биржам и пулам ликвидности, а также без регистрации и идентификации работать с такими площадками как Uniswap и PancakeSwap [13]. Браузерное расширение MetaMask совместимо со всеми распространенными на сегодняшний день браузерами: Chrome, Firefox, Brave, Microsoft Edge, Яндекс, Опера и др. Источник получения расширения, например, для chrome-браузеров (Яндекс, Опера, Edge) – это «интернет-магазин Chrome» [14], а для Firefox – официальный магазин расширений «Firefox Add-Ons» [15].

Отличительная особенность MetaMask заключается в том, что сервис не хранит никакой информации о пользователе: ни адрес электронной почты, ни пароль, ни мастер-ключ (Secret Recovery Phrase – секретная фраза для восстановления), ни приватные ключи. То есть пользователь полностью владеет своей крипто-идентичностью. После установки расширение MetaMask появляется в списке установленных расширений браузера и становится доступным. Для работы с расширением пользователь должен создать кошелек.

С целью обеспечения конфиденциальности и безопасности кошелька и учетных записей используются: пароль и Secret Recovery Phrase, задаваемые пользователем поэтапно при создании кошелька, а также приватные ключи. Рассмотрим особенности перечисленных инструментов. Пароль задается пользователем с учетом ограниченной сервисом минимальной длины – не менее 8 символов. В качестве символов пароля могут быть использованы цифры, буквы верхнего и нижнего регистров, знаки препинания. Эти требования повышают криптостойкость пароля при машинном способе взлома аккаунта. Мастер-ключ представляет собой уникальную фразу, состоящую из 12 слов, которая генерируется при первой настройке MetaMask. MetaMask локально шифрует Secret Recovery Phrase с помощью введенного ранее пароля. В случае, если пользователь заблокирует свой кошелек, никто не сможет использовать находящиеся в нем средства, пока не будет введен пароль. В случае, если пользователь забудет пароль, то для восстановления доступа к аккаунту необходима секретная фраза, которая известна только владельцу. В случае утери мастер-ключа, никто (включая команду MetaMask) не может изменить или восстановить Secret Recovery Phrase. Это связано с особенностью децентрализованного устройства сети – анонимностью ее участников. При регистрации пользователь не вводит свои персональные данные (паспортные данные, номер телефона, фамилию, имя и пр.), следовательно отсутствует необходимость их централизованного хранения в сети. Адрес кошелька, идентифицирующий его владельца, представляет собой публичный код из 40-44 символов, сгенерированный на основе Secret Recovery Phrase.

Особенность генерации публичного кода заключается в том, что шифрование происходит в одну сторону, т.е. даже зная итоговый набор символов невозможно установить из какой последовательности он был получен. Это свойство позволяет использовать публичный код для идентификации пользователей в рамках производимых транзакций. Рассмотрим на примере процесс перевода и покупки токенов в MetaMask (рис. 1).



Рис. 1. Схема процесса платёжного оборота в децентрализованной сети
Fig. 1. Scheme of the payment turnover process in a decentralized network

Для проведения операции оплаты пользователь должен иметь на счету достаточное количество токенов и идентификатор получателя – уникальный номер криптокошелька второго участника сети, в сторону которого будет производиться списание.

После подтверждения оплаты с помощью одного из вариантов подтверждения (физический ключ – флеш карта с электронной подписью, пароль или фраза из 12 слов) запрос на списание будет поставлен в очередь. Майнер, занимающийся в данный момент обработкой транзакций «возмёт» задачу из очереди и будет тем или иным способом пытаться записать её в блок. Как только сформированный блок с этой и множеством других транзакций будет подписан и принят сетью (более 51% пользователей подтвердят, что блок корректен и начнут использовать данные из него для работы) счёт получателя и отправителя обновятся. Физически валюта не перемещается между пользователями, на самом деле в общий реестр добавляется запись о том, что счёт Пользователя А теперь не имеет N активов, а счёт Пользователя Б был пополнен на сумму N.

Каждый участник сделки (Пользователь А и Пользователь Б) владеет паролем и закрытым ключом, на основе которых были сгенерированы соответствующие адреса кошельков (Адрес АА, Адрес АВ). При оплате Пользователь А должен будет подтвердить факт владения своим кошельком «АА», т.е. подписать транзакцию со своей стороны с помощью закрытого и открытого ключа, и что именно он принял участие в этой транзакции.

Закрытый ключ и открытый ключ представляют собой последовательности символов, генерируемые из пароля. Как и публичный адрес, открытый ключ может свободно распространяться. Закрытый ключ, в свою очередь, должен храниться в секрете и доступ к нему должен иметь только владелец кошелька. В случае использования специализированных кошельков-расширений, например Metamask, закрытый ключ хранится в кэше браузера и подписание происходит в фоновом режиме. Единственное что может запросить кошелек для подтверждения действий пользователя это установленный им пароль, который так же хранится только на устройстве, где установлен кошелек.

Для дальнейшего проведения и подтверждения транзакции, система проходит по истории кошелька и убеждается, что кошелек, используемый для оплаты, владеет достаточным количеством токенов (в истории блокчейн, с этим кошельком связаны транзакции пополнения в сумме на нужный объём), иначе операция отменяется.

После того как система подтвердила баланс пользователя А, создаётся запрос на перевод, помещаемый в очередь для майнера. Майнеры настроены таким образом, что наиболее приоритетными для них являются те транзакции, у которых установлена высокая комиссия за проведение. Для ускорения процесса перевода пользователь А может повысить комиссию (gas в сети ethereum).

В MetaMask предусмотрены следующие типы сетей: основные и тестовые. Основная сеть (Ethereum Mainnet) – это основной блокчейн сети криптовалют. Проекты, достигающие фазы основной сети проходят тщательный процесс оценки перед запуском. Запуск основной сети выполняется только после проверки проекта на безопасность. Любой проект, запущенный в основной сети, доказывает, что его технология криптовалюты жизнеспособна. Mainnet строго придерживается правил, поскольку имеет дело с токенами, которые имеют реальную экономическую ценность [16]. Тестовые сети (Sepolia, Goerly и Linea Goerly) используются разработчиками для создания, модификации и тестирования функциональных возможностей проектов блокчейн, контроля их производительности перед запуском в основной сети. Токены тестовой сети представляют собой «поддельные» криптоактивы (или токены без стоимости), используемые для запуска протокола.

Тестовая сеть предоставляет разработчику набор функций и свойств, список которых может быть выведен в консоли при обращении к свойству «ethereum» (рис. 2).

Проверка доступности инструментов в консоли разработчика осуществляется с помощью свойства «window.ethereum» (рис. 3). В случае, если результатом проверки будет значение «undefiend», значит установка MetaMask не прошла и кошелек не доступен для разработки и отладки. В случае успешной установки кошелек становится доступным.

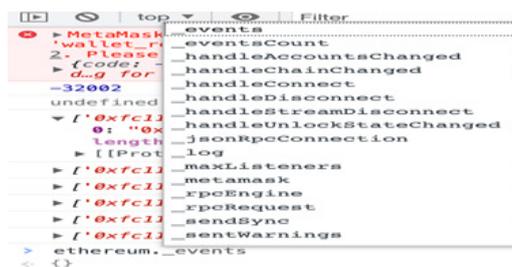


Рис. 2. Список функций разработчика в MetaMask

Fig. 2. List of developer functions in MetaMask



Рис. 3. Вывод свойства window.ethereum в консоль разработчика

Fig. 3. Output of the window.ethereum property to the developer console

Разработка любого Web-приложения предусматривает разработку подсистемы авторизации пользователя в системе. Рассмотрим особенности создания тестовой Web-страницы клиентской части приложения с использованием инструментов сервиса MetaMask. Процесс авторизации пользователя на сайте и вывод данных аккаунта пользователя в консоль может быть описан с помощью функции «connectEthWallet», написанной на языке программирования JavaScript (рис. 4). Программный код сохраняется в файле main.js.



Рис. 4. Пример программного кода авторизации пользователя и вывода данных его аккаунта

Fig. 4. Example of the user authorization code and the output of his account data

Запрос на получение уникального идентификатора кошелька пользователя реализуется с помощью функции «request» (создание запроса). Результат обработки запроса будет выведен на консоль (рис. 5). Для тестирования программного интерфейса Metamask необходимо создать переменную для функции «connectEthWallet», в которой будет содержаться асинхронный вызов анонимной функции. Функция «request» использует реализацию JSON-RPC интерфейса, которая хранится в переменной «ethereum» - «request».



Рис. 5. Вывод на консоль уникального идентификатора кошелька

Fig. 5. Output of the unique wallet identifier to the console

В качестве аргумента в функцию необходимо передать документ в формате JSON, описывающий запрос. В рассматриваемом примере для получения идентификатора кошелька активного пользователя необходимо вызвать метод «eth_requestAccounts». Полный список методов можно найти в официальной документации API ethereum [17]. Для тестирования разработанного программного кода авторизации пользователя авторами был так же разработан HTML код Web-страницы авторизации пользователя (файл index.html) (рис. 6).



Рис. 6. HTML код файла index.html Web-страницы авторизации пользователя

Fig. 6. HTML code of the file index.html User authorization web pages

Подключение файла `main.js` выполняется в секции «`script`». Функция «`connectEthWallet`» вызывается тэгом «`button`». Внешний вид Web-страницы авторизации пользователя приведен на рисунке 7. После открытия страницы в браузере отображается заголовок, указанный в тэге `h1` «Web 3.0 Fronted app» и кнопка «Login via ETH wallet» для имитации входа в систему с использованием `ethereum` кошелька. После нажатия на эту кнопку вызывается функция «`connectEthWallet`», описанная в файле `main.js` и расширение откроет пользователю контекстное меню с выбором аккаунта через который будет осуществляться авторизация (рис. 8).



Рис. 7. Пример Web-страницы авторизации пользователя

Fig. 7. Example of a user authorization Web page

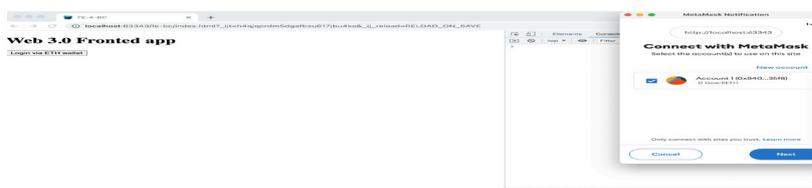


Рис. 8. Диалоговое окно выбора аккаунта пользователя для авторизации

Fig. 8. Dialog box for selecting a user account for authorization

После ввода пароля и выбора пользователем аккаунта «Account 1» становится доступным считывание данных идентификатора кошелька. Получив доступ к кошельку, программа выводит содержимое ответа – публичный адрес кошелька представленный частично после имени пользователя, который может быть использован для получения данных о транзакциях пользователя из сети. Адрес сайта «`http://localhost:63343`», который запрашивает доступ к кошельку пишется в верхней части диалогового окна расширения.

Получение баланса происходит через вызов метода «`eth_getBalance`» реализации JSON-RPC интерфейса. В качестве дополнительных параметров (поле «`params`») необходимо передать адрес кошелька и номер блока, до которого необходимо сделать анализ истории операций и рассчитывать баланс, или указать один из тэгов «`latest`» (последний), «`earliest`» (самый первый), «`pending`» (находящийся в обработке, но ещё не зафиксированный в сети).

Обсуждение результатов. С помощью приведенного в статье примера программного кода авторизации пользователя и описанного алгоритма его тестирования, становится возможным самостоятельно создавать личные анонимные аккаунт-кошельки `Ethereum` в сервисах, регистрация и дальнейшая работа в которых ведётся с использованием блокчейн аккаунта. Широкий перечень приложений, работающих на блокчейн `Ethereum` приведён на официальном сайте сети – `ethereum.org` в разделе `dapps`.

Расширение `MetaMask` является стандартом в сфере криптовалют и блокчейн сетей как со стороны пользователя, так и разработчиков. `MetaMask` является удобным и надёжным инструментом для хранения криптоактивов. Функционал приложения позволяет не только совершать покупки и переводы, но проходить авторизацию на различных ресурсах, работающих на блокчейн платформах от индустрии цифровой экономики до развлекательных обучающих платформ, сайтов-кинотеатров и игр.

Как правило, разработчики этих сайтов используют общий интерфейс блокчейн сети, который предоставляется `MetaMask` при установке. Использование программного интерфейса значительно упрощает и ускоряет процесс разработки, он прост и является оболочкой над программным интерфейсом сети `Ethereum`. Блокчейн как технология может быть внедрена во множество сфер. Рассмотренные авторами базовые инструменты могут быть полезны пользователям в понимании практического использования этой технологии

для реализации собственных проектов.

Вывод. В процессе изучения технологии блокчейн авторами были исследованы информационные ресурсы как русскоязычного, так и англоязычного сегментов сети Интернет. Большая часть открытых источников освещает теоретические основы данной технологии с точки зрения устройства блокчейн сети, при этом не затрагивая вопросы практической реализации и предоставляемых разработчикам и пользователям возможностей и инструментов для работы в рамках конкретной блокчейн сети.

Рассмотренные авторами инструменты MetaMask и примеры их использования могут быть применены при реализации блокчейн ориентированных Web-приложений, а также помочь в понимании базовых принципов построения интеграции пользователя блокчейн сети в закрытую систему.

Библиографический список:

1. Rauchs M., Hileman G. Global Cryptocurrency Benchmarking Study / Rauchs M., Hileman G. [Электронный ресурс] // Cambridge Centre for Alternative Finance Reports : [сайт]. — URL: <https://ideas.repec.org/b/jbs/altfin/201704-gcbs.html> (дата обращения: 10.03.2023).
2. Soylu P. K., Okur M., Çatıkkaş Ö., Altıntig Z. A. Long Memory in the Volatility of Selected Cryptocurrencies: Bitcoin, Ethereum and Ripple / Soylu P. K., Okur M., Çatıkkaş Ö., Altıntig Z. A. [Электронный ресурс] // Journal of Risk and Financial Management : [сайт]. — URL: <https://www.mdpi.com/1911-8074/13/6/107> (дата обращения: 20.03.2023).
3. Qiu T., Zhang R., Gao Y. Ripple vs. SWIFT: Transforming Cross Border Remittance Using Blockchain Technology [Текст] // Procedia Computer Science. — 2019. — № 147. — С. 428-434.
4. Shafaq N. K., Faiza L., Chirine G., Elhadj B., Anoud B. Blockchain smart contracts: Applications, challenges, and future trends [Текст] / Shafaq N. K., Faiza L., Chirine G., Elhadj B., Anoud B. // Peer-to-Peer Networking and Applications. — 2021. — № 14. — С. 2901–2925.
5. Малышенко, Т. И. Развитие технологии blockchain в испании и россии [Текст] / Т. И. Малышенко // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2017. — № 9. — С. 117-122.
6. Утечки информации ограниченного доступа в России за 2022 год / [Электронный ресурс] // <https://www.infowatch.ru/> : [сайт]. — URL: (дата обращения: 11.04.2023).
7. Крылов Г. О., Лисицын А. Ю., Поляков Л. И. Сравнительный анализ волатильности криптовалют и фиатных денег [Текст] / Г.О. Крылов, А.Ю. Лисицын, Л.И. Поляков // Финансы: теория и практика. — 2018. — № 2. — С. 66-89.
8. Chang S., Park Y. Wuthier Uncle-Block Attack: Blockchain Mining Threat Beyond. Block Withholding for Rational and Uncooperative Miners [Текст] / S. Chang, Y. Park, S. Wuthier // Applied Cryptography and Network Security. — 2019. — № 11464. — С. 241–258.
9. Qin R., Yuan Y., Wang F. Research on the Selection Strategies of Blockchain Mining Pools [Текст] // Transactions on Computational Social Systems. — 2018. — № 5. — С. 748 - 757.
10. Buterin V., Hernandez D., Kampehner T., Pham K., Qiao Z., Ryan D., Sin J., Wang Y., Zhang Y. X. Combining GHOST and Casper / V. Buterin, D. Hernandez, T. Kampehner, K. Pham, Z. Qiao, D. Ryan, J. Sin, Y. Wang, Y. X. Zhang [Электронный ресурс] // <https://arxiv.org/> : [сайт]. — URL: <https://arxiv.org/pdf/2003.03052.pdf> (дата обращения: 12.04.2023).
11. Berlin K., Dhenakaran S.S An Overview of Cryptanalysis of RSA Public key System [Текст] / Berlin K., Dhenakaran S.S // International Journal of Engineering and Technology. — 2017. — № 9. — С. 3575-3579.
12. Маринкин Д.Н. Проблемы информационной безопасности и криптографии пользователя современного блокчейна [Текст] / Д.Н. Маринкин // Проблемы правоохранительной деятельности. — 2019. — № 3. — С. 39-41.
13. Pramulia D., Anggorojati B. Implementation and evaluation of blockchain based e-voting system with Ethereum and Metamask / Pramulia D., Anggorojati B. [Текст] // International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System. — Jakarta, Indonesia, 2020. — С. 18-23.
14. MetaMask / [Электронный ресурс] // <https://chrome.google.com/webstore/detail/metamask/nkbihfbeogaeaoehlefnkodbepgpgknn?hl=ru> : [сайт]. — URL: <https://chrome.google.com/webstore/detail/metamask/nkbihfbeogaeaoehlefnkodbepgpgknn?hl=ru> (дата обращения: 11.05.2023).
15. MetaMask / [Электронный ресурс] // <https://addons.mozilla.org/ru/firefox/addon/ether-metamask/> : [сайт]. — URL: <https://addons.mozilla.org/ru/firefox/addon/ether-metamask/> (дата обращения: 30.04.2023).
16. Састрицин А. Что такое Testnet и Mainnet? Отличия / Састрицин А. [Электронный ресурс] // <https://bytwork.com/> : [сайт]. — URL: <https://bytwork.com/articles/chto-takoe-testnet-i-mainnet-otlichiya> (дата обращения: 11.05.2023).
17. JSON-RPC API / [Электронный ресурс] // <https://ethereum.org/> : [сайт]. URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/apis/json-rpc/> (дата обращения: 01.05.2023).

References

1. Hileman G. [Electronic resource] // Cambridge Centre for Alternative Finance Reports : [website]. — URL: <https://ideas.repec.org/b/jbs/altfin/201704-gcbs.html> (accessed: 03/10/2023).
2. Soylu P. K., Okur M., Çatıkkaş Ö., Altıntig Z. A. Long Memory in the Volatility of Selected Cryptocurrencies: Bitcoin, Ethereum and Ripple / Soylu P. K., Okur M., Çatıkkaş Ö., Altıntig Z. A. [Electronic resource] // Journal of Risk and Financial Management : [website]. — URL: <https://www.mdpi.com/1911-8074/13/6/107> (accessed: 03/20/2023).
3. Qiu T., Zhang R., Gao Y. Ripple vs. SWIFT: Transforming Cross Border Remittance Using Blockchain Technology [Text] / Qiu T., Zhang R., Gao Y. // Proceedings Computer Science. 2019;147:428-434.
4. Shafaq N. K., Faiza L., Chirine G., Elhadj B., Anoud B. Blockchain smart contracts: Applications, challenges, and future trends [Text] / Shafaq N. K., Faiza L., Chirine G., Elhadj B., Anoud B. // Peer-to-Peer Networking and Applications. 2021; 14: 2901-2925.
5. Malyshenko, T. I. Development of blockchain technology in Spain and Russia [Text]. *Economics and management: problems, solutions*. 2017; 9:117-122. (In Russ)
6. Leaks of restricted access information in Russia for 2022 / [Electronic resource] // <https://www.infowatch.ru> : [website]. — URL: (accessed: 11.04.2023). (In Russ)
7. Krylov G. O., Lisitsyn A. Yu., Polyakov L. I. Comparative analysis of the volatility of cryptocurrencies and fiat money [Text] *Finance: theory and practice*. 2018;2:66-89. (In Russ)
8. Chang S., Park Y. Wuthier Uncle-Block Attack: Blockchain Mining Threat Beyond. Block Withholding for Rational and Uncooperative Miners *Applied Cryptography and Network Security*. 2019;11464: 241-258.
9. Qin R., Yuan Y., Wang F. Research on the Selection Strategies of Blockchain Mining Pools [Text]. *Transactions on Computational Social Systems*. 2018; 5: 748-757.
10. Buterin V., Hernandez D., Kampefner T., Pham K., Qiao Z., Ryan D., Sin J., Wang Y., Zhang Y. X. Combining GHOST and Casper / V. Buterin, D. Hernandez, T. Kampefner, K. Pham, Z. Qiao, D. Ryan, J. Sin, Y. Wang, Y. X. Zhang [Electronic resource] // <https://arxiv.org> : [website]. — URL: <https://arxiv.org/pdf/2003.03052.pdf> (accessed: 12.04.2023).
11. Berlin K., Dhenakaran S.S An Overview of Cryptanalysis of RSA Public key System [Text]. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017; 9: 3575-3579.
12. Marinkin D.N. Problems of information security and cryptography of the modern blockchain user [Text] / *Problems of law enforcement*. 2019; 3: 39-41. (In Russ)
13. Pramulia D., Anggorojati B. Implementation and evaluation of blockchain based e-voting system with Ethereum and Metamask / Pramulia D., Anggorojati B. [Text]. *International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System. Jakarta, Indonesia.*, 2020; 18-23.
14. MetaMask / [Electronic resource] // <https://chrome.google.com> : [website]. — URL: <https://chrome.google.com/webstore/detail/metamask/nkbihfbeeagaoehlefnkodbefgpgknn?hl=ru> (accessed: 05/11/2023).
15. MetaMask / [Electronic resource] // <https://addons.mozilla.org> : [website]. — URL: <https://addons.mozilla.org/ru/firefox/addon/ether-metamask/> (accessed: 30.04.2023).
16. Sastriptsin A. What are Testnet and Mainnet? Differences / Sastriptsin A. [Electronic resource] // <https://bytwork.com> : [website]. — URL: <https://bytwork.com/articles/chto-takoe-testnet-i-mainnet-otlichiya> (accessed: 05/11/2023). (In Russ)
17. JSON-RPC API / [Electronic resource] // <https://ethereum.org> : [website]. — URL: <https://ethereum.org/en/developers/docs/apis/json-rpc/> (accessed: 01.05.2023).

Сведения об авторах:

Окладникова Ольга Дмитриевна, магистрант, факультет программной инженерии и компьютерной техники; hathaway@gmail.com

Буков Александр Викторович, магистрант, факультет программной инженерии и компьютерной техники; 370702@niuitmo.ru

Жуков Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент (квалификационная категория «ординарный доцент»), факультет программной инженерии и компьютерной техники; nnzhukov@itmo.ru

Information about authors:

Olga D. Okladnikova, Master's student, Faculty of Software Engineering and Computer Science; hathaway@gmail.com

Alexander V. Bukov, Master's student, Faculty of Software Engineering and Computer Science; 370702@niuitmo.ru
Nikolai N. Zhukov, Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof. (qualification category «Ordinary assoc. Prof.»), Faculty of Software Engineering and Computer Technology; nnzhukov@itmo.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 27.06.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.07.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.07.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.677



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-142-149

Оригинальная статья / Original article

**Моделирование процесса обучения нейросети DeepLabv3
для сегментации сельскохозяйственных полей**
А.Ф. Рогачев^{1,2}, И.С. Белоусов¹

¹Волгоградский государственный аграрный университет,

¹400002, г. Волгоград, пр. Университетский, 26, Россия,

²Волгоградский государственный технический университет,

²400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Резюме. Цель. Проведение мониторинга и определение состояния посевов в сельскохозяйственном производстве требует использование и совершенствование нейросетевых методов искусственного интеллекта. Целью исследования является создание математической модели процесса обучения нейросети DeepLabv3 для интеллектуального анализа и сегментации участков сельскохозяйственных полей. **Метод.** На основе сформированной базы RGB изображений сельскохозяйственных полей, размеченной на четыре класса, была разработана нейросеть архитектуры DeepLabv3 и проведено ее обучение. Получены аппроксимации кривой обучения модифицированной функцией Джонсона методами наименьших квадратов и наименьших модулей. **Результат.** Проведена статистическая оценка качества обучения и аппроксимации нейросетей архитектуры DeepLabV3 в сочетании с ResNet50. Построенное семейство DNN на основе DeepLabV3 с ResNet50 показали эффективность распознавания и достаточное быстродействие при определении состояния посевов. **Вывод.** Аппроксимация диаграммы обучения нейросетей архитектуры DeepLabV3, с использованием модифицированной функции Джонсона, позволяет оценивать значение «насыщения» моделируемой зависимости и прогнозировать максимальное значение метрики нейросети без учета возможного ее переобучения.

Ключевые слова: посевы сельскохозяйственных культур, задача сегментации, искусственные нейросети, математическое моделирование.

Для цитирования: А.Ф. Рогачев, И.С. Белоусов. Моделирование процесса обучения нейросети DeepLabv3 для сегментации сельскохозяйственных полей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):142-149. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-142-149

**Simulation of the of the DeepLabv3 neural network learning process
for the agricultural fields segmentation**

A. F. Rogachev^{1,2}, I.S. Belousov¹

¹Volgograd State Agricultural University,

¹26 Universitetsky Ave., Volgograd 400002, Russia,

²Volgograd State Technical University,

²28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Abstract. Objective. Monitoring and determining the state of crops in agricultural production requires the use and improvement of neural network methods of artificial intelligence. The aim of the study is to create a mathematical model of the learning process of the DeepLabV3 neural network for intelligent analysis and segmentation of agricultural fields. **Method.** Based on the newly formed RGB database of images of agricultural fields, marked up into four classes, a neural network of the DeepLabV3 architecture was developed and trained. Approximations of the learning curve by the modified Johnson function are obtained by the methods of least squares and least modules. **Result.** A statistical assessment of the quality of training and approximation of neural networks to the DeepLabV3

architecture in combination with ResNet 50 was carried out. The constructed DNN family based on DeepLabV3 with ResNet50 showed the efficiency of recognition and sufficient speed in determining the state of crops. **Conclusions.** Approximation of the neural network learning diagram to the DeepLabV3 architecture, using a modified Johnson function, allows us to estimate the value of the “saturation” of the simulated dependence and predict the maximum value of the neural network metric without taking into account its possible retraining.

Keywords: crops, segmentation problem, artificial neural networks, mathematical modeling.

For citation: A. F. Rogachev, I. S. Belousov. Simulation of the of the DeepLabv3 neural network learning process for the agricultural fields segmentation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):142-149. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-142-149

Введение. Дистанционное оценивание состояния сельскохозяйственных полей является достаточно трудозатратной задачей, учитывая их значительные площади [1]. Выявление биологического состояния агрофитоценозов в процессе их вегетации возможно методами искусственного интеллекта (ИИ). Для выявления мелиоративного состояния посевов, можно применять семантическую сегментацию по требуемым классам [2,3].

В качестве входных данных можно использовать цветные изображения, получаемые методами дистанционного зондирования, в частности БПЛА [4, 8]. Технологии дистанционного зондирования Земли широко используются в исследовании природной среды, мелиорации почв, метеорологии, и других сферах, наряду с беспилотными летательными аппаратами и искусственными спутниками Земли [4-7]. В точном земледелии прогнозы урожайности и данные о структуре насаждения является важными для оптимизации и корректировки структуры сельскохозяйственных посевов, а также обосновании субсидий сельхозтоваропроизводителям [10-14].

Постановка задачи. Решение задач семантической сегментации изображений агрополей обеспечивает прогнозирование урожайности и повышение качества управления сельскохозяйственным производством [8,9]. Формулирование и решению задачи семантической сегментации, является востребованным теорией и практикой агропромышленного производства. Создание и обучение глубоких нейронных сетей (DNN) сдерживается длительностью процессов их обучения, которая может составлять десятки часов даже при использовании современных графических средств GPU. Поэтому задача математического моделирования процесса обучения DNN для оценивания и прогнозирования показателей их эффективности является актуальной.

Имеется ряд научно-методических и прикладных проблем, включая выбор размеров и оптического разрешения изображений агрополей, обоснования оптимального сочетания гиперпараметров DNN для интеллектуальной поддержки принятия решений, требуют модификации известных и разработки новых подходов и решений, в том числе с использованием методов математического, статистического и компьютерного моделирования [25 - 27].

Методы исследования. Методические подходы к построению DNN основывались на рекомендациях А. Созыкина, изложенные в статье [22]. В качестве базы данных для сегментации использовались спектральные изображения участков сельскохозяйственных полей, полученные с помощью видеокамеры БПЛА. Исходные RGB-изображения размером 200x200 пикселей размечались по четырем классам, в которые входили вегетирующее поле, поле с дефектами развития, не засеянное поле, а также прочие объекты.

Рабочей гипотезой принималась возможность получения математического описания динамики обучения нейросети архитектуры DeepLabV3 ResNet50, с помощью аналитической функции. При обучении исследуемых нейросетей применялись известные критерии качества сегментации «Jaccard coefficient» (1)

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} . \quad (1)$$

Дополнительно использовались метрики «Intersection over Union» (IoU). Обучение нейросети осуществлялось с использованием графического ускорителя Nvidia RTX 2080Ti по технологии CUDA Toolkit 11.4. ИНС. Для повышения качества обучения в нейросетях применяли специальные слои регуляризации batch normalization, предложенные в 2015 году [23]. Как известно, обучение методом обратного распространения ошибки осуществляется быстрее в случае, когда обрабатываемые данные преобразованы к нормальному распределению, когда математическое ожидание равно нулю, а дисперсия равна единице [24]. При использовании метода стохастического градиентного спуска (SGD) нормализацию для каждого батча (пакета) можно выполнять отдельно с помощью mini-batch. Нормализованные значения $x_i \{ x_1, \dots, x_m \}$, рассчитывают по зависимости (2):

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}}, \tag{2}$$

где μ_B - среднее значение в батче, σ - величина дисперсии, ϵ - малая константа. После этого выполняют масштабирование и смещение y_i согласно (3)

$$y_i = \gamma \hat{x}_i + \beta, \tag{3}$$

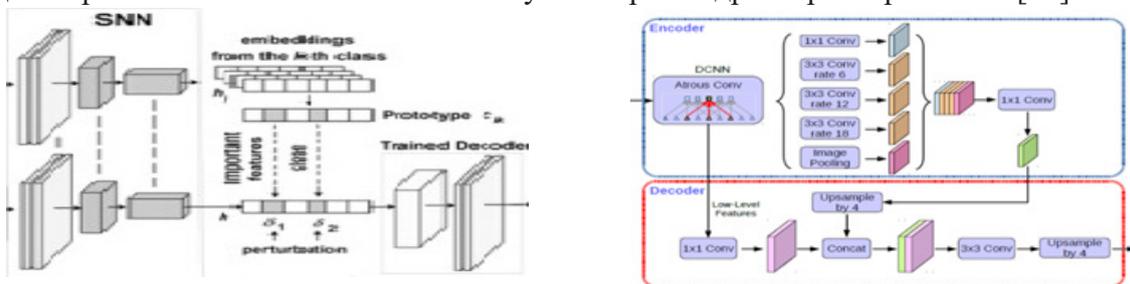
где γ и β - численные параметры, определяемые автоматически в процессе обучения нейросети.

Качество аппроксимации оценивалось по зависимостям, рекомендуемым, например, в [29]

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \tag{4}$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n} \tag{5}$$

Обсуждение результатов. В качестве архитектуры в экспериментах анализировались SNN-Net (а) и DeepLabV3 (б) (рис. 1). Архитектуры SNN-Net и DeepLabV3 использует каскады сверточных слоев. Обычно используют свертки ядрами размерами 3x3 [17].



а) б)
Рис. 1. Архитектуры сверточных сегментационных нейросетей:

а) SNN-Net; б) DeepLabV3

Fig. 1. Architectures of convolutional segmentation neural networks:

а) SNN-Net; б) DeepLabV3

Обе описываемые нейросети реализуют многократные уменьшения размеров изображений слоями свертки. Это позволяет сформировать сегментированный образ из изображений, построенных на различных стадиях преобразования исходных, которые объединяют с результатом, получаемым от backbone. Batch-нормализация позволяет стабилизировать процесс обучения, сократить количество эпох и, в конечном счете, времени обучения. В некоторых случаях, регуляризация с использованием batch-нормализации позволяет устранить негативное явление переобучения, что упрощает математическое описание динамики обучения нейросетей. Кроме того, применение batch-нормализации способствует решению проблемы «исчезающего градиента» [24].

Численные эксперименты проводились как для сжатых изображений, так и при помощи разделения исходных изображений на фрагменты 500x500 пикселей. Предварительно проведенные эксперименты показали, что модели DeepLabV3 ResNet50 и DeepLabV3 ResNet101

показывают преимущественное качество сегментации в сопоставлении с результатами, достигаемыми посредством модели FCN ResNet101. Типичные графики изменения функции потерь Loss в процессе обучения нейросети архитектуры DeepLabV3 представлены на рис. 2.

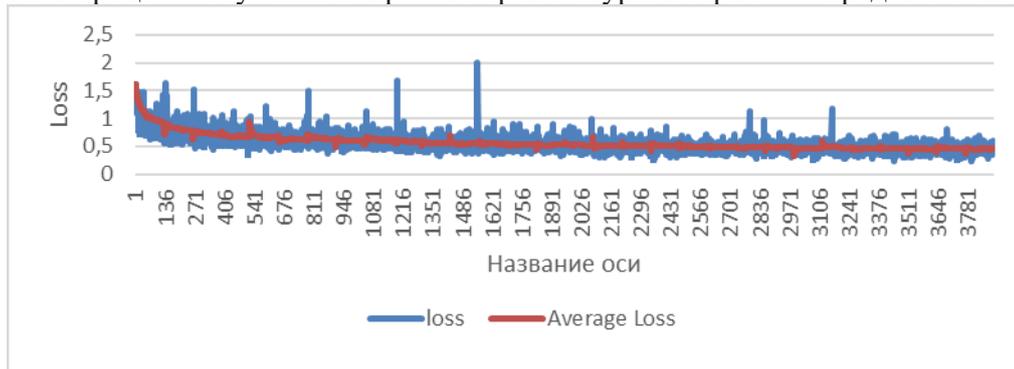


Рис.2. Типичные графики изменения функции потерь в зависимости от числа обработанных батчей изображений

Fig.2. Typical graphs of changes in the loss function depending on the number of processed image batches

Процесс обучения характеризуется относительно монотонными уменьшениями средних значений функции потерь (Average Loss) со значительными амплитудными скачками самой описываемой функции. Такой скачкообразный характер изменения показателей функции потерь при обработке различных bathes обусловлен использованием стохастического градиентного спуска и существенной неоднородностью цветографических параметров обрабатываемых цветных изображений участков сельскохозяйственных полей. Наибольшие значения Average Loss составляют 1.5 в начале процесса обучения.

После обработки примерно 4000 batches значения Average Loss падают до уровня 0.5 и стабилизируются без переобучения. Однако, представленная зависимость не очень наглядно характеризует процесс обучения разрабатываемой нейросети, поскольку в пределах каждой из эпох обработка отдельных пакетов только в совокупности определяет векторы изменения весовых коэффициентов нейронов обучаемой сети.

Более наглядное представление динамики и скорости процесса обучения нейросети по метрике «Jaccard score» в зависимости от числа эпох обучения, представлено на рис. 3.

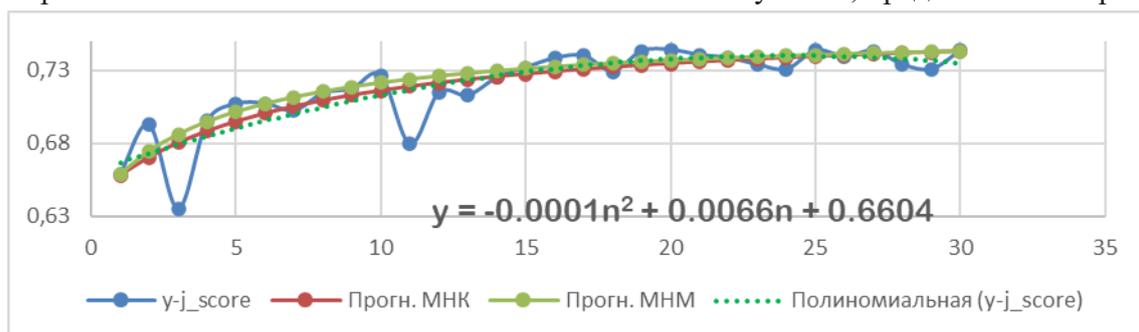


Рис. 3. Диаграмма обучения нейросети в зависимости от числа эпох, аппроксимированная различными методами

Fig. 3. Diagram of neural network training depending on the number of epochs, approximated by various methods

Для аппроксимации процесса обучения нейросети, который, при правильно подобранных гиперпараметрах, характеризуется «насыщением» (без переобучения), были исследованы различные математические зависимости, включая параболические, а также функции Джонсона (1), Торнквиста и другие [26].

$$y = P - a_1 / (a_2 + x), \quad (6)$$

где y – характеристический показатель моделируемого процесса;

P, a_1, a_2 – оцениваемые параметры; x – независимая переменная, характеризующая

текущее значение продолжительности моделируемого процесса.

Преимуществом зависимости (6) является наличие параметра P , представляющего собой значение «насыщения», которое в рассматриваемом случае характеризует оценку наибольшего значения метрики обучаемой нейросети при достаточно большом количестве эпох обучения. Результаты параметризации приведенных функций, выполненные численными методами наименьших квадратов (МНК) и наименьших модулей (МНМ)[28], например, встроенными в инструмент MS Excel, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры аппроксимирующих функций, полученные методами наименьших квадратов и наименьших модулей
Table 1. Parameters of approximating functions obtained by least squares and least modulus methods

Аппроксимирующая функция/ Approximation function	Модифицированная функция Джонсона/ Modified Johnson function		Парабола квадратичная/ Quadratic parabola
Метод оценки параметров Parameter estimation method	МНК	МНМ	МНК
P	0.765382	0.756506	-
a_1	0.8226842	0.522051	-0.0001
a_2	6.6671359	4.354997	0.0066
MSE	0.0136463	0.060165	0.10712194
MAE	0.0095585	0.008734	0.10180571

Анализ табл.1 показывает, что модифицированная функция Джонсона обеспечивает меньшие значения погрешностей аппроксимации по обоим критериям MSE и MAE. При этом параметры этой функции, определенные численными методами МНК и МНМ, близки между собой, что подтверждается близостью расположения расчетных значений, особенно в концах интервала (рис. 3). Отметим, что различие прогнозируемых предельных значений «насыщения» P , полученные в методах параметризации МНК и МНМ, незначительно и составляет всего 1.16%. Использование МНК дает несколько более высокое значение $P = 0.765382$, чем $P = 0.756506$, получаемое методом МНМ.

На основе разработанной нейросети создан SaaS сервис, интерфейс рабочего экрана которого визуализирует цветную маску, накладываемую на снимок изображения распознаваемого участка сельскохозяйственного поля. Применение исследованных сегментационных нейросетей позволило получить достаточно детализированные маски для заданных классов изображений участков сельскохозяйственных полей (рис. 4).

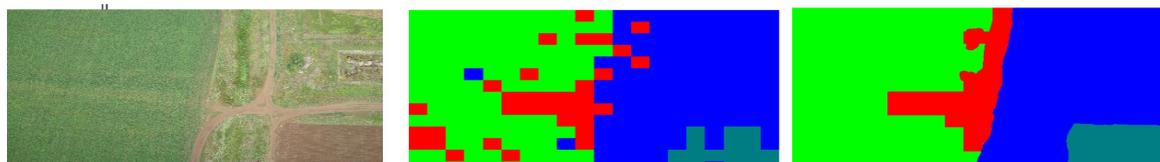


Рис. 4. Изображения участков сельскохозяйственных полей: а) исходное; б) размеченное; в) результат сегментации

Fig. 4. Images of areas of agricultural fields: a) original; b) marked; c) segmentation result

Полученные результаты нейросетевой сегментации показывают, что нейросети позволяют решать задачи интеллектуального распознавания развития посевов сельскохозяйственных культур, а также мелиоративного состояния участков полей. Отметим, что для повышения точности сегментации участков необходимо прежде всего совершенствовать обучающий dataset, включая его объем и сбалансированность по классам [8, 9].

Дальнейшее снижение погрешности возможно за счет увеличения объема и разрешения изображений, а также углубленной оптимизации гиперпараметров DNN, например, с применением программного обеспечения Keras Tuner, реализующего различные алгоритмы оптимизации [30].

Вывод. Аппроксимация диаграммы обучения нейросетей архитектуры DeepLabV3 с использованием модифицированной функции Джонсона, параметризуемой с помощью применения

МНК и МНМ, позволяет оценивать значение «насыщения» моделируемой зависимости и прогнозировать максимальное значение метрики нейросети без учета возможного ее переобучения. Необходимое повышение точности распознавания изображений участков сельскохозяйственных полей нейросетями моделей DeepLabV3 в сочетании с ResNet50 ограничивается недостаточным разрешением 200x200 пикселей, и возможными погрешностями ручной разметки изображений обучающей выборки.

Дальнейшее совершенствование архитектуры программы сегментации может быть обеспечено включением механизма «внимание» в архитектуру разрабатываемых нейросетей.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-37-90142.

Acknowledgments. The study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-37-90142.

Библиографический список

1. Saiz-Rubio V. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/207/htm>.
2. A Review on Deep Learning Techniques Applied to Semantic Segmentation / Garcia-Garcia Alberto, Orts-Escolano Sergio, Oprea Sergiu, Villena-Martinez Victor, Garcia-Rodriguez Jose. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.06857>.
3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. <http://docs.cntd.ru/document/902361843>.
4. Bin Xu et al., "Remote sensing monitoring on dynamic status of grassland productivity and animal loading balance in Northern China," IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2004, pp. 2306-2309 vol.4, doi: 10.1109/IGARSS.2004.1369747.
5. Pelletier, C.; Valero, S.; Inglada, J.; Champion, N.; Dedieu, G. Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas. *Remote Sens. Environ.* 2016, 187, 156–168.
6. L. Zhang, W. Yu, G. Li and H. Zhang, "An approach for flood inundated duration extraction based on Level Set Method using remote sensing data," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016, pp. 1820-1822, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7729467.
7. Zhao-Cheng Zeng, Yuan Wang, Thomas J. Pongetti, Fang-Ying Gong, Sally Newman, Yun Li, Vijay Natraj, Run-Lie Shia, Yuk L. Yung, Stanley P. Sander, Tracking the atmospheric pulse of a North American megacity from a mountaintop remote sensing observatory, *Remote Sensing of Environment*, Volume 248, 2020, 112000.
8. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Плещенко Т. В. Нейросетевая система управления программируемым аграрным производством с использованием ретроспективных данных и результатов дистанционного зондирования: монография. Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2021. 172 с.
9. Рогачёв А. Ф. Математическое моделирование экономической динамики в аграрном производстве: монография. Волгоград, 2014. 172 с.
10. Соловьев Р. А., Тельпухов Д. В., Кустов А. Г. Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе модифицированной свёрточной нейронной сети UNET // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4.
11. Jeong S, Ko J, Yeom J M. Predicting rice yield at pixel scale through synthetic use of crop and deep learning models with satellite data in South and North Korea[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 802(2):149726.
12. Xu J, Yang J, Xiong X, et al. Towards interpreting multi-temporal deep learning models in crop mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264:112599. <https://doi.org/10.3390/rs13224668>.
13. Ofori-Ampofo, S.; Pelletier, C.; Lang, S. Crop Type Mapping from Optical and Radar Time Series Using Attention Based Deep Learning. *Remote Sens.* 2021, 13, 4668.
14. Kussul N, Lavreniuk M, Skakun S, et al. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, PP(99):1-5..
15. Context-sensitive image analysis for coloring nature images / A. V. Alekseev, V. L. Rozaliev, Y. A. Orlova, A. V. Zaboloeva-Zotova // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 451. P. 133-141.
16. Deep residual learning for image recognition. K. He, X. Zhang, X. Ren, J Sun. *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR*. Las Vegas, Nevada, USA, 2016; 770-778.
17. Fezan Review DeepLabv3 (Semantic Segmentation). 2020. <https://medium.com/swlh/review-deeplabv3-semantic-segmentation-52c00ddb28d>.
18. Rosebrock Adrian. Intersection over Union (IoU) for object detection. <https://www.pyimagesearch.com/2016/11/07/intersection-over-union-iou-for-object-detection>.
19. Seeland M, Mäder P (2021) Multi-view classification with convolutional neural networks. *PLoS ONE* 16(1): e0245230. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245230>
20. Sik-Ho Tsang Review: DeepLabv3. Atrous Convolution (Semantic Segmentation). <https://towardsdatascience.com/review-deeplabv3-atrous-convolution-semantic-segmentation-6d818bfd1d74>.
21. Rogachev A. F., Belousov I.S. Neural network identification of problem areas of the state of crops by methods of

- artificial intelligence. Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp. 2022. 3(67). 459-466. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-52.
22. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. (2017. Т. 6, № 3. С. 28–59. DOI: 10.14529/cmse170303.
 23. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. JMLR Workshop and Conference Proceedings. Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (Lille, France, July 06–11, 2015), 2015. vol. 37. pp. 448–456.
 24. He K., Zhang X., Ren S., et al. Deep Residual Learning for Image Recognition. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016), 2016. pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
 25. Гусейнов Р.В., Гусейнова М.Р., Алиева К.А. Некоторые вопросы многокритериальной оптимизации параметров сложных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75.
 26. Гришин А. Ф., Ягунов В. Н., Котов-Дарти С. Ф. Статистические модели в экономике. Ростов н/Д. : Феникс, 2005. 344 с.
 27. Курбанов С. А., Мелихова Е. В., Бородычев В. В., Рогачев А. Ф. Математико-статистическое моделирование урожайности корнеплодов при комбинированном орошении // Проблемы развития АПК региона. – 2018. – № 4(36). – С. 70-76. – DOI 10.15217/issn2079-0996.2018.4.70.
 28. Рогачев А.Ф. Параметризация эконометрических зависимостей методом наименьших модулей // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2011. № 3. С. 0421100034.
 29. Gabriel Danilo Shimizu, Leandro Simões Azeredo Gonçalves. AgroReg: main regression models in agricultural sciences implemented as an R. Sci. Agric. v.80, e20220041, 2023. URL: <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0041>.
 30. Melikhova, E., Rogachev, A. Computer Optimization of ANN Hyperparameters for Retrospective Information Processing. In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Lecture Notes in Networks and Systems, (2023) vol 509. Springer, Cham. Pp. 723-730. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_72.

References

1. Saiz-Rubio V. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/207/htm>.
2. A Review on Deep Learning Techniques Applied to Semantic Segmentation / Garcia-Garcia Alberto, Orts-Escolano Sergio, Oprea Sergiu, Villena-Martinez Victor, Garcia-Rodriguez Jose. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.06857>.
3. Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. <http://docs.cntd.ru/document/902361843>.
4. Bin Xu et al., “Remote sensing monitoring on dynamic status of grassland productivity and animal loading balance in Northern China,” IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2004, pp. 2306-2309 vol.4, doi: 10.1109/IGARSS.2004.1369747.
5. Pelletier, C.; Valero, S.; Inglada, J.; Champion, N.; Dedieu, G. Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas. *Remote Sens. Environ.* 2016;187:156–168.
6. L. Zhang, W. Yu, G. Li and H. Zhang, “An approach for flood inundated duration extraction based on Level Set Method using remote sensing data,” 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016;1820-1822, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7729467.
7. Zhao-Cheng Zeng, Yuan Wang, Thomas J. Pongetti, Fang-Ying Gong, Sally Newman, Yun Li, Vijay Natraj, Run-Lie Shia, Yuk L. Yung, Stanley P. Sander, Tracking the atmospheric pulse of a North American megacity from a mountaintop remote sensing observatory, *Remote Sensing of Environment*, 2020; 248:112000.
8. Rogachev A.F., Melikhova E.V., Pleschenko T.V. Neural network control system for programmable agricultural production using retrospective data and remote sensing results: monograph. Volgograd: *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Agrarian University*, 2021; 172. (In Russ)
9. Rogachev A.F. Mathematical modeling of economic dynamics in agricultural production: monograph. Volgograd, 2014; 172. (In Russ)
10. Solovyov R. A., Telpukhov D. V., Kustov A. G. Automatic segmentation of satellite images based on a modified convolutional neural network UNET. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017; 4.(In Russ)
11. Jeong S, Ko J, Yeom J M. Predicting rice yield at pixel scale through synthetic use of crop and deep learning models with satellite data in South and North Korea[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 802(2):149726..
12. Xu J, Yang J, Xiong X, et al. Towards interpreting multi-temporal deep learning models in crop mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264:112599. <https://doi.org/10.3390/rs13224668>.
13. Ofori-Ampofo, S.; Pelletier, C.; Lang, S. Crop Type Mapping from Optical and Radar Time Series Using Attention Based Deep Learning. *Remote Sens.* 2021;13:4668.
14. Kussul N, Lavreniuk M, Skakun S, et al. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017;(99):1-5.

15. Context-sensitive image analysis for coloring nature images. A. V. Alekseev, V. L. Rozaliev, Y. A. Orlova, A. V. Zaboloeva-Zotova // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016; 451:133-141.
16. Deep residual learning for image recognition. K. He, X. Zhang, X. Ren, J. Sun. *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR*. Las Vegas, Nevada, USA, 2016; 770-778.
17. Fezan Review DeepLabv3 (Semantic Segmentation). 2020. <https://medium.com/swlh/review-deeplabv3-semantic-segmentation-52c00ddb28d>.
18. Rosebrock Adrian. Intersection over Union (IoU) for object detection. <https://www.pyimagesearch.com/2016/11/07/intersection-over-unioniou-for-object-detection>.
19. Seeland M, Mäder P (2021) Multi-view classification with convolutional neural networks. *PLoS ONE* 16(1): e0245230. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245230>
20. Sik-Ho Tsang Review: DeepLabv3. Atrous Convolution (Semantic Segmentation). <https://towardsdatascience.com/review-deeplabv3-atrous-convolution-semantic-segmentation-6d818bfd1d74>.
21. Rogachev A. F., Belousov I.S. Neural network identification of problem areas of the state of crops by methods of artificial intelligence. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2022; 3(67). 459-466. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-52.
22. Sozykin A.V. Review of methods for training deep neural networks. *Bulletin of SUSU. Series: Computational mathematics and computer science*. 2017; 6(3): 28–59. DOI: 10.14529/cmse170303.
23. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. *JMLR Workshop and Conference Proceedings. Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (Lille, France, July 06–11, 2015)*, 2015; 37: 448–456.
24. He K., Zhang X., Ren S., et al. Deep Residual Learning for Image Recognition. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016), 2016; 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
25. Guseinov R.V., Guseinova M.R., Alieva K.A. Some issues of multicriteria optimization of parameters of complex systems. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science*. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75. (In Russ)
26. Grishin A.F., Yagunov V.N., Kotov-Darty S.F. Statistical models in economics. Rostov n/a. : Phoenix, 2005;344.(In Russ)
27. Kurbanov S. A., Melikhova E. V., Borodychev V. V., Rogachev A. F. Mathematical and statistical modeling of root crop yields under combined irrigation. *Problems of development of the regional agro-industrial complex*. 2018; 4(36):70-76. – DOI 10.15217/issn2079-0996.2018.4.70 .(In Russ)
28. Rogachev A.F. Parameterization of econometric dependencies by the method of least modules. *Management of Economic Systems: electronic Scientific Journal*. 2011; 3: 0421100034.
29. Gabriel Danilo Shimizu, Leandro Simões Azeredo Gonçalves. AgroReg: main regression models in agricultural sciences implemented as an R. *Sci. Agric.* v.80, e20220041, 2023. URL: <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0041>.
30. Melikhova, E., Rogachev, A. Computer Optimization of ANN Hyperparameters for Retrospective Information Processing. In: Guda, A. (eds) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham. 2023;509:723-730. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_72.

Сведения об авторах:

Алексей Фруминович Рогачев, профессор кафедры математического моделирования и информатики, rafr@mail.ru ORCID 0000-0002-3077-6622

Илья Станиславович Белоусов, аспирант кафедры математического моделирования и информатики; neznaukaknazvatmail@gmail.com ORCID 0000-0003-4415-8742

Information about authors:

Alexey F. Rogachev, Professor of the Department of Mathematical Modeling and Computer Science, rafr@mail.ru ORCID 0000-0002-3077-6622

Ilya S. Belousov, Graduate Student of the Department of Mathematical Modeling and Computer Science; neznaukaknazvatmail@gmail.com ORCID 0000-0003-4415-8742

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 05.08.2023.

Одобрена после рецензирования/ Reved 01.09.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 01.09.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.711.3



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-150-155 Оригинальная статья /Original article

Автоматизированные системы управления в тепличных хозяйствах

Л.П. Скрипко, А.А. Скрипко

Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка инновационной автоматизированной программы, связанной с новым режимом полива, основанном на системе замкнутого водоснабжения. **Метод.** Используются методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствам. **Результат.** Представлена автоматизированная система управления в тепличном хозяйстве на базе контроллеров Arduino и программное обеспечение «ONI PLR Studio» для ее эксплуатации. Научная новизна работы состоит в создании соответствующих режимов системы климат-контроля. Программа «ONI PLR Studio» написана на языке FBD и решает важные задачи контроля за выращиванием сельскохозяйственной продукции, выведения новых сортов растений, в управлении технологическим процессом с помощью определенных сигналов. Пользовательский вход ограничивается корректировкой программного обеспечения и непосредственной установкой параметров контроллера. Корректировка может проводиться удаленно через компьютер, подключенный к контроллеру. Автоматический режим работы обеспечивают датчики и контроллер с электронными схемами управления, координирующие работу исполнительных механизмов в требуемом режиме. **Вывод.** Автоматизированная система управления позволяет контролировать температуру воздуха и почвы, влажность почвы и воздуха, питание почвы, обеззараживание, давление воздуха, освещение, наличие углекислого газа в теплице, климат-контроль.

Ключевые слова: система контроля, климат-контроль, автоматизированная система, тепличное хозяйство, программное обеспечение.

Для цитирования: Л.П. Скрипко, А.А. Скрипко. Автоматизированные системы управления в тепличных хозяйствах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3):150-155. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-150-155

Automated Control Systems in Greenhouses

L.P. Skripko, A.A. Skripko

Astrakhan State Technical University,
16/1 building Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the research is to develop an innovative automated program associated with a completely new irrigation regime based on a closed water supply system. **Method.** Methods of modeling, formalized description, optimal design and control of technological processes and production were used. **Result.** An automated control system in greenhouse farming based on Arduino controllers and ONI PLR Studio software for its operation are presented. The scientific novelty of the work lies in the creation of appropriate modes of the climate control system in greenhouses. The ONI PLR Studio program is written in FBD language. It solves important problems of controlling the cultivation of agricultural products, breeding new plant varieties, and controlling the technological process using certain signals. User input is limited to software adjustments and direct setting of controller parameters. The adjustment can be carried out remotely through a computer connected to the controller. The automatic operating mode is provided by sensors and a controller with electronic control circuits, which ensure that the actuators operate in the required mode. **Conclusion.** An automated control system (ACS) allows you to control air and soil temperature, soil and air humidity, soil nutrition, disinfection,

air pressure, lighting, the presence of carbon dioxide in the greenhouse, and climate control.

Keywords: control system, climate control, automated system, greenhouse, software.

For citation: L.P. Skripko, A.A. Skripko. Automated Control Systems in Greenhouses. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3):150-155. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-150-155

Введение. Одна из главных задач развития Российской Федерации состоит в наполнении внутреннего рынка отечественной сельскохозяйственной продукцией, в отказе от импортирования сельскохозяйственных товаров и, тем самым, в сокращении затрат на транспортировку, повышении урожайности. Астраханский край занимает большую площадь - около 44000 км². Однако, климат пустыни и полупустыни не благоприятно сказывается на беспрепятственном выращивании сельскохозяйственных продуктов. Сохранить урожайность – это значит создать растениям благоприятные условия для роста, оградить их от палящего солнца и ветров. И это станет возможным с применением тепличных хозяйств. Теплица имеет ряд преимуществ над выращиванием овощей в открытых грунтах. Главное это автоматизированный контроль и управление над процессом созревания.

Анализ научной литературы позволил сделать вывод о том, что умные теплицы оснащены современным оборудованием, с помощью которого происходит контроль над всеми параметрами, необходимыми для безболезненного роста растений и их раннего созревания. На рис.1 приведен пример такой теплицы.

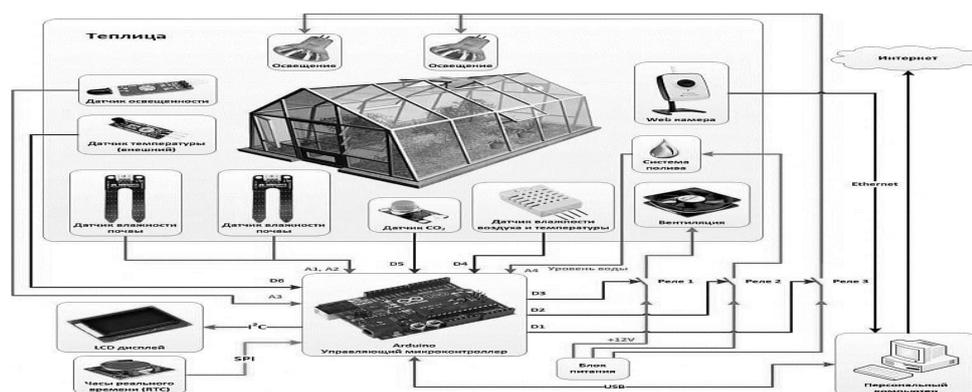


Рис. 1. Пример работы автоматизированной системы в теплице

Fig. 1. An example of an automated system in a greenhouse

В теплице, приведенной на рис.1, есть контроль освещения, который производится с помощью датчиков освещенности. Если света недостаточно, срабатывает датчик и происходит включение искусственного освещения. Датчики освещенности (освещения) построены на базе фоторезисторов. Фоторезистор позволяет контролировать уровень освещенности и реагировать на его изменение. Основной характеристикой обычного резистора является величина его сопротивления. От него зависят напряжение и ток, с помощью резистора мы выставляем нужные режимы работы [1].

Датчик внешней температуры воздуха отвечает за включение обогрева внутри теплицы, например, при резком перепаде температуры в ночное время ранней весной. Идеальная температура в теплице считается в пределах от 25 до 30°C тепла и подходит для выращивания почти всех видов растений. Датчик влажности почвы осуществляет контроль и управление поливом и защищает растения от пересыхания почвы или чрезмерного полива. Датчики CO₂ осуществляют контроль за содержанием углекислого газа в теплице, необходимость которого состоит в улучшении созревания культур, образования цветков, закладки плодов. Система вентиляции включает в себя датчик влажности воздуха и температуры. Датчики освещения и вентиляции служат для стимуляции корневой системы и формирования крепкого стержня растений. Основным элементом автоматической системы проветривания является небольшой гидроцилиндр, который открывает фрамуги, полость которого наполнена специальной жидкостью. При повышении температуры

жидкость расширяется и выдвигает поршень, который и открывает фрамугу. При снижении температуры жидкость сжимается, и под действием пружины поршень возвращается, закрывая окно. [2] Управление «умной» теплицей производится с помощью контроллера. Он включает в себя ССD дисплей, часы реального времени, блок питания, персональный компьютер и систему Ethernet. К недостаткам в обслуживании таких теплиц относятся большие энергозатраты и водозатраты.

Постановка задачи. Цель работы – разработать инновационную программу, связанную с абсолютно новым режимом полива, основанным на системе замкнутого водоснабжения. С помощью такой программы можно создать условия наиболее экономичные, как в плане энергоресурсов, так и водных запасов, расположенных вдали от водозаборов. Решить экологические проблемы загрязнения воды в реках и водоемах. [3]

Методы исследования. Пакет программ для автоматизированной системы замкнутого водоснабжения в тепличном хозяйстве. На рис.2 представлена структурная схема системы полива.

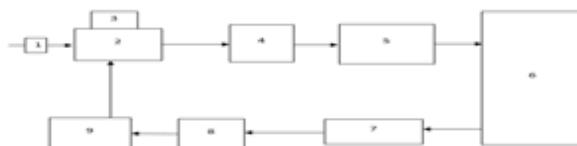


Рис.2. Структурная схема системы полива
Fig.2. Structural diagram of the irrigation system.

Вода в накопительной емкости поступает через кран (1) и попадает в накопитель (2), который оснащен теплообменом (3). Из накопителя вода попадает в узел смешивания растворов удобрений с водой (4) и через фильтр путем капельного полива (5) оснащает почву (6) водой и нитратами, необходимые для роста и созревания сельскохозяйственных культур. Замкнутое водоснабжение оснащено емкостью для сбора дренажа (7). Пройдя дезинфекцию в емкости (8) и фильтрацию путем осмоса (9), вода снова попадает в накопитель (2) [4]. На рис.3 представлена структурная схема автоматического контроля и управления за системой полива.



Рис.3. Структурная схема автоматического контроля и управления системы полива
Fig.3. Block diagram of automatic control and management of the irrigation system

За контроль уровня воды в накопителе отвечает датчик №1. Если уровня воды ниже нормы, то открывается кран и вода с внешней стороны поступает в накопитель. Далее она многократно циркулирует в теплице. Контроль за температурой воды осуществляется с помощью датчика №2. Необходимость полива показывает датчик влажности почвы №3, за подачу воды отвечает датчик №4. Необходимое количество и частота внесения в почву подкормки под контролем благодаря датчику №4. В данную систему входит датчик слива воды №6 и датчик очистки воды №7. [5] Система управления основана на программном обеспечении ONI PLR Studio и обладает всем необходимым функционалом. Контроль и управление осуществляется на базе микроконтроллера и программного обеспечения. Для работы необходим персональный компьютер, стабильное соединение системы Ethernet, дисплей, блок питания. ONI PLR Studio представляет простой веб-интерфейс с офлайн-стимулятором, предназначенный для программируемых реле. Логические реле запрограммированы для базовых систем автоматизированного управления. Благодаря программе можно получать информацию о датчиках, редактировать параметры при помощи дистанционного управления. Проект строится в режиме конструктора. Составляющие

программы следующие: счетчики, генераторы импульсов, мультиплексоры, регистры записи данных и компараторы. Уникальность программы – это работа сразу с несколькими датчиками в разных вкладках, создание релейно-контактных схем, объединение их в блоки, режимом отладки ошибок и работой с любой операционной системой Windows. [6]

Алгоритм программы обеспечивает автоматизированный контроль и управление параметрами системы. На рис.4 представлена блок-схемы алгоритма работы датчики температуры воздуха и температуры почвы.

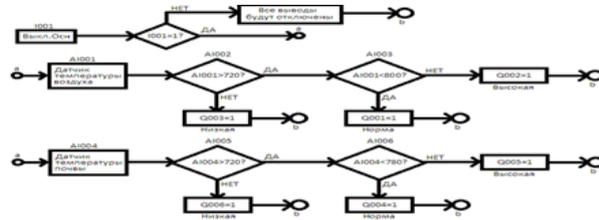


Рис.4. Блок-схемы алгоритма работы датчиков температуры воздуха и температуры почвы
 Fig.4. Flowcharts of the operation algorithm of air temperature and soil temperature sensors

На рис.5 представлены блок-схемы алгоритма работы датчиков температуры воздуха, скорости ветра и влажности почвы.

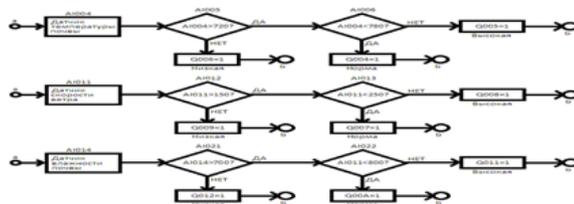


Рис.5. Блок-схемы алгоритма работы датчиков температуры воздуха, скорости ветра и влажности почвы
 Fig.5. Flowcharts of the operation algorithm of air temperature, wind speed and soil moisture sensors

На рис.6. представлены блок-схемы алгоритма работы датчиков освещенности, питания воздуха, давления воды и обеззараживателя.

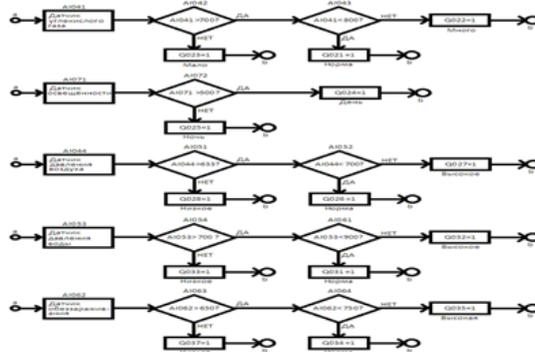


Рис.6. Блок-схемы алгоритма работы датчиков освещенности, питания воздуха, давления воды и обеззараживателя
 Fig.6. Flowcharts of the operation algorithm of light sensors, air supply, water pressure and disinfectant

На рис.7. представлены блок-схемы работы датчиков питания и влажности воздуха.

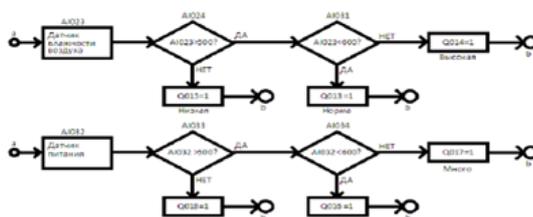


Рис.7. Блок-схемы работы датчиков питания и влажности воздуха
 Fig.7. Block diagrams of the operation of power and air humidity sensors

На рис. 8 представлена блок-схема алгоритма работы уровнемера.

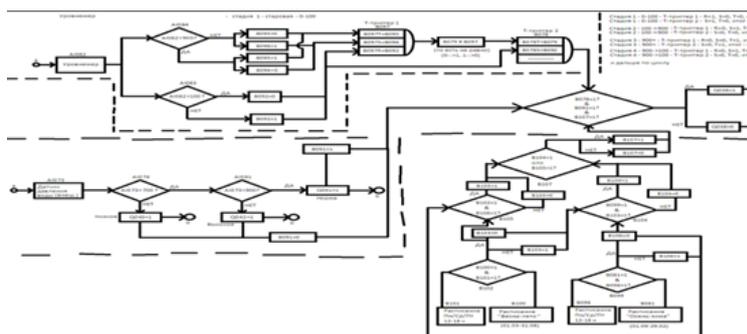


Рис.8. Блок-схема алгоритма работы уровнемера

Fig.8. Block diagram of the level gauge operation algorithm.

Обсуждение результатов. Представленный проект выполнен на пробной версии программной среды ONI PLR Studio. На рис. 9 представлено написание программы в программной среде ONI PLR Studio.

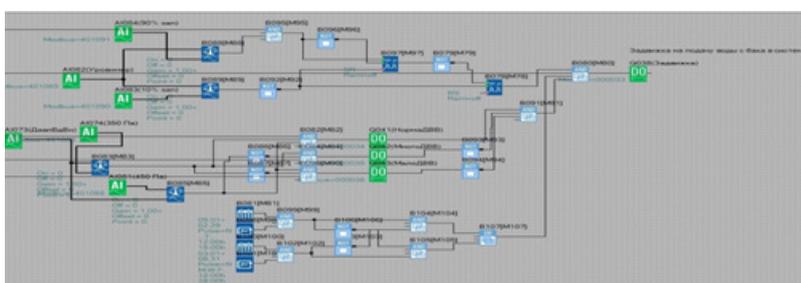


Рис.9. Написание программы в программной среде ONI PLR Studio

Fig.9. Writing a program in the ONI PLR Studio software environment

Для наглядности данного проекта создан макет теплицы с автоматизированной системой управления, включающую замкнутое водоснабжение (рис.10).



Рис. 10. Макет теплицы с автоматизированной системой управления

Fig.10. Model of a greenhouse with an automated control system

Написан пакет программ для адаптации теплицы в Астраханском крае. Ведется работа над анализом рынка сбыта и существующих «умных» теплиц. [7]

В первую очередь рассматриваются предприятия в Астраханской области, такие как «Кедр» и другие. В плане стоит проанализировать заинтересованные в автоматизированной системе тепличные хозяйства Российской Федерации и ближнее зарубежье.

Вывод. Научная новизна заключается в создании новой автоматизированной системы климат-контроля в тепличных хозяйствах. Созданная нами автоматизированная система, включающая систему замкнутого водоснабжения, поможет повысить урожайность, сократить время обработки и увеличить прибыль, за счет контроля параметров, таких как температура, влажность, освещенность, давление, полив, наличие углекислого газа и нитратов необходимых для роста и развития сельскохозяйственных культур.

Предлагаемый проект имеет ряд достоинств. Он экономичен, как в энергетическом плане, так и в водных ресурсах. Автоматизированная система с замкнутым водоснабжением предназначена для самостоятельного обслуживания агропромышленных культур, поддержания идеальных температур и влажности в течении всего года.

Наличие автоматики для проветривания, освещения, полива, подкормки благоприятно

сказывается на высокой урожайности. Пользовательский вход ограничивается корректировкой программного обеспечения и непосредственной установкой параметров контроллера. Корректировка может проводиться удаленно через компьютер. Автоматизированная система замкнутого водоснабжения в теплицах решает экологическую проблему, связанную с загрязнением водоемов.

В данной работе представлена структурная схема, алгоритм работы и пакет программ. Предлагаемая модель может быть использована в тепличных хозяйствах, которые в ней нуждаются. На рынке существуют такие системы. Разработанная нами автоматизированная система экономична за счет системы замкнутого водоснабжения.

Библиографический список:

1. Волошенко А.В., Д.Б. Горбунов. Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 109с.
2. Автоматическая теплица [электронный ресурс] URL: <http://umnayateplica.ru/>
3. Скрипко Л. П., Скрипко А.А. Автоматизация системы замкнутого водоснабжения для объектов аквакультуры//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 3. С. 49-55. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-49-55.
4. Системы автоматизации теплиц [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://automatization.pro/model-projects/sistemy-avtomatizacii-teplic>
5. Скрипко Л.П., Скрипко А.А. Автоматизированные системы и их применение в производственных процессах. 65-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 26–30 апреля 2021 года: материалы / Астраханский государственный технический университет. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. 1 CD-ROM. – Систем. требования: Microsoft Windows XP и выше. – Загл. с титул. экрана. Текст. Изображение: электронные. С. 692-694
6. Программируемые логические реле ONI PLR-S Системное руководство [электронный ресурс] URL: <https://oni-system.com/upload/oni-system/produksiya/2017-02-03-plr-s-sistemnoe-rukovodstvo.pdf>
7. Программируемые логические реле ONI PLR-S. Альбом примеров программ [эл.рес.] URL:<https://oni-system.com/upload/oni-system/produksiya/2017-02-16-a1-plr-s-albom-primerov-programm.pdf>

References

1. Voloshenko A.V., D.B. Gorbunov. Designing functional circuits of automatic control and regulation systems: textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008; 109. (In Russ)
2. Automatic greenhouse [elec. Res.] URL: <http://umnayateplica.ru> (In Russ)
3. Skripko L. P., Skripko A. A. Automation of closed water supply system for aquatic organisms. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2021;3:49-55. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-49-55. (In Russ)
4. Greenhouse automation systems [El. Res.]. – Access mode: <http://automatization.pro/model-projects/sistemy-avtomatizacii-teplic> (In Russ)
5. Skripko L.P., Skripko A.A. Automated systems and their application in production processes. 65th International Scientific Conference of Astrakhan State Technical University, Astrakhan, April 26-30, 2021: materials / Astrakhan State Technical University. – Astrakhan: Publishing House of AGTU, – 1 CD-ROM. – Systems. Requirements: Microsoft Windows XP and higher. – Title. with title. the screen. – Text. Image: electronic. 2021; 692-694 (In Russ)
6. Programmable logic relays ONI PLR-S System manual [elec. Res.] URL: <https://oni-system.com/upload/oni-system/produksiya/2017-02-03-plr-s-sistemnoe-rukovodstvo.pdf> (In Russ)
7. Programmable logic relays ONI PLR-S. Album of sample programs [elec. Res.] URL: <https://oni-system.com/upload/oni-system/produksiya/2017-02-16-a1-plr-s-albom-primerov-programm.pdf> (In Russ)

Сведения об авторах:

Людмила Петровна Скрипко кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт»; skripkoanastasia@mail.ru

Анастасия Андреевна Скрипко магистрант; skripkoanastasia@mail.ru

Information about authors:

Lyudmila P. Skripko, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of General Engineering Disciplines and Ground Transport; skripkoanastasia@mail.ru

Anastasia A. Skripko, Master's Student; skripkoanastasia@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 07.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 21.08.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.08.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.627:504.064.36:519.688



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-156-166 Оригинальная статья /Original article

Исследование и разработка методов сжатия данных для систем технического мониторинга

А. Г. Якунин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является развитие методов сжатия данных применительно к системам мониторинга. **Метод.** Исследования проводились преимущественно экспериментально, путем обработки данных, генерируемых информационно-измерительной системой Алтайского государственного технического университета в процессе проведения метеонаблюдений, температурного контроля и контроля расходования таких энергетических ресурсов как горячая и холодная вода, теплоснабжение. Для уплотнения хранимых данных предлагалось изменение их структуры и формы представления, степень сжатия находилась теоретически. **Результат.** Приводятся результаты исследований, проведённых с участием автора публикации, в области обработки, передачи и хранения данных. Рассматриваются методы потокового сжатия данных «на лету» по мере поступления как с потерями, так и без потерь, а также методы, основанные на оптимизации структуры баз данных, предназначенных для хранения собираемой в процессе мониторинга информации. Основное внимание уделено рассмотрению сжатия данных, создаваемых в процессе температурного мониторинга, поскольку именно контроль и наблюдение за температурными процессами наиболее распространён в различных технических системах управления технологическими процессами, системах учёта тепла как на стороне потребителя (ЖКХ), так и на стороне теплоснабжающей организации. **Вывод.** В подавляющем большинстве случаев сжатие без потерь позволяет сжать поступающую от системы мониторинга информацию более чем в 10 раз, а сжатие с потерями – существенно сильнее, причём без потерь прагматической ценности хранимой информации

Ключевые слова: сжатие данных с потерями, сжатие данных без потерь, потоковое сжатие, системы технического мониторинга, структуры данных, модификация RLE методов.

Для цитирования: А.Г.Якунин. Применение сжатия данных для систем технического мониторинга. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 156-166. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-156-166

Research and development of data compression methods for technical monitoring systems

A. G. Yakunin

I.I. Polzunova Altai State Technical University,
46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop methods for data compression in relation to monitoring systems. **Method.** The studies were carried out mainly experimentally, by processing data generated by the information-measuring system of the Altai State Technical University in the process of meteorological observations, temperature control and control of the consumption of such energy resources as hot and cold water, heat supply. However, when it was proposed to change their structure and presentation form to compact the stored data, the degree of compression was found theoretically. **Result.** The results of studies conducted with the participation of the author of the publication in the field of data processing, transmission and storage are presented. Methods for streaming data compression “on the fly” as it arrives, both lossy and lossless, as well

as methods based on optimizing the structure of databases designed to store information collected during monitoring, are considered. The main attention is paid to the consideration of data compression created in the process of temperature monitoring, since it is the control and monitoring of temperature processes that is most common in various technical process control systems, heat metering systems both on the consumer side (housing and communal services) and on the side of the heat supply organization. **Conclusion.** In the vast majority of cases, lossless compression allows you to compress the information received from the monitoring system by more than 10 times, and lossy compression is much stronger, and without losing the pragmatic value of the stored information.

Keywords: lossy data compression, lossless data compression, streaming compression, technical monitoring systems, data structures, modification of RLE methods.

For citation: A. G. Yakunin. Research and development of data compression methods for technical monitoring systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 156-166. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-156-166

Введение. Большинство поисковых систем и словарей определяют термин «технический мониторинг» как систематическое наблюдение за состоянием сооружения с целью оценки соответствия проектным решениям и нормативным требованиям. Применительно же к задачам наблюдения за параметрами технологических процессов часто применяют термин «технологический мониторинг». А поскольку наблюдение, например, за температурой не всегда связано с технологическими процессами, для таких наблюдений применяют термины «температурный мониторинг», «мониторинг температуры», а также «температурный контроль» или «контроль температуры» [1]. Поэтому в дальнейшем предполагается, что термин «технический мониторинг» включает в себя все другие термины, касающиеся систематического наблюдения и регистрации физических величин, описывающих изменение во времени состояния любых систем и протекающих в них процессов. Это могут быть технические и природные системы и объекты, включая здания и сооружения, а также присутствующие внутри или снаружи таких объектов среды: как жидкие, так твёрдые и газообразные.

Другим важным моментом является необходимость при проведении мониторинга фиксации на материальном носителе временной последовательности зарегистрированных в процессе мониторинга значений наблюдаемых параметров. В этом смысле следует различать понятия мониторинга и контроля. Как известно, при контроле тоже ведётся наблюдение состояния объекта, процесса или связанных с объектом или процессом сред. Однако цель контроля – проверка соответствия параметров, описывающих текущее состояние, заданным значениям или временным зависимостям и, при возникновении рассогласований, выработка управляющих воздействий, а также информирование обслуживающего систему персонала о возникновении в ней нештатных ситуаций. При мониторинге же фиксация результатов наблюдения выполняется с целью возможности восстановления таких наблюдений для их последующего обработки, подготовки и оформления каких-либо документов или для проведения исследований. Примером могут быть исследования, связанные с выявлением закономерностей изменения климата на земле или изменения солнечной активности, когда желательно иметь данные на протяжении как минимум десятилетий. Кроме того, такая фиксация может помочь при расследовании возникших в контролируемой системе аварийных ситуаций для выяснения причин их возникновения. Без неё нельзя представить и работу систем учёта отпуска тепловой или электрической энергии на тепловых и электрических станциях, когда по регламенту такая информация должна храниться не менее года. Аналогичные сроки предусмотрены и для журналов регистрации температурного режима холодильного оборудования.

Постановка задачи. Современные технические системы характеризуются большим числом контролируемых параметров, причём значение некоторых из них может достаточно быстро изменяться во времени, а зачастую ещё и может потребоваться передача большого потока измерительной информации между различными подсистемами систем управления

по телеметрическим каналам. В ряде случаев имеется необходимость фиксации результатов измерений за достаточно продолжительный временной интервал. Отсюда становится очевидной необходимость решения вопросов компактификации как передаваемых, таких и хранимых данных, генерируемых в таких системах. Сегодня вопросам сжатия данных посвящено огромное число работ и информационных ресурсов, например, [2-4], большинство из которых посвящены сжатию мультимедийной информации. В то же время стали появляться работы, посвящённые сжатию информации с сенсорных устройств в информационно-измерительных системах [5-7], а также применению для обработки специальных данных нетрадиционных алгоритмов, не применяемых для сжатия изображений и звука [8-10].

Целью данной работы является представление отдельных результатов исследований, связанных с разработкой эффективных высокопроизводительных методов и реализующих их алгоритмов сжатия информации.

Методы исследования. Для исследования использовались данные, полученные за период свыше 12 лет с информационно-измерительной системы университетского кампуса Алтайского государственного технического университета, подробно описанной в [11-13]. Изначально основным назначением данной системы был сбор данных о потреблении вузом энергоресурсов, однако впоследствии, после замены приборов учёта, акцент был перенесён на мониторинг метеоданных и температурных процессов, протекающих как внутри помещений вуза, так и в прилегающем к учебному корпусу воздушном пространстве. Именно данные температурного мониторинга и были использованы при проведении большинства экспериментов по сжатию данных. Вся собираемая системой информация о контролируемых в процессе мониторинга параметрах записывалась в базу данных, реализованную в системе управления базами данных MySQL. Структура базы представлена на рис. 1 и будет рассмотрена далее в статье.

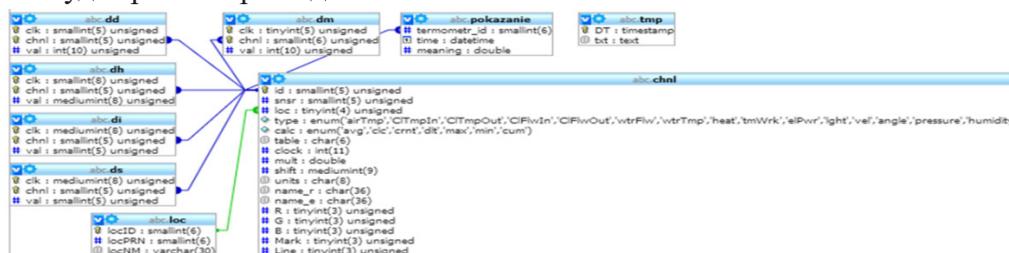


Рис. 1. Структура базы данных, использованной для хранения данных в описанной в [11-13] информационно-измерительной системе

Fig. 1. The structure of the database used to store data in the information-measuring system described in [11,13]

Хранимые в базе данные затем использовались для проведения экспериментов по их сжатию как известными методами, а также новыми методами, большинство из которых являлись модификацию уже существующих алгоритмов. При этом оценивалась эффективность сжатия разработанного метода для различного характера изменения во времени наблюдаемых процессов относительно классических алгоритмов сжатия, в том числе и относительно различных архиваторов, используемых в вычислительных устройствах.

Обсуждение результатов. Методы на основе нормировки и структуризации данных. При решении задач технического мониторинга оптимизировать объем хранимых данных можно за счёт применения их нормализации и структуризации, учитывающей вид измеряемой величины и динамику её изменения во времени. Частично эта задача была решена в реализованной в системе мониторинга [11-13] и показанной на рис. 1 базе данных. Главной таблицей базы является таблица “chnl”, хранящая информацию обо всех измерительных каналах системы. Применительно к теме данной работы в ней задействованы поля “id”, “calc”, “table”, “clock”, “mult” и “shift”. Поле “id” задаёт номер канала, с которого поступают данные, а поле “table” указывает на одну из предназначенных для хранения поступающих из канала исходных или обработанных данных таблиц “ds”, “di”, “dh”, “d”, “dd”, “dm” (соответственно, с кратным секундным, минутным, часовым, суточным или месячным

интервалом). В этих таблицах поле “chnl” соответствует номеру канала, указанному в поле “id” таблицы “chnl”, а в полях “val” и “clc” хранятся нормализованные значения исходных или обработанных результатов измерений и номера отсчётов n_i .

В системе минимальным неделимым временным интервалом является интервал базового такта $\Delta_t=30c$. Как показали исследования, в более частой временной дискретизации для регистрируемых в системе физических величин нет необходимости. Все остальные временные интервалы, используемые для дискретизации измерений, проводимых в разных каналах, кратны значению $30c$ и коэффициент кратности k_p , задающий число базовых тактов между смежными отсчётами контролируемого параметра, хранится в поле “clock”. Поэтому в таблицах “ds”, “di”, “dh”, “dd”, “dm” реальное время t_i , в которое был сделан отсчёт, находится из выражения $t_i=t_0+k_i \cdot n_i \cdot \Delta_p$, где t_0 – дата и время инициализации базы данных, заданное в файле инициализации. Такое решение позволило существенно сократить место, отводимое в базе под хранение информации о времени получения отсчётов [14]. Так, если бы поле “clc” хранило фактическое время проведения соответствующего измерения, то его размер в СУБД MySQL, его размер был бы равен 8 байтам, тогда как, как видно из табл.1, при предложенном варианте хранения временных отсчётов для этого более чем достаточно длины поля в 2-3 байта.

Таблица 1. Зависимость максимально возможного времени хранения (заданное в годах), от интервала выборки данных и заданного в байтах размера поля “clk”

Table 1. Dependence of the maximum possible storage time (specified in years), on the data sampling interval and the size of the “clk” field specified in bytes

Кол-во байт/ Number of bytes	Интервал выборки данных/ Data sampling interval									
	1c	10c	30c	1мин	5мин	10мин	30мин	1 час	1 сутки	1 месяц
1									0.7	21
2						1.3	4	7.5	180	
3	0.53	5.3	10.6	32	160	133				
4	136									

Стоит отметить, что при таком подходе к выбору длины поля нужно подходить с большой осторожностью. В частности, в описанной в [11-13] информационной системе на момент ее инициализации в 2009 году изначально были выбраны размеры полей, выделенные в таблице серым цветом. В результате в части таблиц, а именно, в таблицах “ds” и “di” по прошествии соответственно 5 и 10 лет возникла необходимость в увеличении размера поля на 1 байт (на рис.1 для таблиц показаны изначально выбранные типы полей). Более того, в процессе работы с базой выяснилось, что значение t_0 лучше вносить не в отдельную переменную, а непосредственно указывать её в соответствующем поле соответствующего канала в таблице “chnl”, поскольку в процессе работы часть каналов были закрыты, а часть, наоборот, введены в действие в более поздний срок.

Поле “calc” в таблице “chnl” указывает на характер обработки поступающей из канала измерительной информации, результаты которой будут храниться в системе. Такими операциями могут быть усреднение данных, выборка максимального, минимального или накопленного значения, либо же отказа от выполнения операций и сохранение данных в исходном виде (когда значение поля “calc” равно “crnt”).

В зависимости от вида обработки данных и интервала их выборки после выполнения такой обработки они записываются в поле “val” в одну из таблиц “ds”, “di”, “dh”, “dd”, “dm” в соответствии со значением поля “table” таблицы “chnl”. В данной системе в таблицу “ds” записывались результаты температурных измерений и скорости ветра, в таблицу “di” – сведения о давлении и влажности, в таблицу “dh” – показания теплосчётчиков и водосчётчиков, а в таблицах “dd”, “dm” – накопленные показания приборов учёта соответственно за сутки и за месяц. В любом случае, обязательной операцией перед записью является операция нормализации данных, так как они поступают в систему из измерительных каналов в виде вещественных чисел, соответствующих действительному значению измеряемого параметра в соответствии в заданной для него в поле “units” единице измерения. Эти числа пересчитываются в целые нормализованные значения по формуле $y_i=round(k_x \cdot x_i + y_0)$, где x_i

– поступающие из канала данные, k_x – мультипликативный коэффициент масштабирования исходного значения параметра, y_0 – аддитивный коэффициент его смещения, а **round** – функция округления результата вычислений до целого значения. Значения подбираются так, чтобы самому минимальному значению измеряемого параметра соответствовало нулевое значение y_p , а максимальному – значение, близкое к 2^{8n} , где n – число байт, отводимых под хранение результатов измерения наблюдаемого параметра. В результате такой нормализации для хранения данных потребуется поле длиной не 8, а всего 2-3 байта, поскольку крайне редко погрешность измерения бывает менее 0.1-0.001%, то есть при минимуме вычислительных операций можно сжать данные в 2-4 раза.

Другой особенностью предложенной структуры является возможность хранения одного и того же параметра сразу в нескольких таблицах., в зависимости от характера его обработки. Так, в таблице “ds” можно хранить исходные текущие показания водосчетчика, в таблице “dh” – накопленные значения расхода за 1 час, в таблице “dd” – накопленные суточные значения расхода и в таблице “dm” – месячные расходы. Конечно, объем хранимых при этом данных хотя и незначительно, но возрастает, однако, при этом существенно повышается оперативность получения необходимых сведений. В дальнейшем предполагается дальнейшее совершенствование структуры базы данных, целью которого являлось сочетание высокой степени сжатия и быстрого доступа к данным. Для этого предполагается применять рассмотренные далее методы для максимального сжатия архивных данных прошлых периодов (более года) и использовании менее ресурсоёмких методов сжатия для доступа к оперативным данным текущих периодов. Такой подход вполне оправдан, так как данные прошлых лет менее востребованы и чаще используются для проведения исследовательских работ, когда время доступа к данным не имеет принципиального значения, поскольку оно будет всё равно много меньше времени, необходимого для выполнения самого исследования.

Методы сжатия с применением разностных схем и RLE — алгоритмов. Дальнейшего повышения степени сжатия можно добиться за счёт применения разностных схем [15]. Принцип такого сжатия поясняет рис.2.

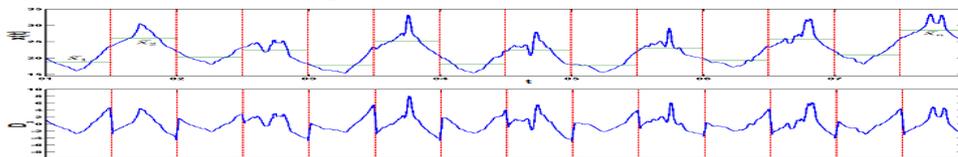


Рис. 2. Временные диаграммы циклического изменения суточной уличной температуры $x(t)$ и разностные сигналы $D(t)$ между этими изменениями и её среднесуточными значениями X_i

Fig. 2. Time diagrams of cyclic change in daily street temperature $x(t)$ and difference signals $D(t)$ between these changes and its average daily values X_i

Из него видно, что вместо исходного сигнала хранятся его отклонения от среднего значения, взятые на некотором временном интервале (в данном случае, сутки). Поскольку отклонения от среднего, как видно из рис., в 2–4 раза меньше значений исходного сигнала, это позволяет сократить размерность необходимой для хранения разрядной сетки на 1–2 двоичных разряда. Можно уменьшить величину отклонений ещё существеннее, если сократить интервал усреднения. Однако при этом не следует забывать, что помимо отклонений необходимо хранить и сами средние значения, что снижает степень сжатия.

Кроме того, если в результатах наблюдений имеется тренд или значительные колебания, как это имеет место на рис.2, разностные значения быстро становятся слишком велики и будут мало чем отличаться от начального опорного значения. Именно критерий достижения разностных значений заданного порога и будет являться главной причиной ограничения числа членов временного ряда. Поэтому базовый разностный метод малоэффективен и на практике чаще применяются схемы, когда запоминаются не отклонения от одной опорной точки (будь то среднее значение или какой-то абсолютный отсчёт), а разность значений

смежных отсчётов. На рис. 3 в качестве примера представлены различные типовые графики изменения температуры на улице и в различных точках помещения. Измерение температуры проводилось с использованием датчиков DS18B20 с температурным разрешением 0.0625°C .

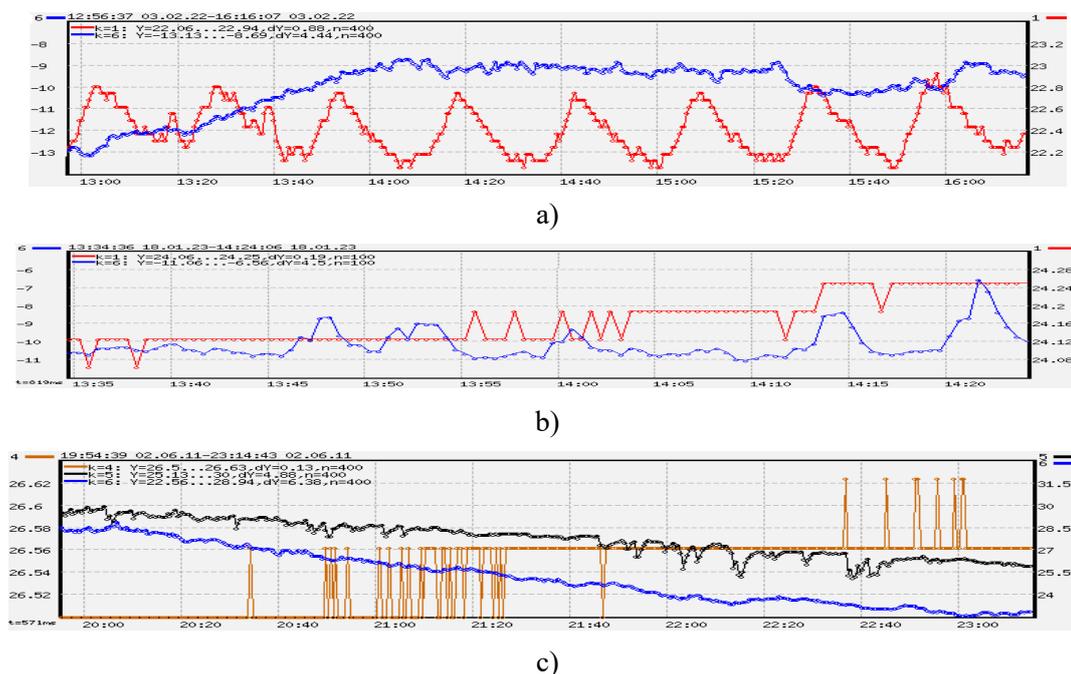


Рис 3. Диаграммы временного изменения уличной температуры (синий график, канал 6), температуры в различных точках комнаты (красная линия, канал 1 – температура у потолка, коричневая линия, канал 4 – у пола) и в чердачном помещении (канал 5, черная линия). а) – работает электрообогреватель, создающий в помещении регулярные температурные осцилляции, б) сильные порывы ветра, приводящие из-за наличия в воздушных массах микро-турбулентностей к температурным скачкам до $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$, в) – штиль, плавное похолодание к ночи

Fig. 3. Diagrams of time changes in outdoor temperature (blue graph, channel 6), temperature at various points in the room (red line, channel 1 - temperature at the ceiling and brown line, channel 4 - at the floor) and in the attic (channel 5, black line). a) - an electric heater is working, creating regular temperature oscillations in the room, b) strong gusts of wind, leading to temperature jumps up to $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ due to the presence of micro-turbulences in the air masses, c) - calm, gradual cooling by night

Как видно из рис.3, даже при самых резких температурных колебаниях перепад значений смежных отсчётов не превышает 32 уровней квантования (рис.3б, последний правый выброс температуры). Поэтому под один отсчёт достаточно отводить не 10, а только 5 бит, что позволяет почти вдвое сократить объем хранимых данных практически без снижения скорости их последующей выборки.

Для повышения надёжности и сокращения времени, затрачиваемого на восстановление данных, последовательность разностных значений должна периодически прерываться и начинаться заново, чтобы образующий серию отсчётов числовой ряд имел ограниченную длину. Тогда потеря или ошибка единственного начального абсолютного значения не приведёт к полной потере информации обо всех входящих в наблюдение контролируемой физической величины сериях отсчётов, и для восстановления значений отсчётов за последний период наблюдений не потребуется выполнять полный пересчёт, начиная с самого первого значения временного ряда.

Структура базы данных, предназначенная для хранения зарегистрированных и упакованных таким образом отсчётов, приведена в табл.2.

Образуемый нормализованными значениями измеряемой величины временной ряд разбивается на отдельные серии и в табл. “Reference” для каждой серии фиксируется время измерения и абсолютное значение первого входящего в серию отсчёта, а также общее количество таких отсчётов и значение индекса первого входящего в серию разностного значения. Разностные значения и их индексы хранятся в табл. “Data”.

Таблица 2. Структура данных для хранения серий разностных отсчётов
Table. 2. Database structure for storing series of difference readings

Таблица “Data”

Ключ Key	Имя поля Field Name	Описание Description
PK	ID	Номер элемента
	Offsets	Разностные значения

Таблица “Reference”

Ключ Key	Имя поля Field Name	Описание Description
PK	Start_time	Начало серии
FK	Series_ID	Номер первого элемента серии (внешний ключ)
	Init_Val	Initial Value – абсолютное значение первого элемента в серии разностных значений
	Ser_Len	Series length - число элементов, входящий в одну серию данных

При этом время начала серии для компактификации данных тоже лучше записывать не UTCформате, а в виде числа тактов, прошедших с момента активации канала. Для хранения данных можно обойтись и одной таблицей “Reference”, если поле “Series_ID” заменить бинарным полем переменной длины, в которое и будет записываться вся серия разностных значений. При этом длина серии будет определяться лимитом времени, необходимым для восстановления исходного временного ряда. Другой причиной ограничения длины серии может явиться появление резкого изменения значения измеряемой величины, когда для записи соответствующей ему разности окажется недостаточно числа бит, выделяемых под хранение разностного значения, число которых находится путём проведения статистических исследований для конкретного регистрируемого процесса. Очевидно, такое очередное значение окажется первым элементом очередной серии регистрируемых данных.

С другой стороны, как видно из рис.3, эти значения могут иметь не только резкие выбросы, но и на протяжении достаточно долгого времени оставаться постоянными (рис.3б, канал 1), либо постоянными сохраняются разности смежных отсчётов (рис.3а, канал 1, отдельные участки на склонах сигналов треугольной формы). Отсюда напрашивается вывод о целесообразности дополнения метода сжатия путём хранения разностных значений методом, известным в литературе как алгоритм длин серий или алгоритм RLE (run-length encoding) [3]. Суть его состоит в том, что входящие в зарегистрированную последовательность результатов измерений участки, состоящие из следующих подряд неизменных значений, заменяются парой чисел. Одно из них задаёт число таких значений, а другое равно самому этому значению. Поскольку при мониторинге даже одного и того же процесса характер его изменения во времени может быть совершенно различным, было предложено модифицировать стандартный алгоритм путём введения в последовательность пар «значение – число повторов» дополнительных признаков, позволяющих в этой последовательности менять число бит, отводимых под запись максимально возможного числа повторов, и разностного значения, а также под общее число байт, отводимых под запись следующих рядом таких пар.

Например, если разностные значения лежат в пределах восьми уровней квантования с учётом знака (от -3 до +4), а число повторов одинаковых значений не превышает 16, то для записи одной пары «значение – число повторов» потребуется $3+4=7$ бит. Тогда в 3 байта можно записать 3 таких пары и 3 бита останется под запись кода признака, задающего характер компоновки данных в следующие байты. При этом, независимо от способа компоновки информации в байты, старший знаковый бит старшего байта должен выполнять функцию флага, указывающего на то, что следующие за ним биты (от одного до трёх) будут задавать характер компоновки и число следующих за ним информационных байт. Такой гибридный подход позволил за счёт непрерывного анализа поступающих данных выполнять смену формата упаковки результатов наблюдения с учётом динамики их изменения и, тем самым, обеспечить степень сжатия, сопоставимую, а в ряде случаев (в зависимости от характера регистрируемого процесса) и превосходящую степень сжатия современных архиваторов.

Таблица 3. Результаты сжатия данных температурных каналов системы мониторинга обычными архиваторами и предложенным алгоритмом (Org)*
Table 3. The results of data compression of the temperature channels of the monitoring system by conventional archivers and the proposed algorithm (Org)*

Bzip2	LZMa	LZMa2	PPMd	GZIP	XZ	RAR	ZIP	Deflate	Org
Резкие перепады уличной температуры/ Sudden changes in outside temperature									
1406	1597	1602	1723	1725	1542	1403	2137	1806	1820
Плавные изменения комнатной температуры/ Smooth changes in room temperature									
992	1138	1153	1220	1240	1091	1052	1561	1294	980

*Исходные данные – 14000байт нормализованных 7000 отсчётов. Выделены наиболее эффективные алгоритмы сжатия/Initial data - 14000 bytes of normalized 7000 readings. The most efficient compression algorithms are highlighted

Проведённые исследования, отдельные результаты которых представлены в табл. 3 подтвердили, что без потери информации можно достичь степень сжатия уже нормализованных данных в 14.2 раза при благоприятных условиях наблюдений и в 7.7 раза – при неблагоприятных [6]. При этом, в отличие от классических алгоритмов, метод обеспечивает потоковое, а не блочное сжатие, алгоритмически прост и не требует для реализации значительных вычислительных ресурсов.

Методы сжатия с потерями. Как известно, любые измерения имеют погрешности, поэтому сохранять информацию с высокой степенью точности нецелесообразно, если погрешность измерения превышает погрешность его округления при записи результата. Не имеет смысла сохранять результат измерений с высокой точностью и тогда, когда из-за наличия внешних шумов, помех и различных других дестабилизирующих факторов в нём присутствуют ошибки и отклонения, превышающие приборную погрешность. Особенно это наглядно видно при представлении результатов измерений в цифровом виде. Так, на рис.3b, канал 1 и на рис 3с., канал 4 на протяжении достаточно долгого времени измеренное значение остаётся в целом неизменным или изредка переходит с одного уровня квантования на другой, но при этом непрерывно флуктуирует в пределах одного уровня квантования. В результате, использование ранее рассмотренных методов сжатия на базе RLE алгоритмов становится малоэффективным, так как протяжённость участков с неизменными значениями из-за таких флуктуаций становится очень непродолжительной. Избавиться от таких флуктуаций можно путём усреднения значений временного ряда по нескольким точкам, например, методом скользящего среднего, либо путём аппроксимации участков фиксированной длины полиномами или тригонометрическими функциями, либо за счёт применения нелинейной фильтрации [17], суть которой поясняет рис. 4.

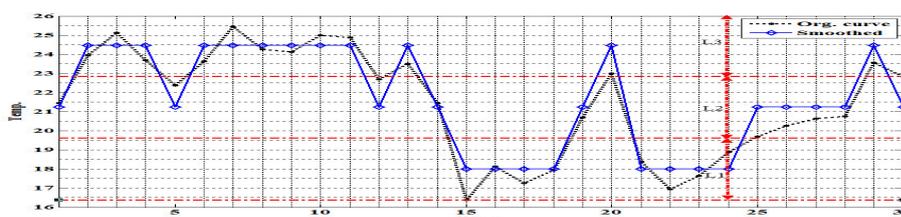


Рис. 4. Применение нелинейной фильтрации для сокращения числа изменений регистрируемой физической величины

Fig. 4. Application of non-linear filtering to reduce the number of changes in the registered physical quantity

Для реализации такой фильтрации весь диапазон изменения физической величины заменяется на ряд слоёв толщиной L_p , в пределах которых любые фактические значения измеряемой величины заменяются одним значением, соответствующим середине слоя. При этом, для усиления эффекта сглаживания, можно потребовать, чтобы переход сигнала из одного слоя в другой выполнялся лишь после того, как в этом слое окажется достаточное число очередных значений сигнала. Ещё лучший эффект сглаживания с минимальным искажением исходного сигнала даёт введение между слоями области неопределённости. При нахождении сигнала в этих областях считается, что его значение остаётся прежним, то есть в том слое, в котором он находился до перехода в область неопределённости.

Суть данного подхода поясняет рис.5, где предполагается, что для подтверждения перехода в другой слой достаточно нахождения в нём трех следующих подряд отсчётов.

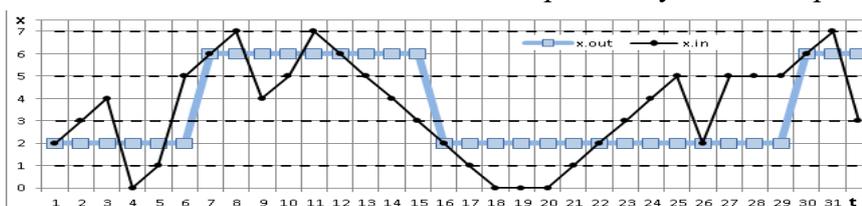


Рис. 5. Повышение эффективности нелинейной фильтрации за счёт введения областей неопределённости ($x=3\dots5$) и накопления трёхкратного подтверждения о необходимости перехода в другую область ($t=6\dots8$; $15\dots17$ и $29\dots31$)

Fig. 5. Increasing the efficiency of nonlinear filtering by introducing areas of uncertainty ($x=3\dots5$) and accumulating triple confirmations about the need to move to another area ($t=6\dots8$; $15\dots17$ and $29\dots31$)

Проведённые исследования показали, что переход к описанным методам сжатия позволяет более чем в 60 раз сократить объем записываемой информации [18].

Вывод. Рассмотренные в работе новые и модификации известных методов и подходов к сжатию измерительной информации показали, что их применение как в части организации хранения данных, так и в части степени сжатия информации, скорости её сжатия и извлечения превосходят известные методы, описанные, например, в работах [19-23]. Данный эффект достигается за счёт того, что перед этапом применения классического RLE – алгоритма и алгоритма записи разностных значений данные предварительно анализируются с целью выбора формата хранения данных, то есть упаковки данных о нескольких отсчётов в целое число байт. При этом дополнительно в поток данных инкапсулируются флаги – признаки, определяющие формат хранения данных.

Однако, наибольший эффект достигается за счёт применения методов сжатия с потерями, когда перед вышеописанным методом сжатия без потерь вводится этап предварительной нелинейной фильтрации, направленной на минимизацию флуктуаций сигнала в пределах младших разрядов цифрового представления результатов наблюдений, за счёт чего прагматическая ценность информации практически полностью сохраняется, но степень сжатия возрастает с 7-10 до 50–60. Ещё одним перспективным направлением является применение для сжатия результатов мониторинга методов, основанных на применении модели E-слоя [24,25] и, в частности, для сжатия данных «на лету» при передаче измерительной информации, как это предлагается в работе [26].

Библиографический список:

1. Контроль температурного режима, контроль температуры//<https://ruglonass.ru/kontrol-temperaturnogo-rezhimana-skladakh.php> (01.06.2023)
2. Всё о сжатии данных, изображений и видео// <https://www.compression.ru/> (01.06.2023)
3. Solomon, D. Data Compression: The Complete Reference: Fourth edition/ David Solomon.- London: Springer, 2007.- 1093p.
4. Хахина А.М. Современные алгоритмы архивации/А.М. Хахина , Н.Ю. Константинов // Заметки ученого - 2020г. №2. - С.189 -192. - <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/704000>
5. Лихтциндер, Б.Я. Адаптивное сжатие измерительных данных в беспроводных сенсорных сетях/Б.Я. Лихтциндер, Ю.О. Бакай // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль - 2021г. №1. - С.52-57 <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/603370>
6. Богачев, И.В. Геометрический подход к сжатию данных телеметрических систем/ И.В.Богачев, А.В. Левенец , Ун Чье Ен// Информатика и системы управления - 2015г. - С.16 -22. - №4 <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/346090>
7. Артюшкин А.Б., М.А. Куксенко, А.П. Пантенков. Экономное кодирование как метод повышения скорости передачи информации в телеметрических системах//Вестник Российского нового университета. Серия Сложные системы модели, анализ и управление.2020г. №1. С.43 -54. - <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/782456>
8. Бакулина, М.П. Эффективное кодирование длин серий при факсимильной передаче данных по сети//Ползуновский вестник 2013г. №2. С.257 -259. <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/405229>
9. Минкин, А. С. Сжатие гиперспектральных данных методом главных компонент/А. С. Минкин, О. В. Николаева, А.А. Руссков// Компьютерная оптика. 2021г. №2. С.235-246. - <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/595721>
10. Ярмоленко, А.С. Применение теории вейвлетов при сжатии и фильтрации геоинформации/А.С. Ярмоленко, О.В. Скобенко//Записки Горного института - 2018г. - С.612 -623. - №234 <https://e.lanbook.com/reader/>

journalArticle/71014

11. Сучкова, Л.И. Масштабируемые программно-технические решения для экологического и технического мониторинга/Сучкова Л.И., Х.М.Хуссейн, М.А. Якунин, А.Г. Якунин// Ползуновский Альманах - 2013г. №1. - С. 75- 82. <https://e.lanbook.com/reader/ journalArticle / 379151>
12. Hussein H.M. Design and implementation of weather and technology process monitoring systems/H.M. Hussein, R.V.Kuntz, L.I. Suchkova, A.G.Yakunin//Известия Алтайского государственного университета, 2013, No. 1-1(77), С. 210-214.
13. Yakunin, A.G. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes/A.G. Yakunin, H.M. Hussein//IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 881 (2017) DOI: 90.1088/1742-6596/881/1/012028
14. Hussein, H.M. Ways for improving methods of data storing in monitoring systems / H.Hussein, L.I. Suchkova, M.A. Yakunin // Ползуновский альманах, № 2.–Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012.– С. 48-50.
15. Hussein, H. M. Data Differencing Method To Optimize Data Storing In Weather Monitoring System / H.M. Hussein A.G. Yakunin // Ползуновский вестник, 2013.- № 2. – С.65-68. URL: https://journal.altstu.ru/media/f/old2/prv2013_02/pdf/065hussein.pdf
16. Мельников Е.М. Исследование эффективности методов сжатия без потерь данных температурного мониторинга / Е.М. Мельников., А.Г. Якунин // Материалы XX Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» - 2019. - Барнаул, АлтГТУ, 2019 г. - С.32-38 <https://elibrary.ru/item.asp?id=41166261>
17. Hussein, H.M. Simple Curve Smoothing Methods For Weather Monitoring System/ H. Hussein, A. Yakunin // Materiali XI Mezinarodni vedecko-practicka conference «Veda a Technologie: krok do budoucnosti-2015», Dil 17. Technicke vedy. - Praha, 2015. - pp. 73-76.
18. Hussein, H. A Comparison of Data Compression Methods for Solving Problems of Temperature Monitoring/H.Hussein , A. Yakunin, L Suchkova// MATEC Web of Conferences, 2016, V. 79(2016). URL: <http://dx.doi.org/ 10.1051/mateconf/20167901076>.
19. Zhen, Ch. Design and Realization of Data Compression in Real-Time Data-base/Ch. Zhen and B. Ren. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, China*, 11 – 13 Dec. 2009; 340-243.
20. Ray G. Data Compression in Databases//Master’s Thesis, Dept. of Computer Science and Automation, Indian Institute of Science, June 1995.
21. Yang, H. On the performance of data compression algorithms based upon string matching/H. Yang// IEEE Transactions on Information Theory, Jan 1998, Vol. 44, Issue 1, pp.47- 65.
22. Lin, M. A New Architecture of a Two-Stage Lossless Data Compression and Decompression Algorithm/M. Lin and Y. Yi Chang//IEEE transactions on VLSI, 2009; 17(19): 1297- 1303.
23. Tamrakar, A A Compression Algorithm for Optimization of Storage Consumption of Non Oracle Database/Abha Tamrakar and V. Vinti Nanda//Research Gate, July 2012, Vol. 1, Issue 5, pp. 39-43.
24. Yakunin, A. Application of the E – layer model for solving the problems of parametric estimation in measuring devices/A. Yakunin , L. Suchkova// MATEC Web of Conferences 155, 01020 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815501020>
25. Suchkova, L.I. Application of E-Regions of the Parameters of the Model Function of the Signal for the Extraordinary Situations Detection/L.I. Suchkova, A.G. Yakunin//in “2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies” (FarEastCon, 3-4 Oct. 2018, Vladivostok, Russia, added to to IEEE Xplore: 07 January 2019), pp.1-6, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602766>, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602766
26. Сулова С.В. Способ выделения тренда нестационарного процесса с адаптацией интервалов аппроксимации/Сулова С.В., Якунин А.Г.//Патент России № 2645273. 2018. Бюл. № 5.

References

1. Temperature control, control of temperature. <https://ruglonass.ru/kontrol- temperaturnogo-rezhima-na-skladakh.php> (01.06.2023) (In Russ)
2. All about data, image and video compression. <https://www.compression.ru/> (01.06.2023) (In Russ)
3. Solomon D. Data Compression: The Complete Reference: Fourth edition/ David Solomon.- London: Springer, 2007;1093.
4. Hahina A.M.: Modern archiving algorithms. Notes of a scientist 2, 189 -192 (2020). - <https://e.lanbook.com/reader/ journalArticle/704000> (In Russ)
5. Lihtsinder B.Ya, Bakai Yu.O.: Adaptive measurement data compression in wireless sensor networks. Measurement. Monitoring. Control. Cheking 1, 52-57 (2021). <https://e.lanbook.com /reader/journalArticle/603370> (In Russ)
6. Bogachev I.V., Levenets A.V. Chie Yen Un: Geometric approach to data compression of telemetry systems. Informatics and control systems 4, 16-22 (2015).<https://e.lanbook.com/ reader/ journalArticle/346090> (In Russ)
7. Artyushkin A.B. Kuksenko M.A., Pantenkov A.P. Economical coding as a method of increasing the speed of information transmission in telemetry systems. Bulletin of the Russian New University. Series Complex Systems Models, Analysis and Control 2020;1:43-54 <https://e.lanbook.com/reader JournalArticle/782456>

8. Bakulina M.P. Efficient coding of run length encoding during facsimile data transmission over the network. Polzunovskiy vestnik 2013;2,257-259 <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/405229> (In Russ)
9. Minkin A.S., Nikolaeva O.V., Russkov A.A.: Compression of Hyperspectral Data by Principal Component Method. Computer optics 2021; 235-246 <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/595721> (In Russ)
10. Yarmolenko A.S., Skobenko O.V.: Application of the theory of wavelets in the compression and filtering of geoinformation. Notes of the Mining Institute 234, 612-623 (2018). <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/71014> (In Russ)
11. Suchkova L.I., Hussein H.M., Yakunin M.A., Yakunin A.G.: Scalable software and hardware solutions for environmental and technical monitoring. Polzunovskiy Almanac 1, 75-82 (2013). <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/379151> (In Russ)
12. Hussein H.M., Kuntz R.V., Suchkova L.I., Yakunin A.G.: Design and implementation of weather and technology process monitoring systems. Herald of the Altai State University 1-1(77), 210-214 (2013).
13. Yakunin A.G., Hussein H.M.: Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes. IOP Conf. Series: Journal of Physics 881 012028 (2017). DOI: 90.1088/1742-6596/881/1/012028
14. Hussein H.M., Suchkova L.I., Yakunin A.G.: Ways for improving methods of data storing in monitoring systems. Polzunovskiy Almanac 2, 2012; 48-50
15. Hussein, H. M., Yakunin A.G.: Data Differencing Method To Optimize Data Storing In Weather Monitoring System. Polzunovskiy Herald 2013; 2:65-68 https://journal.altstu.ru/media/f/old2/pv2013_02/pdf/065hussein.pdf
16. Melnikov E.M., Yakunin A.G.: Investigation of the effectiveness of lossless compression methods for temperature monitoring data. Proceedings of the XX International scientific and technical conference "Measurement, control, informatization" 32-38 (2019). <https://elibrary.ru/item.asp?id=41166261> (In Russ)
17. Hussein H. M., Yakunin A.G.: Simple Curve Smoothing Methods For Weather Monitoring System. Materiali XI Mezinarodni vedecko-practicka conference «Veda a Technologie: krok do budoucnosti-2015», Dil 17. Technické vedy. Praha, 2015; 73-76.
18. Hussein H., Yakunin A., Suchkova L. A Comparison of Data Compression Methods for Solving Problems of Temperature Monitoring. MATEC Web of Conferences, 79 (2016). <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167901076>.
19. Zhen Ch., Ren : Design and Realization of Data Compression in Real-Time Data-base." *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, China, 11 – 13 Dec 2009: 340-243
20. Ray G.: Data Compression in Databases. Master's Thesis, Dept. of Computer Science and Automation, Indian Institute of Science, June (1995).
21. Yang H.: On the performance of data compression algorithms based upon string matching. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1998; 44(1):47- 65.
22. Lin M., Chang Y. Yi: A New Architecture of a Two-Stage Lossless Data Compression and Decompression Algorithm. *IEEE transactions on VLSI* 2009; 17(9): 1297- 1303.
23. Tamrakar A., Nanda V. A Compression Algorithm for Optimization of Storage Consumption of Non Oracle Database 2012; 1(5):39-43.
24. Yakunin A. and Suchkova L. Application of the E – layer model for solving the problems of parametric estimation in measuring devices. MATEC Web of Conferences 155, 01020 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815501020>
25. Suchkova L.I., Yakunin A.G.: Application of E-Regions of the Parameters of the Model Function of the Signal for the Extraordinary Situations Detection. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon, 3-4 Oct. 2018). *IEEE Xplore* 1-6 (2019), URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602766>, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602766
26. Suslova S.V., Yakunin A.G. A method for extracting a trend of a non-stationary process with adaptation of approximation intervals. Patent of Russia № 2645273. 2018; 5 (In Russ)

Сведения об авторе:

Якунин Алексей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, вычислительной техники и информационной безопасности; almpas@list.ru,

Information about the author:

Aleksey G. Yakunin. Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Informatics, Computer engineering and Information security; almpas@list.ru,

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 18.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.08.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 20.08.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004. 0567



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171

Обзорная статья / Review article

Алгоритмизация расчета оценки защищенности операционных систем АИС органов внутренних дел, разработанного на основе анализа требований безопасности

ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз

А.И. Янгиров¹, Е.А. Рогозин², О.И. Бокова³, С.Б. Ахлюстин⁴

¹ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

¹111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

^{2,4}Воронежский институт МВД России,

^{2,4} 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия,

³ООО «Каскад»,

³109444, г. Москва, ул. Ферганская, д. 2, к. 2, оф. 7, Россия

Резюме. Цель. В статье проводится обобщенная алгоритмизация процессов, необходимых для разработки программного обеспечения для оценки защищенности операционных систем автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации.

Метод. Исследование проведено на основе метода анализа возможных угроз безопасности операционных систем, а также требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408. **Результат.** Результатом работы автоматизированной системы расчета показателя защищенности анализируемой ОС является один из заданных критериев показателей степени защищенности ОС. Путем сравнения полученного показателя выдается соответствующий результат **Вывод.** Авторами дана обобщенная алгоритмизация процессов, необходимых для разработки программного обеспечения для оценки защищенности ОС АИС ОВД РФ.

Ключевые слова: оценка защищенности, функциональные требования безопасности, банк данных угроз безопасности информации, политика безопасности, показателя защищенности, операционная система, автоматизированная система расчета, программное обеспечение.

Для цитирования: А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, О.И. Бокова, С.Б. Ахлюстин. Алгоритмизация расчета оценки защищенности операционных систем АИС ОВД, разработанного на основе анализа требований безопасности ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 167-171. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171

Algorithmization for calculating the security assessment of AIS operating systems of internal affairs bodies, developed on the basis of an analysis of security requirements

GOST R ISO/IEC 15408 and possible threats

A.I. Yangirov¹, E.A. Rogozin², O.I. Bokova³, S.B. Akhlyustin⁴

¹FKU “Research Center “Protection” of the Russian Guard,

¹12B Reutovskaya Str., Moscow 111539, Russia,

^{2,4}Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

^{2,4} 53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia,

³ООО “Cascade”,

³2 Ferghanskaya St., room 2, of. 7, Moscow 109444, Russia

Abstract. Objective. The article provides a generalized algorithmization of the processes necessary for developing software for assessing the security of operating systems of automated information systems of internal affairs bodies of the Russian Federation. **Method.** The research was carried out based on the method of analyzing possible threats to the security of operating systems, as well as the requirements of the GOST R ISO/IEC 15408 standard. **Result.** The result of the automated system for calculating the

security indicator of the analyzed OS is one of the specified criteria for indicators of the degree of security of the OS. By comparing the obtained indicator, the corresponding result is output. **Conclusion.** The authors provide a generalized algorithmization of the processes necessary for developing software for assessing the security of the AIS OS of the Russian Federation ATS.

Keywords: security assessment, functional security requirements, data bank of information security threats, security policy, security indicators, operating system, automated calculation system, software.

For citation: A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, O.I. Bokova, S.B. Akhlyustin. Algorithmization for calculating the security assessment of AIS operating systems of internal affairs bodies, developed on the basis of an analysis of security requirements GOST R ISO/IEC 15408 and possible threats. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 167-171. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171

Введение. В настоящей работе проводится обобщенное описание алгоритма оценки защищенности операционных систем (далее - ОС) АИС ОВД РФ, реализованного в специальном программном обеспечении, ранее представленного в статье, посвященной разработке автоматизированной системы расчета оценки защищенности операционных систем информационных систем на основе анализа требований безопасности [1,4].

Постановка задачи. Процесс алгоритмизации необходим для построения алгоритма решения задачи, результатом которого является выделение этапов процесса обработки данных, формальная запись содержания этих этапов и определение порядка их выполнения [2,5-7].

Методы исследования. Обобщенная алгоритмизация процессов, проводимых в данном расчете, представляется в формате блок-схем соответствующих этапов методики. Данный формат был предопределен возможностью графического представления алгоритма расчета для обеспечения наглядности последовательности действий.

На основе автоматизированной системы расчета оценки защищенности ОС АИС ОВД, а также соответствующей методики оценки защищенности ОС, основанную на анализе требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз ОС, описание основных этапов работы программного обеспечения [3].

Под ОС АИС ОВД понимаются операционные системы, предназначенные для применения на автоматизированных рабочих местах информационных систем, используемых в ОВД. В соответствии с разработанной методикой оценки защищенности ОС АИС ОВД определяющими критериями защищенности ОС являются перечень угроз, выбранных из банка данных угроз безопасности информации, разработанного ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России», а также разработанные в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 требования, предъявляемые к ОС [3].

Обсуждение результатов. В процесс оценки защищенности ОС АИС ОВД включены три этапа, в которые входят: ранжирование и выборка угроз, проверка соответствия требований безопасности в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, политик и целей безопасности в соответствии с выбранным эталонным профилем защиты, а также расчет показателя защищенности анализируемой ОС. В обобщенном представлении процесс оценки защищенности ОС АИС ОВД, реализованный в специальном программном обеспечении может быть изображен в следующем виде (рис.1). В блоке входных данных для оценки защищенности ОС АИС ОВД после произведенной выборки необходимых элементов экспертом по безопасности программой формируется специальный класс «Data», в который входят необходимые требования безопасности, а также перечень возможных угроз, способных воздействовать на ОС. После ввода входных данных программой автоматически производится расчет коэффициента угроз ОС на основе перечня возможных угроз. Алгоритм расчета коэффициента угроз ОС «К» представлен на рис. 2.

Далее производится расчет соответствия совпадения требований, реализованных в оцениваемой ОС, с эталонной ОС.

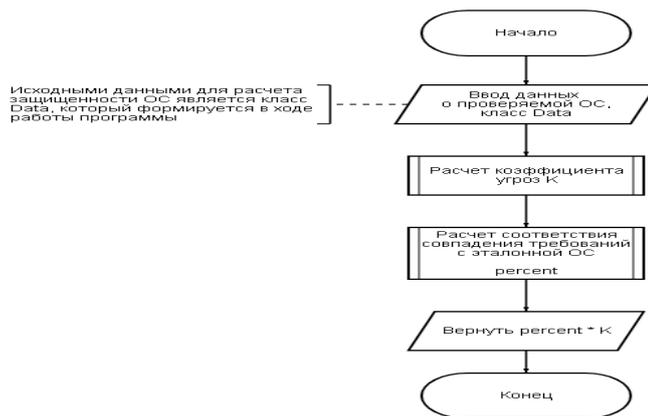


Рис. 1. Обобщенный процесс оценки защищенности ОС АИС ОВД
 Fig. 1. Generalized process for assessing the security of the AIS ATS OS

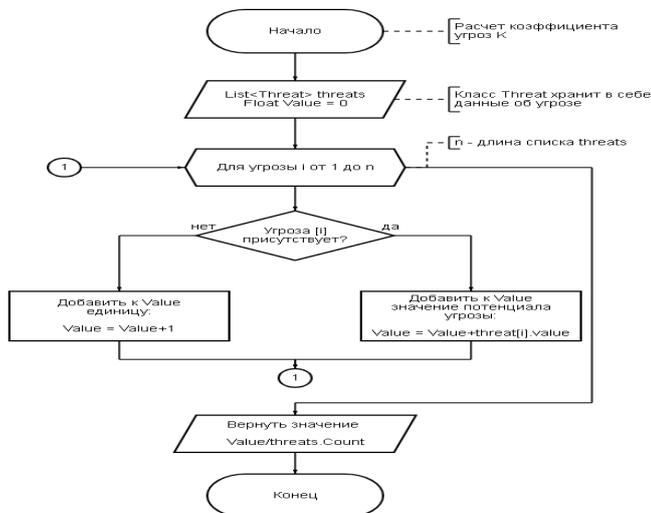


Рис. 2. Алгоритм расчета коэффициента угроз ОС
 Fig. 2. Algorithm for calculating the OS threat coefficient

На рис. 3 представлен алгоритм расчета процента соответствия оцениваемой ОС к эталонной ОС.

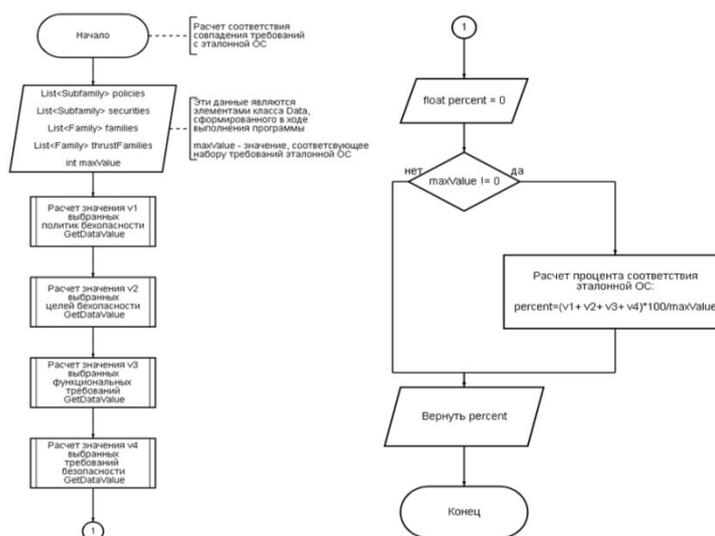


Рис. 3. Алгоритм расчета процента соответствия оцениваемой ОС к эталонной ОС
 Fig. 3. Algorithm for calculating the percentage of compliance of the evaluated OS with the reference OS

Стоит отметить, что архитектура программного обеспечения построена на объектно-ориентированном подходе, что отражается в построении классов требований к ОС на основе

абстрактного класса информации «Dataset». Это позволяет универсализировать функцию расчета значений необходимых требований безопасности ОС, в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, а также необходимых политик и целей безопасности соответствующего профиля защиты в функцию «GetDataValue» (рис. 4).

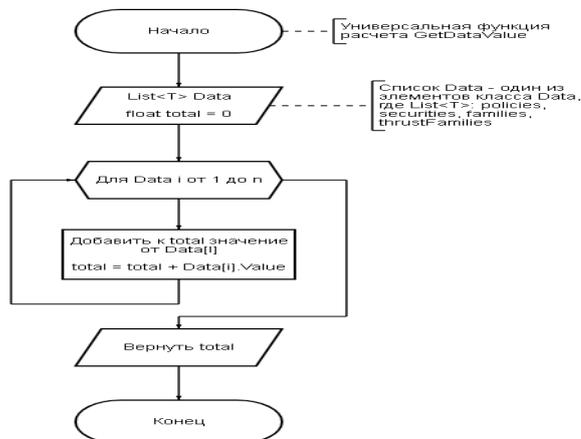


Рис. 4. Алгоритм универсальной функции «GetDataValue»
Fig. 4. Algorithm of the universal function “GetDataValue”

Выходным значением процесса работы алгоритмов, изображенных на рис.3-4, является показатель соответствия, представленный в процентном формате «Percent». В заключительном этапе полученный процент соответствия «Percent» корректируется с учетом коэффициента угроз «К» путем произведения данных показателей. Оценка полученного показателя защищенности ОС производится в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Определение степени защищенности ОС
Table 1. Determining the degree of OS security

Показатель защищенности ОС OS security indicator	Степень защищенности ОС OS security level
$Q_{\text{защ}} < 80\%$	Низкая/Low
$80\% \leq Q_{\text{защ}} \leq 90\%$	Средняя/ Average
$Q_{\text{защ}} > 90\%$	Высокая/High

Результатом работы автоматизированной системы расчета показателя защищенности анализируемой ОС является один из заданных критериев показателей степени защищенности ОС. Путем сравнения полученного показателя выдается соответствующий результат (рис. 5).

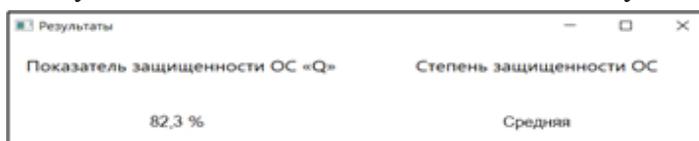


Рис. 5. Результат работы программного обеспечения, предназначенного для оценки защищенности ОС

Fig. 5. The result of the software,designed to assess OS security

Вывод. В статье приводится обобщенная алгоритмизация процессов, необходимых для разработки программного обеспечения для оценки защищенности ОС АИС ОВД РФ, разрабатываемого на основе метода анализа возможных угроз безопасности операционных систем, а также требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408.

Изложенный материал не претендует на полноту охвата всех процессов, реализованных в программном обеспечении, однако его вполне достаточно для того, чтобы разобраться и выполнить ту часть названных работ, которая необходима для составления алгоритмов и их описания.

Библиографический список:

1. Банк данных угроз безопасности информации – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Дата обращения: 27.07.2022).

2. Metody i sredstva analiza i otsenki zashchishchennosti avtomatizirovannykh sistem spetsial'nogo naznacheniya na osnove trebovaniy k bezopasnosti po GOST R ISO/МЕК 15408-2-2013: monografiya/ I.G. Drovnikova, E.A. Rogozin [i dr.]. – Voronezh: VUNTs VVS «VVA», 2020. – 96 s.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2002. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Требования доверия к безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101777> (Дата обращения: 27.07.2022).
4. А.И. Мифтахова, Э.И. Янгиров, Е.И. Карасева, А.И. Янгиров, Е.Ю. Никулина, И.Г.Дровникова Разработка программно-технического решения для выявления трендов спроса на товары. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):114-122.
5. Методика оценки угроз безопасности информации: Методический документ ФСТЭК России от 05.02.2021 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 27.10.2022).
6. Банк данных угроз безопасности информации: [Электронный ресурс]. ФСТЭК России. URL: <https://bdu.fstec.ru/>. (Дата обращения: 27.10.2022).
7. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения.

References

1. Bank dannykh ugroz bezopasnosti informatsii – [Elektronnyi resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Data obrashcheniya: 27.07.2022).
2. Методы и средства анализа и оценки защищенности автоматизированных систем специального назначения на основе требований к безопасности по ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013: монография / И.Г. Дровникова, Е.А. Рогозин [и др.]. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. – 96 с.
3. GOST R ISO/МЕК 15408-3-2002. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologii. Chast' 3. Trebovaniya doveriya k bezopasnosti [Elektronnyi resurs] – Rezhim dostupa. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101777> (Data obrashcheniya: 27.07.2022).
4. A.I. Miftakhova, E.I. Yangirov, E.I. Karaseva, A.I. Yangirov, E.Yu. Nikulina, I.G. Drovnikova. Development of a software and hardware solution to identify trends in demand for goods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):114-122.
5. Methodology for assessing threats to information security: Methodological document of the FSTEC of Russia dated 02/05/2021 // Information and legal portal of the ConsultantPlus system. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of access: 10/27/2022). FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions. (In Russ)
6. Data bank of information security threats: [Electronic resource]. FSTEC of Russia. URL: <https://bdu.fstec.ru/>. (Date of access: 27.10.2022). (In Russ)
7. FSTEC RF. Management document. Protection against unauthorized access to information. Terms and Definitions.

Сведения об авторах:

Янгиров Адиль Илдарович, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; adil-yan@yandex.ru

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

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

Ахлюстин Сергей Борисович, кандидат технических наук, начальник кафедры тактико-специальной подготовки; serg7676@yandex.ru

Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing Department; adil-yan@yandex.ru

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

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

Sergey B. Akhlyustin, Cand. Sci. (Eng), Head of the Department of Tactical and Special Training; serg7676@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.09.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.09.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 10.09.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.953

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-172-180



Оригинальная статья /Original article

**Конструктивные решения крупнотоннажных резервуаров
для хранения сжиженных природных газов**

Э.Р. Бареева

Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, стр. 16/1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является поиск перспективы развития отечественных крупнотоннажных изотермических хранилищ СПГ, для удовлетворения требуемого объема экспортных поставок РФ. **Метод.** В ходе исследования использованы современные методы проектирование, анализа материалов и конструкций. **Результат.** Представлены виды сечений и узлы сопряжения элементов. Излагается общестроительное проектирование и конструирование внешнего железобетонного резервуара с учётом соответствующих присоединений к фундаменту и внутреннему резервуару, внутреннего резервуара, вторичного дна, пароизоляции, системы термозащиты, купольной крыши, подвесного перекрытия, а также системы термоизоляции резервуара. Для обеспечения более высоких эксплуатационных характеристик сооружения рекомендован класс бетона по прочности для плиты основания и кровельного перекрытия и стен, а также термоизоляционный материал. Определены требования к конструкциям и материалам защитных ограждений крупнотоннажных изотермических хранилищ СПГ. **Вывод.** Определена системная взаимосвязь между всеми компонентами специальных строительных конструкций, строительных и теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: строительство крупнотоннажных резервуаров, сжиженный природный газ, надземные изотермические двухбололочные резервуары, класс бетона, система термоизоляции, конструктивное решение и армирование внешнего резервуара, конструирование внутреннего резервуара, сферическая крыша.

Для цитирования: Э.Р. Бареева. Конструктивные решения крупнотоннажных резервуаров для хранения сжиженных природных газов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 172-180. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-172-180

Design solutions of large-capacity storage tanks for liquefied natural gases

E.R. Bareeva

Astrakhan State Technical University,
16/1 building Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to find prospects for the development of domestic large-scale isothermal LNG storage facilities to meet the required volume of export supplies from the Russian Federation. **Method.** During the study, modern methods of design, analysis of materials and structures were used. **Result.** Types of sections and joints of elements are presented. The general construction design and construction of an external reinforced concrete tank is described, taking into account the corresponding connections to the foundation and internal tank, internal tank, secondary bottom, vapor barrier, thermal protection system, domed roof, suspended ceiling, as well as the thermal insulation system of the tank. To ensure higher performance characteristics of the structure, a concrete strength class is recommended for the base slab and roofing slab and walls, as well as thermal insulation material. Requirements for the designs and materials of protective fences for large-capacity isothermal LNG storage facilities

have been determined. **Conclusion.** The systemic relationship between all components of special building structures, building and thermal insulation materials has been determined.

Keywords: construction of large-capacity tanks, liquefied natural gas, above-ground isothermal double-shell tanks, concrete class, thermal insulation system, design solution and reinforcement of the external tank, design of the internal tank, spherical roof.

For citation: E.R. Bareeva. Design solutions of large-capacity storage tanks for liquefied natural gases. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 172-180. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-172-180

Введение. Необходимость газоснабжения труднодоступных и удаленных районов нашей страны, изменения международной обстановки, сокращение трубопроводных поставок газа вызвало необходимость более активного внедрения технологий сжиженного природного газа (далее СПГ). Российская Федерация является одним из крупных производителей и экспортеров СПГ в мире. В апреле 2020 года Правительством Российской Федерации была утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года». В стратегии обозначены задачи газовой отрасли, в число которых входит развитие производства и потребления СПГ, вхождение в среднесрочной перспективе Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Планируемые объемы производства СПГ в России должны обеспечить долю на мировом рынке, пропорциональную его доли в мировых запасах газа [1].

Постановка задачи. С целью достижения максимального экономического эффекта при экспортных поставках необходимо реализовать высокотехнологичные крупнотоннажные комплексы по сжижению, выдаче и приему СПГ. Самым эффективным способом хранения СПГ при крупнотоннажном производстве являются надземные изотермические резервуары объемом больше 100000м³.

Методы исследования. В России вопросы проектирования резервуаров для хранения СПГ регламентируются СП 495.1325800.2020 «Резервуары изотермические для хранения сжиженных газов. Правила проектирования». Настоящие правила распространяются на проектирование конструкций изотермических стальных вертикальных резервуаров для хранения сжиженных газов при температурах до минус 165°С и давлении, близком к атмосферному, в наземном или подземном исполнении объемом менее 60000 м³ [2]. Учитывая то, что ранее крупнотоннажные резервуары СПГ в России практически не строились, отечественные нормы проектирования, строительства и эксплуатации таких сооружений отсутствуют. При проектировании крупногабаритных резервуаров для хранения СПГ в качестве основных нормативных документов используются Европейские стандарты EN 1992-1-1 и 14620-3-2006.

Конструктивные решения крупнотоннажных резервуаров СПГ, которые являются хранилищами больших объемов пожаровзрывоопасного продукта, должны обеспечивать полную герметизацию, исключая выход продукта в окружающую среду, предотвращение экологической катастрофы. Наиболее безопасными являются изотермические двухоболочечные резервуары, конструктивное решение которых можно сравнить с «матрешкой», состоящей из первичного и вторичного контейнеров, которые вместе образуют единый резервуар-хранилище (рис. 1).

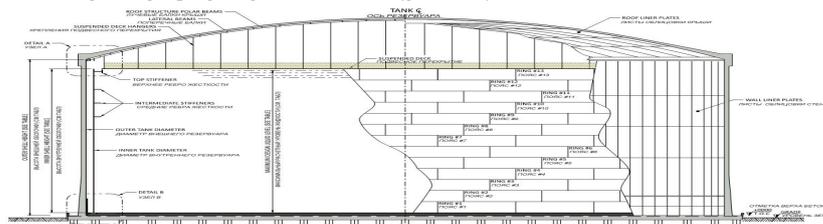


Рис. 1 Общий вид резервуара
Fig. 1 General view of the tank

Первичный контейнер - «внутренняя емкость» - представляет собой свободностоящий резервуар с одинарной стальной обечайкой, внутри которого хранится жидкий продукт, и подвесным перекрытием. Внутренний резервуар представляет собой обычный резервуар для хранения жидкости, имеет цилиндрическую форму с открытым верхом, изготовлен из стали с 9% содержанием никеля, и отвечает требованиям по низкотемпературной пластичности и ударопрочности. Конфигурация внутреннего резервуара позволяет обеспечить номинальный запас рабочей высоты до верхней части внутреннего резервуара, чтобы избежать утечки СПГ в межстенное пространство.

Вторичный контейнер - «наружная емкость» - представляет собой свободностоящий цилиндрический железобетонный резервуар, оснащенный купольной крышей. Внешний бетонный резервуар удерживает жидкость в случае выхода из строя внутреннего резервуара. Внешний бетонный резервуар облицован листами из углеродистой стали для обеспечения пароизоляции при нормальном режиме эксплуатации. В случае выхода из строя внутреннего резервуара СПГ удерживается бетонным резервуаром, который рассчитан на удерживание гидростатического давления в сочетании со значительным перепадом температур, вызванным разливом. Как внутренний, так и внешний резервуар выдерживают сейсмические нагрузки.

Основными компонентами конструкции крупнотоннажных резервуаров для хранения СПГ являются: несущая плита основания на железобетонных сваях с обогревом основания; наружные стены с предварительным напряжением в горизонтальном и вертикальном направлениях; сферическое купольное перекрытие; термоизоляция плиты основания, стен и подвесного перекрытия; внутренняя стальная емкость; подвесное перекрытие, закрепленное на купольном перекрытии; кровельная платформа (металлоконструкции) и оборудование (насосы, трубопровод и т.д.).

Система термоизоляции крупнотоннажного резервуара представляет собой смесь из несущего пеностекла, порошка перлита и покрытия из стекловолокна, в зависимости от места расположения и потенциальной утечки тепла. Купольная крыша внешнего резервуара состоит из железобетонного купола, облицованного листами из углеродистой стали. Подвесное алюминиевое перекрытие подвешивается с внутренней стороны внешней крыши для поддержки термоизоляции крыши во внутреннем резервуаре с открытым верхом.

Одним из примеров проектирования и строительства такого объекта является комплекс по переработке этансодержащего газа и производству СПГ в районе Усть-Луги в рамках проекта «Балтийский СПГ». Введение в эксплуатацию данного проекта позволит нарастить российский экспорт сжиженных газов в количестве 13 млн тонн [3]. Основываясь на мировом опыте, для хранения СПГ при крупнотоннажном производстве на комплексе запроектирован двухоболочечный резервуар закрытого типа емкостью 240 000 м³. Резервуар такого объема для хранения СПГ будет впервые построен в России и является крупнейшим в мире. Фундаменты под наружной емкостью запроектированы в виде 671 буронабивной бетонной сваи (рис. 2) диаметром 1,0 м глубиной ~37,0 м по всей площади резервуара. Сваи соединены с несущей плитой основания.

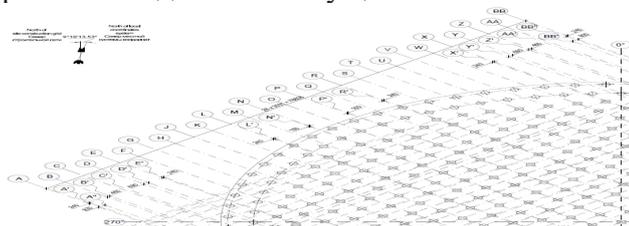


Рис. 2 Схема расположения свай

Fig. 2 Pile layout

Плита основания круглой формы без предварительного напряжения выполнена из железобетона и имеет диаметр 93,2 м и равномерную по всей площади толщину 1,25 м. Под плиту основания между сваями укладывается 100 мм подложка из тощей бетонной смеси. Несущая плита основания выполняется с трубопроводом отопления и использованием инклинометра. Для отвода дождевых стоков при производстве строительных работ предусматриваются временные водосточные трубы. Эти трубы должны быть

Таблица 1. Класс бетона, нормативная прочность и класс окружающей среды
Table 1. Concrete class, standard strength and environmental class

Компонент конструкции Design component	Класс бетона по прочности Concrete strength class	Цилиндрическая прочность f_{ck} [МН/м ² = МПа] Cylindrical strength	Кубиковая прочность f_{ck} [МН/м ² = МПа] Cube strength	Класс условий эксплуатации Operating environment class
Сваи / Piles	C32/40	32,0	40,0 (B40)	XC4, XS3, XA2
Плита основания / Base plate	C40/50	40,0	50,0 (B50)	XC4, XS1, (XF1)
Стена, вкл. упоры / Wall incl. stops	C40/50	40,0	50,0 (B50)	XC4, XS1, (XF1)
Купольное перекрытие / Dome ceiling	C40/50	40,0	50,0 (B50)	XC4, XS1, (XF1)
Внутренняя кольцевая балка / Inner ring beam	C40/50	40,0	50,0 (B50)	XC1, X0
Выравнивающие слои / Leveling layers	C20/25	20,0	25,0 (B25)	XC1, X0

Связь между классом условий эксплуатации и соответствующей ему минимальному классу по прочности бетона указаны в стандарте EN 1992-1-1, Приложение Е, таб. Е.1N: Индикативные классы прочности:

Минимальный класс прочности для X0 – C12/15

Минимальный класс прочности для XC3 и XC4 – C30/37

Минимальный класс прочности для XS1 – C30/37

Минимальный класс прочности для XF1 и XF3 – C30/37

Класс условий эксплуатации с учетом условий окружающей среды соответствует стандарту EN 1992-1-1. Основной класс конструкции для расчетного срока службы 50 лет - S4, принимается в соответствии со стандартом EN1992-1-1, 4.4.1.2 .

Защитный слой бетона определяется в соответствии с разделом 4 стандарта EN1992-1-1 «Долговечность и защитный слой для арматуры».

Выбранная толщина защитного бетонного слоя превышает минимальные значения:

армированный и преднапряженный бетон (внутренние и наружные поверхности емкости): 50 мм; армированные сваи: 75 мм. Для предварительного напряжения железобетонной стены используются семипроволочные арматурные тросы диаметром 15,7 мм (0.62”) как для горизонтального, так и вертикального напряжения. Горизонтальная система включает в себя 27 арматурных прядей, вертикальная система - 19 арматурных прядей на напрягаемый элемент. В соответствии с приложением С стандарта EN 1992-1-1, для нормального армирования всего железобетонного резервуара используется арматурная сталь марки B500B. Для внутренней поверхности железобетонной стены, арматуры стен для восприятия напряжений сдвига, а также для армирования внутренней кольцевой балки, принимается сталь, предназначенная для эксплуатации при температуре - 165 °С. Критерии определены стандартом EN 14620-3, разделом 6.3.2. и приложением А.

Для защиты горизонтальных и вертикальных напрягаемых элементов, как правило, используются полужесткие каналы (гофрированные металлические каналы с гальванизированным покрытием). Такие каналы обеспечивают вторичную защиту от коррозии, в то время как первичная защита от коррозии обеспечивается щелочными свойствами цементного раствора и бетона. Горизонтальные напрягаемые элементы располагаются на 180° по периметру резервуара, поэтому для формирования полного кольца необходимы два напрягаемых элемента.

Соседние кольца располагаются в шахматном порядке шагом в 90° по отношению друг к другу, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки в стене резервуара (рис. 4). Вертикальные напрягаемые элементы выполнены в виде прямых элементов и проходят от верхней части стены до плиты основания. Они оборудованы либо тяговым анкером в верхней части стены и U-образными петлями у плиты основания, либо в виде сквозных элементов с тяговым анкером в верхней части стены и глухим анкером в плите основания.

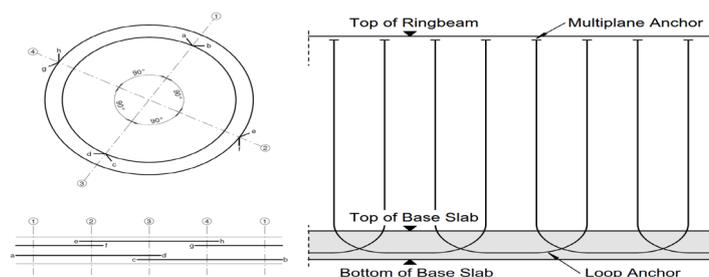


Рис. 4. Схема расположения горизонтальных и вертикальных напрягаемых элементов

Fig. 4. Layout of horizontal and vertical prestressing elements

Напряжение элементов выполняется только после достижения бетоном требуемых и заданных показателей прочности. Когда бетон достигает требуемой прочности, арматура натягивается на анкеры. Такую систему иногда называют «натяжением на бетон». Напряжение элементов выполняется при помощи гидравлического домкрата. Натяжение горизонтальных напрягаемых элементов выполняется с обоих концов таким образом, чтобы натяжение с обоих концов должно быть примерно одинаковое. В отдельных случаях допускается натяжение с одного конца, например, для испытания трением. Натяжение вертикальных напрягаемых элементов с обоих концов выполняется сверху и одновременно в случае использования решения с U-образными петлями. После успешного завершения процесса напряжения и приемки актов предварительного напряжения конструкций, арматурные пряди обрезаются и напрягаемые элементы заливаются цементным раствором для их сцепления с бетонной конструкцией.

Внутренний резервуар – это вертикальная цилиндрическая конструкция с плоским дном, без крыши. Днище внутреннего резервуара выполняется из плоских листов, расположенных внутри кольца из кольцевых окраек, уложенных на фундамент с термоизоляцией. Оно располагается над несущей термоизоляцией днища внешнего резервуара. Внутренние стенки и кольцевые окрайки поддерживаются бетонной кольцевой балкой, распределяющей нагрузку на термоизоляцию. Материалы, минимальная толщина и ширина кольцевых окраек и нижних листов резервуара должны соответствовать расчетным требованиям EN 14620-2.

Вертикальная цилиндрическая оболочка изготавливается из изогнутых листовых секций, устанавливаемых слоями или рядами. Первый ряд устанавливается на листах кольцевых окраек на дне резервуара. Листы оболочки собираются таким образом, чтобы обеспечить расчетный диаметр и, следовательно, вместимость резервуара под заданную высоту продукта. Листы укладываются по центру, их длина должна быть одинаковой, с учетом требования к временным проемам для доступа во внутренний резервуар и для установки внутреннего оборудования.

Размер резервуара и уровни продукта устанавливаются на основе требований по максимальной вместимости жидкости, равной 240 000 м³. Оболочка проектируется на максимальную высоту продукта, определяемую по расчетам емкости, и на условия гидроиспытаний, при которых масса воды в 1,25 раза превышает массу продукта. Методика расчета определяет толщину листов на высоту оболочки, количество рядов, конструктивную устойчивость и условия испытания. Это позволяет определить требования к ребрам жесткости резервуара и их расположению. Межстенное пространство между резервуарами заполняется перлитом в качестве термоизоляционного материала, что оказывает давление на внутренний резервуар. Исходя из общего давления на оболочку, требуется установка ребер жесткости для сопротивления воздействующей нагрузке и сохранения круглой формы резервуара. Вторичное днище, выполненное из стали с 9% содержанием никеля, устанавливается и соединяется с окружной стальной стенкой на уровне 5,0 м над верхом бетонной плиты. Оно располагается над системой термоизоляции днища и аналогично днищу внутреннего резервуара, как в части конструкции, так и в части материала изготовления (рис. 5).

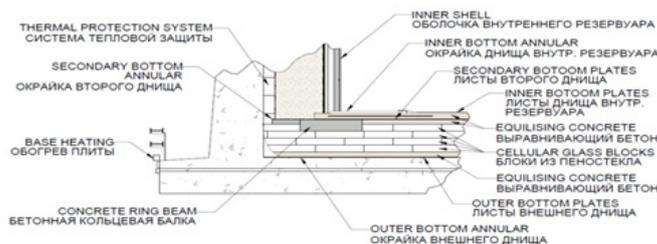


Рис. 5. Система термоизоляции дна резервуара

Fig. 5. Tank bottom thermal insulation system

К кольцевым крайкам приваривается ряд облицовочных листов, смещенных относительно внешней обшивки резервуара, а образовавшиеся пустоты заполняются изоляцией из пеностекляных блоков. Толщина кольцевых окраек должна быть минимум 8 мм согласно EN 14620-2 5.2.1.1.1.

СПГ необходимо хранить в течение длительного периода времени при температуре точки кипения или ниже. Процесс «выкипания», переход из жидкости в газ, автоматически означает значительное поглощение энергии для поддержания продукта в жидком состоянии. Чтобы уменьшить скорость «выкипания», крупногабаритные резервуары проектируются с такой схемой термоизоляции, которая минимизирует потери продукта. Термоизоляция дна резервуара необходима для защиты фундамента от криогенных температур. Все конструктивные элементы резервуара способствуют термоизоляции и защите продукта. Система термоизоляции состоит из следующих основных компонентов:

1. Термоизоляция дна выполнена из пеностекляных блоков и выравнивающего слоя бетона, входящих в систему теплозащиты угловых зон.
2. Термоизоляция стен выполняется из упругого мата и порошокый материал из вспученного перлита, укладываемых в межстенное пространство между внешним и внутренним резервуарами.
3. Термоизоляция перекрытия выполнена из стекловолоконных матов, закрепленных в верхней части подвесного перекрытия.

Облицовка внешней стенки резервуара изготавливается из марганцево-углеродистой стали. Облицовочные листы из углеродистой стали, находящиеся в непосредственном контакте с бетонной плитой, стенкой и крышей обеспечивают паронепроницаемый барьер. Облицовочные листы крепятся к арматуре, монтируемой в бетонную стену во время строительства. Листы укладываются ряд за рядом, формируя нужную высоту оболочки, также учитывается крепление уплотняющего кольца и элементы конструкции крыши.

Толщина листов рассчитывается таким образом, чтобы при простой нагрузке в виде давления пара и давления перлита сохранялась целостность конструкции. Все нагрузки передаются на бетон.

Облицовка дна внешнего резервуара располагается ниже термоизоляции дна и выше бетона фундамента. Она изготавливается из того же материала, что и облицовка внешней оболочки, и таким же образом, что и дна внутреннего резервуара.

Термоизоляция крыши над внутренним резервуаром поддерживается подвесным перекрытием. Подвесное перекрытие изготавливается из сваренных вместе алюминиевых пластин и поддерживается подвесными узлами, которые крепятся к лучевым балкам крыши. Чтобы избежать проникновения изоляционного материала, подвесное перекрытие герметично соединяется с внутренним резервуаром при помощи воздухопроницаемой мембраны из стекловолокна. Аналитики из Института энергетических исследований Российской академии наук и Центра энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО в прогнозе развития энергетики мира и России оценивают потребление газа в 2030 году в 4,6 трлн куб. м, в 2040 году — 5,1 трлн кубометров (рис. 6). Региональный

рост потребления ожидается в государствах Азиатско-Тихоокеанского региона в 1,6 раза к 2030 году по сравнению с 2018 годом, а в странах Африки 2050 году — в 2,8 раза [4]. Планируется что развитие производства СПГ до 140 млн т должно привести к росту его экспорта в период до 2030 года на сумму порядка \$150 млрд в ценах 2019 года и обеспечит не менее \$150 млрд инвестиций в российскую экономику. Ожидается, что прогнозный спрос на сжиженный природный газ превысит производство к 2027 году.

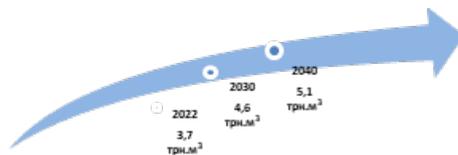


Рис. 6. Прогноз потребления газа в период 2022-2040 г.г.

Fig. 6. Forecast of gas consumption for the period 2022-2040

Потенциальными точками крупнотоннажного производства сжиженного природного газа с учетом логистической доступности газозовозов являются месторождения полуостровов Ямал и Гыдан, а также север Красноярского края, побережье Дальнего Востока (включая Сахалин), побережье Балтийского моря, а также шельфовые проекты (включая побережья Охотского моря и Северного Ледовитого океана). Сейчас в РФ идет непрерывное возведение заводов СПГ вблизи морских газовых месторождений. Создаются гигантские кластеры по его добыче, очищению, сжижению и транспортировке. Нарастить мощность как минимум до 46 млн. тонн к 2025 году, возможно только при вводе в эксплуатацию крупнотоннажных заводов таких как «Арктик СПГ-2» (плавучие платформы на полуострове Гыдан) и «Балтийский СПГ» (в Усть-Луге) [5].

Для поддержки крупнотоннажных проектов производства СПГ применяются широкие меры государственной поддержки, включая специальные налоговые режимы, Соглашения о разделе продукции, государственные займы и инвестиции в объекты инфраструктуры [6].

Вывод. Возведение крупнотоннажных резервуаров для хранения СПГ является актуальным вопросом на долгую перспективу.

Для эффективного проектирования, выбора конструктивных решений, строительства и эксплуатации таких объектов необходимо:

- разработать отечественную нормативную базу проектирования, строительства и эксплуатации изотермических стальных вертикальных резервуаров для хранения - СПГ при криогенных температурах и давлении, близком к атмосферному, в наземном или подземном исполнении объемом 100000 м³ и более;
- разработать отечественное программное обеспечение для анализа больших и сложных конструкций для использования при проектировании резервуаров СПГ;
- определить порядок размещения крупнотоннажных изотермических хранилищ на территории комплекса СПГ в зоне хранения в соответствии требованиям безопасности, предъявляемым на законодательном уровне в РФ;
- определить требования к конструкциям и материалам защитных ограждений крупнотоннажных изотермических хранилищ СПГ;
- разработать комплекс мероприятий для снижения уровня техногенных рисков при разливе СПГ из крупнотоннажных изотермических резервуаров, аварийных ситуаций от воздействия внешних источников, недопустимых деформаций;
- сформировать комплекс мер по защите персонала и технических средств объектов, населения прилегающих территорий, снижения социального ущерба на всех этапах развития аварии на крупнотоннажных изотермических хранилищ СПГ.

Рассмотренные конструктивные решения крупнотоннажных резервуаров СПГ, позволят обеспечить полную герметизацию пожаровзрывоопасного продукта, обеспечивая безопасную, длительную, безаварийную работу предприятий газодобывающей отрасли.

Библиографический список:

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утверждена и введена в действие Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09 июня 2020г. N 1523-р // Правительство России: [сайт]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 29.03.2023)
2. СП 495.1325800.2020. Резервуары изотермические для хранения сжиженных газов. Правила проектирования: свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. N 916 /пр :дата введения 2021-01-06 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»: [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/603121179> (дата обращения: 29.03.2023)
3. Определение оптимальной толщины теплоизоляционного слоя резервуара для хранения СПГ при крупнотоннажном производстве / Шестаков Р.А., Резанов К.С., Назарова А.И.// Деловой журнал Neftegaz.RU.2022. –№ 9 (129).С.42–47.URL: https://magazine.neftegaz.ru/upload/iblock/a56/fnnrqfufynmp1t3vnb5wsvbfnbapzh0q/NeftegazRU_09_2022.pdf (дата обращения: 29.03.2023)
4. Пимонов В. Российский СПГ нацелен на лидерство// Журнал ТЭК России. – 2021. –№ 5 . – URL: и https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2021/5/901/ д(ата обращения: 29.03.2023)
5. Приказ «Об утверждении свода правил «Резервуары изотермические для хранения сжиженных газов. Правила проектирования», №916, от 30 декабря 2020 года.
6. Карта российской СПГ отрасли 2021 / Союз организаций нефтегазовой отрасли «Российское газовое общество» [сайт]. – URL: <https://gazo.ru/upload/iblock/da1/da153d043ef74dcda8d1cc34bf2c1345.pdf> (дата обращения: 29.03.2023)

References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035: approved and put into effect by Order of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020. N 1523-r // Government of Russia: [website]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (access date: 03/29/2023) (In Russ)
2. SP 495.1325800.2020. Isothermal tanks for storing liquefied gases. Design rules: set of rules: approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 N 916 /pr: implementation date 2021-01-06. prepared by the Department of Urban Planning and Architecture Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Electronic fund of normative, technical and regulatory information of the Code Consortium: URL: <https://docs.cntd.ru/document/603121179> (date of access: 03.29.2023) (In Russ).
3. Determination of the optimal thickness of the thermal insulation layer of an LNG storage tank for large-scale production. Shestakov R.A., Rezanov K.S., Nazarova A.I. *Business magazine Neftegaz.RU.* 2022; 9 (129):42–47.– URL: https://magazine.neftegaz.ru/upload/iblock/a56/fnnrqfufynmp1t3vnb5wsvbfnbapzh0q/NeftegazRU_09_2022.pdf (access date: 03/29/2023) (In Russ)
4. Pimonov V. Russian LNG is aimed at leadership. *Russian Fuel and Energy Complex magazine.* 2021; 5. – URL: and https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2021/5/901/ d (date of access: 03/29/2023) (In Russ)
5. Order “On approval of the set of rules “Isothermal tanks for storing liquefied gases. Design Rules”, No. 916, dated December 30, 2020. (In Russ).
6. Map of the Russian LNG industry 2021 / Union of oil and gas industry organizations “Russian Gas Society” [website]. – URL: <https://gazo.ru/upload/iblock/da1/da153d043ef74dcda8d1cc34bf2c1345.pdf> (access date: 03/29/2023) (In Russ)

Сведения об авторе:

Бареева Эльвира Рустамовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры строительства, института градостроительства; e_bareeva@mail.ru

Information about author:

Elvira R. Bareeva, Cand. Sci.(Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Construction, Institute of Urban Planning e_bareeva@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 16.06.2023.

Одобрена после рецензирования Revised 12.07.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.07.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.215

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189



Оригинальная статья /Original article

Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел

В.Т.Федоров¹, М.Н.Кокоев²

¹Концерн «Наноиндустрия»,

¹119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, корпус 1, Россия,

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

²360004, г.Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является экспериментальное измерение поверхностной энергии твердых тел при их измельчении. **Метод.** Исследование основано на применении методов определения поверхностного натяжения твердых тел. На измельчение материалов в промышленности расходуется не менее 20-25 % всей производимой в мире электроэнергии. При уменьшении получаемых частиц до десятков нанометров вклад поверхностной энергии (σ_T) в работу измельчения становится столь большим, что его трудно не учитывать. Измерение поверхностного натяжения жидкостей давно отработано. Но измерение (σ_T) твердых тел вызывает большие трудности. В настоящее время известно более двадцати методов определения (σ_T). **Результат.** На основе явления самопроизвольного изгиба тонких нитевидных структур разработан метод определения (σ_T). Приводятся примеры, в которых (σ_T) на границе раздела фаз играет важную роль при получении образцов с микроструктурой методом интенсивной пластической деформации (ИПД). Для получения тонких металлических порошков предложен один из вариантов метода ИПД. Найден способ физической активации алюминиевых гранул, повышающий скорость реакции металла в водной среде примерно в тысячу раз. **Вывод.** Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже, чем во всех известных способах.

Ключевые слова: поверхностная энергия, твердое тело, интенсивная пластическая деформация, нанопорошок, получение водорода.

Для цитирования: В.Т.Федоров, М.Н.Кокоев. Поверхностная энергия в процессах измельчения твердых тел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 181-189. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189

Surface Energy in the Processes of Disintegration of Solids

V.T. Fedorov, M.N. Kokoev

¹Concern "Nanoindustry",

¹4 Bardin St., building 1, Moscow 119334, Russia,

²H.M. Berbekov Kabardino-Balkar State University,

²173 Chernyshevsky St., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to experimentally measure the surface energy of solids during their grinding. **Method.** The study is based on the use of methods for determining the surface tension of solids. At least 20-25% of all electricity produced in the world is spent on grinding materials in industry. When the resulting particles are reduced to tens of nanometers, the contribution of surface energy (σ_T) to the grinding work becomes so large that it is difficult not to take it into account. Measuring the surface tension of liquids has long been proven. But measuring (σ_T) of solids causes great difficulties. Currently, more than twenty methods for determining (σ_T) are known. **Result.** Based on the phenomenon of spontaneous bending of thin thread-like structures, a method for determining (σ_T) has been developed. Examples are giv-

en in which (σ_t) at the phase interface plays an important role in obtaining samples with a microstructure using the method of severe plastic deformation (SPD). To obtain fine metal powders, one of the variants of the SPD method has been proposed. A method has been found for the physical activation of aluminum granules, which increases the reaction rate of the metal in an aqueous environment by about a thousand times. This is necessary for the development of an anaerobic power plant capable of operating at great depths. **Conclusion.** The new technology makes it possible to obtain high-purity, non-oxidized metal powders without toxic waste and emissions and with energy costs lower than in all known methods.

Keywords: surface energy, solid, severe plastic deformation, nanopowder, hydrogen production.

For citation: V.T. Fedorov, M.N. Kokoev . Surface Energy in the Processes of Disintegration of Solids. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 181-189. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-181-189

Введение. Измельчение минерального сырья при производстве строительных материалов, в порошковой металлургии, химической и пищевой промышленности - процесс весьма энергоемкий. По объемам измельчаемого материала первые места занимают производство цемента, металлургия и зерна злаков. На дробление и измельчение материалов расходуется не менее 20-25 % всей производимой в мире электроэнергии. До 85-90 % материалов механически измельчается в шаровых мельницах, остальное приходится на валковые, вибрационные, струйные, вихревые и другие мельницы.

Согласно теории дробления и измельчения [1,2] работа A , затрачиваемая на измельчение, есть сумма двух энергий:

$$A = E_p + E_d, \text{ где } E_p = \sigma_t \Delta S \text{ и } E_d = K \Delta V, \quad (1)$$

здесь E_p - энергия, идущая на образование новых поверхностей при разрушение материала; σ_t - удельная поверхностная свободная энергия твердого тела (Н/м), ΔS - приращение поверхности, E_d - энергия деформации, K - энергия упругой и пластической деформации единицы объема твердого тела, ΔV - деформируемый объем тела.

Из (1) следует, что работа измельчения E_p зависит от площади ΔS вновь образуемой поверхности и удельной поверхностной энергии измельчаемого материала (σ_t). Удельная поверхностная энергия является основной характеристикой переходного слоя между фазами. Чем меньше тонина помола, тем больше затрачивается энергии на получение высокодисперсных частиц. До фракции 1-5 мкм вклад поверхностной энергии на работу измельчения мал и составляет около 1 %. Остальная работа по измельчению материалов так или иначе превращается в тепло. По мере уменьшения размеров частиц до субмикронных и особенно нанопорошков вклад поверхностной энергии в затрату работы на измельчение становится настолько заметным, что его трудно не учитывать.

Постановка задачи. Измерение поверхностной энергии (натяжения) различных жидкостей с точностью, достаточной для практики, не вызывает особых трудностей. В противоположность этому, экспериментальное измерение поверхностной энергии твердых тел дается с большим трудом. Для каких-то веществ эти измерения удаются с удовлетворительной точностью, а для многих веществ данные измерения σ вызывают сомнение.

Методы исследования. В настоящее время известно более двадцати методов определения поверхностного натяжения твердых тел. Из методов измерения σ металлов наиболее точен и хорошо отработан компенсационный метод «нулевой» ползучести [3]. Однако этот и другие методы не позволяют определить σ с достаточной точностью при нормальных температурах. В работе Николовой [4] предложен прямой экспериментальный метод для определения σ твердых тел, основанный на эффекте Гаммана. Было замечено, что происходит изгиб тонких пластинок толщиной 0,1-1 мм (толщина образца берется с учетом его длины) из оптического стекла и других материалов. Изгиб наблюдается

в том случае, если одна из сторон пластинки отполирована, а другая подвергнута шлифованию. Полированная сторона всегда вогнута. Дается формула для определения поверхностного натяжения полированной стороны пластинки толщиной h :

$$\sigma = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{h^2}{r}, \quad (2)$$

где r – радиус кривизны пластинки, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Кан и Ханнеман [5] замечали самопроизвольный изгиб в тонких отожженных пластинках несимметричных кристаллов соединений InSb , GaAs , InAs и др. Изгибы кристаллов авторы объясняют различием в величине поверхностного натяжения для противоположных граней кристаллов. Ханнеманом было получено равенство, выражающее разность поверхностных натяжений грани типа А и В {III} для InSb :

$$(\sigma_A - \sigma_B) = \frac{Yt^2}{6r}, \quad (3)$$

где Y – модуль приближения (при изотропной упругости $Y = E / (1 - \nu)$), t – толщина пластинки, r – радиус изгиба пластинки.

Если пренебречь анизотропией упругих свойств кристалла (различием величины E у разных граней) и в (3) подставить значение Y , то получим:

$$(\sigma_A - \sigma_B) = \frac{1}{6} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{t^2}{r}. \quad (4)$$

Видно, что правые части формул Николовой (2) и Ханнемана (3) после преобразования одинаковы. Отмечается, что самопроизвольный изгиб пластинок может быть в нескольких случаях:

а) вследствие различия в величинах поверхностного натяжения на разных гранях монокристалла;

б) из-за различной адсорбции на поверхностях пластинок;

в) вследствие избирательной адсорбции на одной из поверхностей.

Самопроизвольный изгиб очень чувствителен ко всем этим эффектам и наглядно показывает влияние среды на поверхностное натяжение. Метод позволяет определить лишь различие в величине поверхностного натяжения между гранями монокристалла.

Полученные результаты трудно поддаются количественной обработке, но оказывается, что сам по себе самопроизвольный изгиб является уникальным для исследований энергетики адсорбции. Нами сделана попытка рассмотрения самопроизвольного изгиба как явления, имеющего самостоятельное значение в механике тонких нитевидных структур. Оказалось, что для ряда твердых тел нитевидной формы с поперечным сечением не более 10-100 мкм при определенной длине, силы поверхностного натяжения вызывают их изгиб. В соответствии с Л. Эйлером, прямой стержень, нагруженный осевой силой P , сохраняет свою форму прямолинейной лишь в том случае, когда $P < P_{кр}$, где $P_{кр}$ – критическая сила, превышение которой приводит стержень к изгибу:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости Юнга, J_{\min} – минимальный главный момент инерции поперечного сечения стержня, l – длина стержня, μ – коэффициент приведения длины.

Подставив в (5) значение P , выраженное через σ_T , получим величину критической длины самопроизвольного изгиба нитевидной структуры под действием сил поверхностного натяжения, если она лишена внутренних напряжений:

$$l_{кр} = \left(\frac{\pi^2 EJ_{\min}}{\sigma_T b \mu^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где σ_T – поверхностное натяжение твердого тела, b – периметр поперечного сечения.

Следует подчеркнуть, что форма любой нитевидной структуры естественного или искусственного происхождения не может быть прямолинейной, если она имеет длину больше критической и лишена каких-либо внутренних напряжений. Данное явление может в значительной степени влиять на процесс усадки композиционных материалов, особенно при термическом воздействии на них в процессе изготовления или эксплуатации. Например, при изготовлении теплоизоляционных плиток из кварцевых волокон, работающих при высокой температуре. В результате термообработки плитки испытывают значительную усадку. Усадка изделий из волокна объясняется остаточными механическими напряжениями. Но не только, усадка волокон при определенных условиях может объясняться вкладом сил поверхностного натяжения (σ_T).

При толщине волокон несколько мкм и длиной более критической вклад в общую деформацию волокон за счет поверхностного натяжения становится заметным, а то и определяющим. Это объясняется тем, что при высоких температурах модуль упругости материалов снижается, в то время как поверхностное натяжение меняется незначительно. Например, при термической обработке теплоизолирующих плиток из ультратонких кварцевых волокон с плотностью изделия $0,2 \text{ г/см}^3$ усадочные напряжения, вызванные силами поверхностного натяжения, равны 50-100 кПа. При температуре спекания плитки (выше 1200 К) эти напряжения могут вызвать значительную усадку изделий.

Обсуждение результатов. На основе явления самопроизвольного изгиба нитевидных структур разработан метод определения σ_T . В случае превышения сжимающей стержень силой P критического значения происходит быстрое нарастание величины прогиба стержня:

$$f = \frac{l\sqrt{8}}{\pi} \left(1 - \frac{P_{кр}}{P} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значение $P_{кр}$ из (5) и учитывая, что $P = \sigma \cdot b$, для поверхностного натяжения нитевидного образца получим [6]:

$$\sigma_T = \frac{8\pi^2 EJ_{\min}}{b\mu^2(8l^2 - \pi^2 f^2)}. \quad (8)$$

Для измерения описанным способом σ_T необходимо отжечь нитевидный или ленточный образец из исследуемого материала, с соответствующей поправкой на J_{\min} , в зависимости от формы поперечного сечения, снять спрямляющую нагрузку и измерить максимальный прогиб и остальные геометрические параметры образца. При этом необходимо выполнить два основных условия:

а) длина образца должна быть не меньше критической длины самопроизвольного изгиба. Критическая длина образца предварительно оценивается по теоретическому значению σ_T и формуле (6);

б) поперечные размеры образца должны быть не больше 10-100 мкм с тем, чтобы вклад сил тяжести в деформацию образца был минимальным и не превышал долей процента.

в) в результате отжига образец должен быть лишен каких-либо внутренних напряжений.

Для измерения σ_T поликристаллических тел, например металлов, образец следует брать в виде тонкой ленты. Это вызвано тем, что образцы в виде проволоки при отжиге часто образуют, так называемую, «бамбуковую» структуру. В результате рекристаллизации образец в конце отжига представляет собой шарнирно-сочлененную систему из крупных зерен, поперечный размер которых приближается к диаметру исходной проволоки или становится выше диаметра образца. Для таких образцов понятие критической длины теряет смысл и определение σ_T невозможно. Данным методом определено поверхностное натяжение полиамидных волокон при комнатной температуре. Оно оказалось равным 43 мН/м. Для снятия внутренних напряжений полиамидные волокна длительно отжигались в инертной среде при 410-430 К.

Прочность твердых тел, вычисленная в предположении «идеальной» структуры кристаллической решетки (без дефектов различного рода), на несколько порядков больше действительной прочности:

$$P_T \approx (2E\sigma_T/\delta)^{1/2}, \quad (9)$$

где E – модуль Юнга, σ_T – удельная свободная поверхностная энергия, δ – трансляционная постоянная решетки кристалла.

Для объяснения временной прочности твердых тел обычно применяются представления Гриффитса о зародышевых трещинах [7,8]. Значение фактической прочности с учетом наличия в теле некоторой чечевицеобразной "опасной" трещины длиной l_m равно:

$$P_P = [2E\sigma_T/(l_m\pi)]^{1/2}. \quad (10)$$

При $P > P_P$ трещина растет и тело разрушается, при $P < P_P$ трещина смыкается и исчезает. Полученная зависимость для P_P относится к изотропному телу, когда (σ_T) одинаково для любого направления раскола. Размер опасных трещин для хрупкого твердого тела, например для кварца, может быть от 1,5 до 600 мкм, в зависимости от принятой в расчетах величины отношения P_T/P_P . Для малых частиц и волокон размер опасной трещины уменьшается. Из выражений (9,10) величина поверхностной энергии (σ_T) имеет важное значение для теории и практики материаловедения.

В последние годы применение новых технологий обработки материалов в научных исследованиях и промышленности резко возросло. Например, в исследованиях, направленных на разработку методов получения прочных и одновременно пластичных материалов [9]. При некоторых методах интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов (severe plastic deformation - SPD) удается так измельчить кристаллы металла, что они уменьшают свой размер от (100-500 мкм) до 50 нм, в зависимости от интенсивности и продолжительности обработки. В результате ИПД повышается микротвердость и прочность образцов при сохранении пластичности, иногда меняются к лучшему магнитные и химические свойства [10,11].

При еще одном варианте ИПД - экструзии пластичных металлов под давлением в несколько раз выше, чем при обычной экструзии и при скорости, которые на один-два порядка больше принятой, происходит разрушение металла с образованием тонкого порошка. Впервые об этом эффекте было сообщено в [12]. Установлено, что при такой ИПД при некоторых режимах диспергируются не только пластичные металлы и сплавы, но и некоторые неметаллы (в этом плане показателен тефлон).

К открытию этого эффекта более ста лет назад был близок академик Н.С. Курнаков. Он установил с Ю.А. Жемчужниковым, что при медленном сжатии соли или серы в прочном контейнере с отверстием наблюдаются редкие, но сильные выбросы измельченного вещества [13]. Однако такое разрушение соли или серы было достаточно ожидаемым, так как эти вещества хрупки по своей природе. Много позднее П. Бриджмен также исследовал хрупкое разрушение некоторых веществ при высоких давлениях [14].

Во второй половине 20 века отмечали появление трещин в металлических заготовках при гидравлической экструзии [15], а в работе [16] наблюдали процесс трещинообразования при высокой скорости экструзии некоторых алюминиевых сплавов.

Однако тотальное разрушение пластичных металлов и сплавов при экструзии с превращением их в тонкий порошок ранее не было известно. Действительно, трудно представить, что многие пластичные металлы и сплавы при особых режимах экструзии и часто при комнатной температуре в твердом состоянии могут распыляться подобно жидкому топливу в дизеле. Впервые превращение металла в порошок удалось увидеть при экструзии индия, когда из контейнера произошел выброс облака тонкой металлической пыли. Возможность такого явления объясняли особыми свойствами индия. Действительно, индий самый мягкий металл, если не брать во внимание некоторые щелочные металлы. Однако дальнейшие исследования показали, что диспергирование при особых режимах экструзии возможно для многих металлов и других веществ. Опытным путем при различной температуре подтверждено диспергирование более чем для 20 металлов и сплавов.

Это явление послужило основой для разработки нового метода получения субмикронных порошков пластичных металлов и сплавов. Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже чем во всех известных способах.

При всестороннем сжатии вещества давление в прочном контейнере возрастает до некоторой величины, по достижении которой начинается экструзия металла с высокой скоростью. Запасенная в металле и в гидросистеме пресса энергия сжатия переходит в работу разрушения вещества при экструзии, создания в нем дефектов структуры, образования новой поверхности помноженной на (σ_T). Разрушение металла при экструзии происходит под действием нескольких факторов. При выходе вещества с высокой скоростью из контейнера происходит быстрая релаксация напряжения упругого сжатия вещества. Это приводит к восстановлению равновесных межатомных расстояний и последующему разрыву металла по местам дефектов и микротрещин за счет сил инерции. Кроме того, внутри канала существует большой градиент скорости. Поэтому на процесс диспергирования оказывает большое влияние выделение тепла при внутреннем трении.

Нагрев металла может быть следствием трения при движении металла с большой скоростью через конусный канал [17]. Выделение тепла по указанным выше причинам может приводить к появлению какого-то количества жидкой фазы или даже полному плавлению металла, если металл легкоплавкий. Видно, что при получении металлических порошков большинство частиц имеет округлую или совершенно сферическую форму, что явно говорит о достижении металлом температуры плавления. Разрушению вещества способствуют также сильные деформации сдвига, которые действуют на металл при движении его через канал из контейнера.

В первом приближении определить необходимое давление P экструзии вещества в твердой фазе для обеспечения его разрушения с образованием тонкого порошка можно из уравнения баланса энергии. Потенциальная энергия сжатия вещества в контейнере во время экструзии расходуется на упругую и пластическую деформацию вещества, потери на трение, образование новой поверхности измельчаемого вещества и создание различных дефектов структуры при деформации и разрушении и др. При получении металлических субмикронных и нанопорошков вклад (σ_T) в работу диспергирования металлов нужно обязательно суммировать с другими затратами энергии. Заметное влияние на величину необходимого давления и затрат энергии на измельчение оказывает кинетическая энергия, которую уносит поток частиц разрушенного вещества. В зависимости от скорости частицы уносят порядка 15-20 % затраченной на экструзию энергии. Большая часть из указанных выше затрат энергии переходит в тепло.

С 2000 года ряд стран проводят разведочные работы в океане и готовятся к началу освоения морских месторождений, поскольку на суше месторождения руд цветных металлов истощаются. Основные группы полезных ископаемых заключены в железомарганцевых конкрециях, кобальт-марганцевых корках и глубоководных полиметаллических сульфидах. Промышленное освоение их должно произойти в ближайшие годы. Для добычи конкреций с большой глубины нужна разработка дистанционно управляемых подводных тяжелых бульдозеров, ковшовых погрузчиков, гидромониторов с воздухонезависимыми энергосиловыми установками (ЭСУ), способными работать на большой глубине.

Научные лаборатории во многих странах продолжают поиск бортового хранилища водорода в виде молекулярных и ионных гидридов алюминия, лития и других металлов как источников H_2 для электрохимического генератора [18]. Но гидриды металлов дороги, дефицитны, слишком чувствительны к условиям хранения и поэтому опасны. Да к тому же сам электрохимический генератор слишком дорог и ненадежен.

Новый подход в разработке воздухонезависимой ЭСУ - в качестве энергоносителя предполагается использовать алюминиевые гранулы для получения водорода и тепловой энергии гидротермальным окислением алюминия. Для работы ЭСУ применяется бортовые запасы алюминия в виде гранул и жидкий кислород в качестве окислителя. В резуль-

тате гидротермального окисления получается водород и тепловая энергия. Работает установка по замкнутому циклу. Водяные пары после компактного турбогенератора конденсируют и возвращают в цикл, так что ЭСУ может работать на любой глубине.

Но проблема в том, что алюминий всегда покрыт прочной пленкой оксида. Это основное препятствие для повышения скорости гидротермального окисления алюминия. Много лет во многих лабораториях пытались активировать алюминий десятками способов, но достигаемая скорость реакции была недостаточна. Об этих попытках написано в [19]. Например, нанопорошки алюминия с размерами частиц менее 100 нм реагируют в 70 раз быстрее с водой с выделением тепловой энергии и водорода при температуре всего 80° С, чем обычные промышленные порошки алюминия с размерами частиц 10-50 мкм при значительно более высокой температуре [20]. Однако из-за очень высокой стоимости нанопорошков алюминия (около \$300 за 1 кг), низкой производительности оборудования (метод взрывания проволок электрическим разрядом) и большой взрывоопасности нанопорошков их не применяют в энергосиловых установках.

Наконец во время экспериментов по изучению одного из видов ИПД пластичных металлов был обнаружен эффект кратковременной гигантской химической активности после разрушения металла в экстремальных условиях. В подтверждение проявления этого явления, кроме других экспериментов, служит такой факт. При разрушении металлов в результате ИПД наблюдается сильная фотоэмиссия, видимая невооруженным глазом. Сильная фотоэмиссия - это следствие быстрой релаксации напряжений и аннигиляции дефектов на поверхности частиц разрушенного вещества, крайне неравновесного состояния мгновенно диспергированного металла, что говорит об избыточной поверхностной энергии частиц. Многочисленные дефекты, с большой скоростью вышедшие на поверхность частицы - это центры топохимической реакций. На основе этого явления предложен новый метод активации алюминия, повышающий скорость окисления частиц алюминия примерно от одной до трех тысяч раз. Это явление кратковременной гигантской химической активности предложено использовать в воздухонезависимых (анаэробных) ЭСУ, использующих гидротермальное окисление алюминия.

Новый метод позволяет вместо порошка применять в ЭСУ крупные алюминиевые гранулы. В отличие от порошков, гранулы алюминия совершенно безопасны для транспортировки любым видом транспорта, удобны в использовании и хранении в любых климатических условиях. Гранулы намного дешевле порошков, так как их получают путем простого технологического передела. Новый метод активации гранул алюминия открывает путь применения гидротермального окисления для разработки воздухонезависимых (анаэробных) ЭСУ для оснащения ими подводной тяжелой техники для добычи полезных ископаемых морских месторождений цветных и редких металлов.

Вывод.

1. По мере уменьшения размеров частиц до нанопорошков, в которых всё больше нуждается промышленность и строительство, вклад поверхностной энергии в затрату работы на измельчение становится заметным, что его трудно не учитывать. Измерение поверхностного натяжения различных жидкостей с точностью, достаточной для практики, не вызывает особых трудностей. Но измерение поверхностной энергии твердых тел (σ_T) удается с большим трудом. Предложен и испытан метод измерения поверхностной энергии твердых тел при любой температуре.
2. При некоторых методах интенсивной пластической деформации (ИПД) металлов, в которых удается так измельчить кристаллы металла, что они уменьшают свой размер от (100-500 мкм) до 50 нм, в зависимости от интенсивности и продолжительности обработки. В результате ИПД металлов и сплавов повышается микротвердость и прочность образцов при сохранении пластичности, в некоторых случаях меняются к лучшему магнитные и химические свойства.
3. Один из методов ИПД - экструзия пластичных металлов при давлении в несколько

раз выше, чем обычно и при скорости, которая на один-два порядка больше принятой, происходит разрушение металла с образованием тонкого порошка. Это явление послужило основой для разработки нового метода получения субмикронных порошков пластичных металлов и сплавов. Новая технология позволяет получать высокочистые не окисленные металлические порошки без токсичных стоков и выбросов и при затратах энергии, ниже, чем во всех известных способах.

4. Во время экспериментов по изучению одного из видов ИПД металлов был обнаружен эффект кратковременной гигантской химической активности после разрушения металла в экстремальных условиях. При разрушении металлов в результате ИПД наблюдается сильная фотоэмиссия, видимая невооруженным глазом.

Новый метод физической активации алюминия открывает путь для практического применения безопасного и дешевого энергоносителя в виде алюминиевых гранул в воздуонезависимых энергосиловых установках.

Библиографический список:

1. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Москва. Металлургия. 1987. 792 с.
2. Ребиндер П. А., Шукин Е. Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т.108. N 9. С. 3-42.
3. А.с. № 408198 СССР. Прибор для измерения поверхностного натяжения твердых тел / С.Н. Задумкин, Х.Б. Хоконов, И.Г. Шебзухова // Открытия. Изобретения. 1973. Бюллетень № 47. С.121.
4. Николова Э. О поверхностном натяжении твердых тел, определенном эффектом Таммана // Годишник на висшете учебни заведения. Техническа физика. 1981. Т.28. Кн. 1. С.21-26.
5. Cahn J.W., Hanneman R.E. (111) Surface tensions of III-IV Compounds and their relationship to spontaneous bending of thin crystals // Surface science.- 1964, № 1.- P.387-397. [Кан Дж.В., Ханнеман Р.Е. (111) Поверхностные натяжения соединений III-IV и их связь со спонтанным изгибом тонких кристаллов // Науки о поверхности. 1964, № 1. С.387-397.]
6. Федоров В.Т. Явление самопроизвольного изгиба нитевидных структур // Поверхностные явления на границах конденсированных фаз. Нальчик, 1983. С.49-53.
7. Изотов А.Д., Лазарев В.Б., Жаворонков Н.М. Межатомные взаимодействия и ударная стойкость твердых тел при высокоскоростных деформациях//Доклады АН СССР. 1985. Т. 285, № 6. С.1401-1405.
8. Морохов И.Д., Трусов Л.И., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды. Москва. Атомиздат. 1977. 264 с.
9. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Высокопрочные металлические материалы для строительства особо ответственных сооружений//Вестник Отделения строительных наук РААСН. 2020. Том 2. С. 299-304.
10. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progr. Mat. Sci. 2006. V. 51. P. 427-556. [Мейерс М.А., Мишра А., Бенсон Д.Дж. Механические свойства нанокристаллических материалов // Прогр. мат. науч. 2006. Т. 51. С. 427-556.]
11. Europaeische Patentschrift EP 2 821 156 B1. Vorrichtung und Verfahren zur Umformung von Bauteilen aus Metallwerkstoffen. Fedorov Viktor (RU), Ivanisenko Julia (DE), Baretzky Brigitte (DE) Hahn Horst (DE). Prioritaet: 04.07.2013. [Европейский патент EP 2 821 156 B1. Устройство и способ формования деталей из металлических заготовок. Приоритет: 04.07.2013]
12. V.T. Fedorov and Kh.B. Khokonov. Phenomenon dispersion of solids with the rapid stress relaxation of hydrostatic compression // Sov. Phys. Dokl. 33(6) (1988) p. 463.
13. Федоров В.Т., Кокоев М.Н., Энергоноситель высокой надежности для резервных источников электро- и теплоснабжения // Вестник РААСН 2016. С. 604-608.
14. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Москва. Издательство иностранной литературы. 1955. 275 с.
15. Береснев Б.И., Трушин Е.В. Процесс гидроэкструзии. Москва. Наука. 1976. 199 с.
16. R.V. Pond. Metal Progress, 89(1966)77. [Понд Р.Б. Металл Прогресс, 89(1966)77.]
17. K. Mueller. Fundamentals of Extrusion Technology. Giesel Verlag. Isernhagen. Germany. 2004. [К. Мюллер. Основы технологии экструзии. Гизель-издательство. Изернхаген. Германия. 2004.]
18. Булычев Б.М., Стороженко П.А. Молекулярные и ионные гидриды металлов как источники водорода для энергетических установок // Альтернативная энергетика и экология. 2004. № 4. С.5-10.
19. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Геологоразведка арктического шельфа и проблема анаэробной силовой установки // Вестник Российской Академии естественных наук. 2020. N 1. С. 21-24.

20. Передовые порошковые технологии LLC. 2011. Томский политехнический университет. Томск. <http://www.nanosized-powders.com/ru/42/> (дата обращения 1.06.2023)

References

1. Anciferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. and other. Powder metallurgy and sprayed coatings. Moscow. Metallurgy. 1987; 792. (In Russ)
2. Rebinder P. A., Shchukin E. D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Advances in the physical sciences*. 1972;10(9):3-42. (In Russ)
3. A.s. No. 408198 USSR. A device for measuring the surface tension of solids. S.N. Zadumkin, Kh.B. Khokonov, I.G. Shebzukhova. *Discoveries. Inventions*. 1973; 47:121. (In Russ)
4. Nikolova E. On the surface tension of solids determined by the Tammann effect. *Technical physics*. 1981; 28(1):21-26. (In Russ)
5. Cahn J.W., Hanneman R.E. (111) Surface tensions of III-IV Compounds and their relationship to spontaneous bending of thin crystals. *Surface science*. 1964;1:387-397.
6. Fedorov V.T. The phenomenon of spontaneous bending of filamentous structures. *Surface phenomena at the boundaries of condensed phases*. Nalchik, 1983; 49-53(In Russ)
7. Izotov A.D., Lazarev V.B., Zhavoronkov N.M. Interatomic Interactions and Impact Resistance of Solids under High-Speed Deformations. Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1985; 285(6): 1401-1405. (In Russ)
8. Morokhov I.D., Trusov L.I., Chizhik S.P. Ultrafine metallic media. Moscow. Atomizdat. 1977;264. (In Russ)
9. Kokoev M.N., Fedorov V.T. High-strength metal materials for the construction of especially critical structures. *Bulletin of the Department of Building Sciences RAASN*. 2020;2: 299-304. (In Russ)
10. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progr. Mat. Sci*. 2006;51: 427-556.
11. Europaeische Patentschrift EP 2 821 156 B1. Vorrichtung und Verfahren zur Umformung von Bauteilen aus Metallwerkstoffen. Fedorov Viktor (RU), Ivanisenko Julia (DE), Baretzky Brigitte (DE) Hahn Horst (DE). Prioritaet: 04.07.2013.
12. V.T. Fedorov and Kh.B. Khokonov. Phenomenon dispersion of solids with the rapid stress relaxation of hydrostatic compression. *Sov. Phys. Dokl*. 33(6) (1988; 463
13. Fedorov V.T. , Kokoev M.N. High reliability energy carrier for backup sources of electricity and heat supply. *Bulletin of the Department of Building Sciences RAASN*. 2016;604-608. (In Russ)
14. Bridgeman P.V. Study of large plastic deformations and rupture. Moscow. Publishing house of foreign literature. 1955; 275. (In Russ)
15. Beresnev B.I., Trushin E.V. hydroextrusion process. Moscow.The science. 1976;199 (In Russ)
16. R.B. Pond. Metal Progress, 89(1966)77.
17. K. Mueller. Fundamentals of Extrusion Technology. Giesel Verlag. Isernhagen. Germany. 2004.
18. Bulychev B.M., Storozhenko P.A. Molecular and ionic metal hydrides as sources of hydrogen for power plants. *Alternative Energy and Ecology*. 2004; 4:5-10. (In Russ)
19. Fedorov V.T., Kokoev M.N. Geological exploration of the Arctic shelf and the problem of an anaerobic power plant. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2020;1: 21-24. (In Russ)
20. Advanced powder technologies LLC. 2011. Tomsk Polytechnic University. Tomsk. <http://www.nanosized-powders.com/ru/42/> (Accessed 10.02.2023). (In Russ).

Сведения об авторах:

Федоров Виктор Тихонович, доктор технических наук, советник (fedorovsteer@gmail.com).

Кокоев Мухамед Нургалиевич, доктор технических наук, профессор, советник РААСН, академик РАЕН и РИА, профессор кафедры «Строительное производство»; kbagrostroy@yandex.ru

Information about authors:

Viktor T. Fedorov, Dr. Sci. (Eng), Advisor; fedorovsteer@gmail.com.

Mukhamed N. Kokoev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Adviser to RAASN, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and RIA, prof. Department of Construction Production; kbagrostroy@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11.07.2023

Одобрена после рецензирования / Revised 29.08.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 29.08.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 536.621

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-190-196



Оригинальная статья / Original article

**Технологии и материалы для ремонта, восстановления
и реставрации памятников истории и культуры**

Г.Н. Хаджишалапов¹, П.Д. Батаева², А.Д. Батаев^{2,3}

¹ Дагестанский государственный технический университет,

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

² Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова РАН,

²364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21А, Россия

³ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика

М.Д. Миллионщикова,

³364051, Россия, г. Грозный, пр. Исаева, 100

Резюме. Цель. Поставлена задача разработки материалов и технологий ремонта, восстановления и реставрации объектов культурного наследия (ОКН) – памятников истории и культуры ОКН, отвечающих предъявляемым требованиям. **Метод.** В работе использованы современные методы физико-механических испытаний материалов и конструкций, включающие разрушающие и неразрушающие методы контроля качества, а также современный математический аппарат обобщения и обработки экспериментальных и статистических данных. **Результат.** Научно обоснованы и разработаны технологические и технические решения, направленные на повышение эффективности ремонта, восстановления и реставрации памятников культуры. **Вывод.** Разработаны методические и методологические основы организации работ, шкала оценки повреждений и разрушений памятников истории и культуры и ремонтные и реставрационные составы на основе воздушной и гидравлической известковых вяжущих веществ, отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям.

Ключевые слова: памятник, объект культуры, реставрация, органические добавки, реставрационный состав, сланцевая крошка, доломитовый песок, цемянка, зола, казеин.

Для цитирования: Г.Н. Хаджишалапов, П.Д. Батаева, А.Д. Батаев. Технологии и материалы для ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(3): 190-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-190-196

**TEchnologies and materials for repair, restoration and restoration of historical
and cultural monuments**

G.N. Hadzhishalapov¹, P.D. Bataeva², A.D. Bataev^{2,3}

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

²21A Staropromyslovskoe highway, Grozny 2364051, Russia,

³Acad. M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

³100 Kh. Isaev Ave., Grozny, 364051, Russia

Abstract. Objective. The task has been set to develop materials and technologies for repair, restoration and restoration of cultural heritage objects (CHOs) - historical and cultural monuments of CHOs that meet the requirements. **Method.** The work uses modern methods of physical and mechanical testing of materials and structures, including destructive and non-destructive quality control methods, as well as a modern mathematical apparatus for generalizing and processing experimental and statistical data. **Result.** Due to the fact that the South of Russia is rich in cultural

heritage, and a significant number of historical and cultural monuments have been destroyed as a result of natural and man-made impacts, special attention is paid to the scientific substantiation and development of technological and technical solutions aimed at improving the efficiency of their repair, restoration and restoration. **Conclusion.** The work has developed methodological and methodological foundations for organizing work, a scale for assessing damage and destruction of historical and cultural monuments, and repair and restoration compositions based on air and hydraulic lime binders that meet the repair and restoration requirements.

Key words: monument, cultural object, repair, restoration, organic additives, restoration composition, shale chips, dolomite sand, tartar, ash, casein.

For citation: G.N. Khadzishalapov, P.D. Bataeva, A.D. Bataev. Technologies and materials for the repair, restoration and restoration of historical and cultural monuments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(3): 190-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-190-196

Введение. Сохранение объектов культурного наследия имеет большое значение в культурном развитии регионов и страны. Памятник истории и культуры – это, прежде всего, хранитель исторической памяти народа. Несмотря на принимаемые властями широкомасштабные меры, актуальной проблемой до сих пор остается ремонт, восстановление и реставрация подверженных старению и разрушению объектов культурного наследия Северного Кавказа. Необходимо отметить, что практически отсутствуют реставрационные составы для кладки стен из мелкоштучного материала, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. С этой точки зрения, исследования, проводимые в Дагестанском государственном техническом университете (ДГТУ) и Комплексном научно-исследовательском институте им. Х.И. Ибрагимова РАН (КНИИ РАН) являются актуальными [5, 7-13].

Постановка задачи. Благодаря усилиям таких ученых, как Л.П. Семенов, И.П. Щерблякин, Г.А. Кокиев, В.И., Долбежев, Е.И. Крупнов, М.Б. Мужухоев, Е.И. Нарожный, проведены исследования, в ходе которых была разработана типология и обоснованы хронология и этническая принадлежность историко-архитектурных памятников [1].

Проведенный анализ состояния проблемы позволил рассмотреть основные составы и вяжущие вещества, используемые при ремонте и восстановлении ОКН. В результате чего разработана классификация неорганических вяжущих веществ и добавок в вяжущие вещества, бетоны и растворы. Организация ремонтных, восстановительных и реставрационных работ на объектах культурного наследия должна основываться на Федеральном законе от 25 июня 2002 г. №73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».

Разработанная схема взаимодействия участников инвестиционного проекта и этапы разработки инвестиционного проекта ремонта, восстановления и реставрации объекта культурного наследия представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Схема взаимодействия участников инвестиционного проекта
Fig.1. Scheme of interaction between participants in the investment project

————— прямые связи/ direct connections;

----- второстепенные связи/ secondary connections.

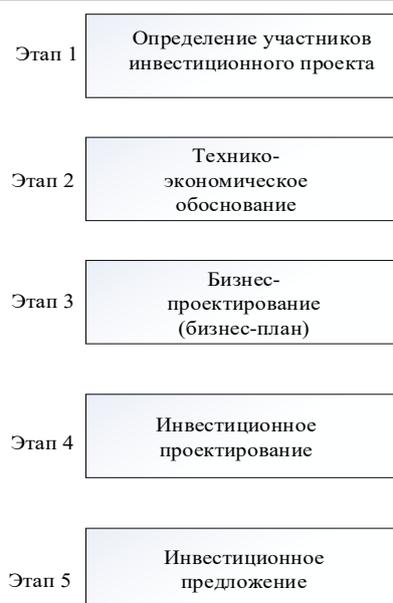


Рис. 2. Этапы разработки инвестиционного проекта ремонта, восстановления и реставрации объекта культурного наследия

Fig. 2. Stages of developing an investment project for the repair, restoration and restoration of a cultural heritage site

На первом этапе определены участники инвестиционного проекта – для Чеченской Республики таковыми являются Министерство культуры Чеченской Республики, Аргунский государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник, Комитет Правительства Чеченской Республики по охране и использованию культурного наследия, научно-исследовательские учреждения, а также организации и фирмы различных организационно-правовых форм, имеющие профиль ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры [7]. На втором этапе выполнено технико-экономическое обоснование (ТЭО) целесообразности ремонта, восстановления и реставрации памятника истории и культуры. Достигнут положительный результат ТЭО, поэтому выполнен третий этап – бизнес-проектирование. При положительном заключении бизнес-плана реализован четвертый этап – этап инвестиционного проектирования. На основе инвестиционного проекта в настоящее время разрабатывается инвестиционное предложение, которое можно отнести к очередному пятому этапу.

Методы исследования. Обобщив опыт обследования памятников истории и культуры, разработана шкала оценки разрушения ОКН, благодаря которой можно рассчитывать степень их повреждения.

$P = 0\% \div 20\%$ - слабое разрушение;

$P = 30\% \div 60\%$ - среднее разрушение;

$P = 70\% \div 100\%$ - сильное разрушение.

При: $P = 70\% \div 100\%$ объект культурного наследия подлежит восстановлению (воссозданию);

$P = 30\% \div 60\%$ - объект подлежит ремонту;

$P = 0\% \div 20\%$ - объект подлежит реставрации.

Обсуждение результатов. По результатам исследований, отобранных проб раствора кладки стен башенных строений и путем изучения сведений литературных источников, касающихся опыта строительства, реставрации, ремонта и восстановления ОКН, свидетельских показаний жителей горных районов, а также умозрительного анализа разработаны составы растворов на основе воздушной и гидравлической известей и органических добавок (табл.1). Применяемые для ремонта, реставрации и восстановления памятников истории и культуры составы являются многокомпонентными, так как при их приготовлении используются различные добавки органического происхождения (рис.3).

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представлены в табл. 2.

Таблица 1. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см (набор №2)

Table 1. Experimental mortar compositions for masonry walls of ancient towers and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm (set No. 2)

№ состава	Известковое тесто, гр.	Сланцевая крошка, гр.	Доломитовый песок ф. 0-2,5, гр.	Цемьянка, гр.	Вода, гр.	Клей казеиновый, гр.	Известь пушонка, гр.	Древесная зола, гр.	Яичная масса, гр.	Творог обезжиренный, гр.	Фибра стекловолоконная, гр.	Простокваша, гр.
1	-	180	310	40	-	80	25	7	-	-	-	-
2	-	180	310	35	-	78	24	8	-	-	-	-
3	84	165	280	35	7	-	-	7	-	17	-	-
4	84	165	280	31	8	-	-	14	15	13	-	-
5	-	235	150	25	-	96	35	9	-	-	-	-
6	90	230	150	26	30	-	-	-	-	9	-	-
7	84	168	299	26	47	2	-	14	-	-	-	-
8	85	220	143	25	35	2	-	-	-	-	1	-
9	84	161	300	19	24	5	-	13	-	-	-	-
10	70	272	86	18	22	7	-	10	-	-	-	-
11	70	272	86	25	22	7	-	10	-	-	-	-
12	-	330	-	-	-	-	60	40	43	-	-	30
13	-	360	-	-	-	-	103	30	-	-	-	55

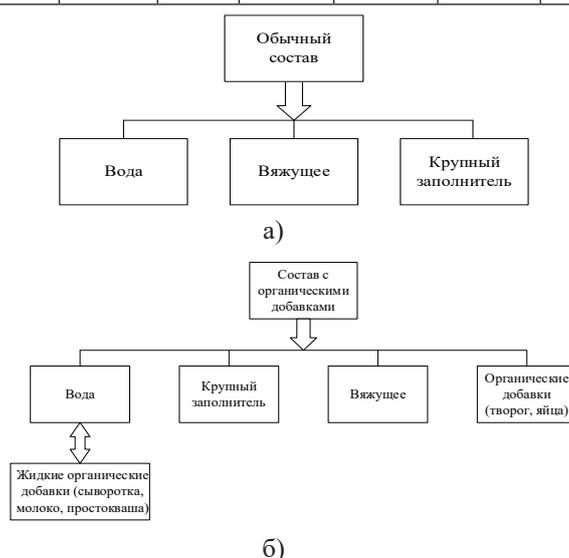


Рис. 3. Обычный состав (а) и состав с органическими добавками (б)

Fig. 3. Conventional composition (a) and composition with organic additives (b)

Для приготовления ремонтно-реставрационных составов оптимальной является гидравлическая известь. Ремонтные и реставрационные смеси на гидравлической извести пластичной консистенции при 28-суточном твердении дают прочность на сжатие 30 кг/см² и более – в зависимости от гидравлического модуля использованного гидравлического вяжущего. Долговечность ремонтных и реставрационных растворов на гидравлической извести сравнительно высока, поэтому памятники истории и культуры XV-XVI вв., уцелевшие от техногенных воздействий сохранили свою несущую способность [2, 4, 6]. Соотношения компонентов устанавливаются в зависимости от требуемой марки смеси (гидравлическая известь, сланцевая крошка, доломитовый песок, цемьянка, зола, казеин). Пропорции компонентов представлены в табл. 3.

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представлены в табл.4. Марка раствора определялась испытанием на сжатие балочек размерами 40x40x160 мм в возрасте 28 суток при температуре твердения 20±3°C.

Таблица 2. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора
Table 2. Physico-mechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава No. of experimental composition	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Bending tensile strength	Прочность сцепления раствора в каменной кладке, кг/см ² Bond strength of mortar in masonry	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength
1	0,5	0,3	4,7
2	12,9	0,9	15,4
3	15,5	1,65	29,2
4	1,1	0,6	8,8
5	11,0	0,9	14,3
6	0,4	0,4	5,7
7	0,4	0,5	4,0
8	0,7	0,3	3,82
9	8,5	1,75	41,0
10	0,4	0,3	3,5
11	0,4	0,3	3,1
12	4,7	1,48	25,4
13	0	0	0,2

Таблица 3. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см

Table 3. Experimental mortar compositions for masonry walls of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№ состава composition	Сланцевая крошка, г. Slate chips	Доломитовый песок фр. 0-2,5, г. Dolomite sand fr. 0-2,5, g.	Цемянка, г Tsemyanka	Вода, г Water	Гидравлическая известь, г. Hydraulic lime	Известь пушонка, г. Lime fluff	Древесная зола, г. Wood ash
1	160	250,8	19,4	90	39	44,2	1
2	182,5	243,2	23	69,3	30,7	42,7	2
3	91	272	23,5	123	33,2	47	1
4	160	250,8	19,4	120	83	-	1
5	182,5	243,2	23	130	73	-	2
6	91	272	23,5	123	80,6	-	1
7	160	250	19	190	79	-	1
8	160	250	19	174	40	39	1
9	91	270	24	170	80	-	1
10	180	240	19	175	70	-	2
11	180	250	19	170	73	30	1

Таблица 4. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора
Table 4. Physico-mechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава No. composition	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Bending tensile strength	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength
1	2,22	19,8
2	2,13	16,0
3	1,89	5,6
4	2,34	20,0
5	0,93	6,0
6	2,03	6,2
7	2,22	46,68
8	2,13	47,06
9	1,9	21,6
10	2,1	25,66
11	0,9	33,0

Вывод. В результате выполненных исследований разработаны новые материалы и технологии для ремонта, восстановления и реставрации ОКН (памятников истории и культуры), отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанных ремонтно-реставрационных составов и грузоподъемных устройств составляет около 7,5 млн. рублей. Получен социальный эффект - повышение безопасности производства ремонтно-восстановительных и реставрационных работ.

Библиографический список:

1. Азиев М.А., Марковин В.И., Чахкиев Д.Р. Каменная летопись страны вайнахов. М.: «Русская книга», 1994. – С. 200.
2. Батаева П.Д. Составы для ремонта, восстановления и реставрации объекта культурного наследия // IV Международное книжное издание стран СНГ «Лучший молодой ученый - 2021». Нур-Султан: Международная ассоциация молодых ученых, 2021. – С. 53-58.
3. Батаева П.Д. ТУ 08.11.20.114-001-45264133-22. Гидравлическая известь из мергелистых горных пород. – 2022. – 9 с.
4. Зворыкин Н.П. Метод укрепления каменных (кирпичных) кладок памятников архитектуры путем нагнетания растворов в трещины кладки. Практика реставрационных работ. – М., 1950. С. 173-192.
5. Шеина С.Г., Муртазаев С.-А.Ю., Батаев Д.К.-С., Батаева П.Д. Органо-неорганические вяжущие для ремонта и реставрации памятников истории и культуры башенного типа // Материалы конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика», приуроченной к 60-летию член-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора Сайд-Альви Юсуповича Муртазаева. – Грозный: АЛЕФ, – 2021. – С. 129-135.
6. Шеина С.Г., Батаев Д.К.-С., Батаева П.Д. Методы подъема и перемещения грузов в стесненных условиях // Монография. – Грозный: РПК «СПЕКТР», 2022. – 235 с.
7. Abdullaev R.M., Abdullaev M.A.-V., Bataev D.K.-S., Dzhambulatov R.S. High-strength cement composites modified with a complex additive hyperplasticizer - bentonite // Key Engineering Materials Vol. 909 – Grozny, 2021. – PP. 191-197; Bataeva P.D.
8. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K.-S., Murtazaev S.-A.J., Mazhiev Kh.N., Goitemirov R. U., Gaziev M. A., Bataeva P.D. Formation of the Properties of High Strength Building Quasi-Structure Polymer Composites. Conference: Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov. Grozny, 2019: 403-407.
9. Bazhenov Yu.M., Murtazaev S.-A.Yu., Bataev D.K.-S., Alarkhanova Z.Z., Goitemirov R.U., Mazhiev Kh.N., Khasbulatova Z.S., Bataeva P.D. Ways to improve the properties of high-strength building polymer composites // III International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research”, dedicated to the 75th anniversary of Professor Abdul-Khamid Makhmudovich Bisliev. - Grozny: KNII im. H.I. Ibragimov RAS, 2020;
10. Bataev D.K.-S., Murtazaev S.-A.J., Mazhiev Kh.N., Maloroev M.M., Bataev G.K.-S., Goitemirov R.U., Gaziev M.A., Bataeva P.D. Organic-inorganic composition for stone masonry walls of ancient tower and necropolis buildings in the North Caucasus.. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1103, International Scientific Conference Interstroyemeh (ISM 2020). - Samara;
11. Bataev D.K.-S., Goitemirov R.U., Bataeva P.D. Study of wear resistance and antifriction properties metal-polymer pairs working in seawater simulator // II International Scientific Congress «Modern science, man and civilization» V International Scientific Conference «Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism», dedicated to 70th anniversary of Doctor of Philosophy, Professor Akaev Vakhit Humidovich» – Grozny, 2022;
12. Sheina S.G., Bataev D.K.-S., Goytemirov R.U., Abdullaev A.M., Bataeva P.D. Compositions for the repair and restoration of cultural objects heritage // II International Scientific Congress «Modern science, man and civilization» V International Scientific Conference «Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism», dedicated to 70th anniversary of Doctor of Philosophy, Professor Akaev Vakhit Humidovich» – Grozny, 2022;
13. Sheina S.G., Murtazaev S.-A.Yu., Bataev D.K.-S., Bataeva P.D. Technical devices for access to the restored tower-type monuments of history and culture in conditions of inaccessibility and increased constraint // Proceedings of the IV International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research”, dedicated to the 80th anniversary of Salambek N. Khadzhiev, Dr. of Chemical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences. Grozny: KNII im. H.I. Ibragimov RAS, 2020.

References

1. Aziev M.A, V.I. Markovin, D.R. Chakhkiev. Stone chronicle of the Vainakh country. M. : “Russian Book”, 1994;200. (In Russ)
2. Bataeva P.D. Compositions for the repair, restoration and restoration of a cultural heritage site // IV International Book Edition of the Commonwealth of Independent States “Best Young Scientist - 2021”. - Nur-Sultan: International Association of Young Scientists, 2021;53-58. (In Russ)
3. Bataeva P.D. ТУ 08.11.20.114-001-45264133-22. Hydraulic lime from marl rocks. 2022;9. (In Russ)
4. Zworykin N.P. A method of strengthening stone (brick) masonry of architectural monuments by injecting solutions into masonry cracks. - On Sat. Restoration practice. M., 1950;173-192. (In Russ)
5. Sheina S.G., Murtazaev S.A.Yu., Bataev D.K.S., Bataeva P.D. Organo-inorganic binders for the repair and restoration of monuments of history and culture of the tower type. Proceedings of the conference “Topical issues of modern science: theory, technology, methodology and practice”, dedicated to the 60th anniversary

- of the Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Dr. Sci. (Eng), Prof., Said-Alvi Yusupovich Murtazaev. Grozny: ALEF, 2021;129-135. (In Russ)
6. Sheina S.G., Bataev D.K-S., Bataeva P.D. Methods of lifting and moving cargo in cramped conditions. *Monograph. - Grozny: RPK "SPEKTR", 2022; 235.*
 7. Abdullaev R.M., Abdullaev M.A-V., Bataev D.K-S., Dzhambulatov R.S. High-strength cement composites modified with a complex additive hyperplasticizer – bentonite. *Key Engineering Materials.* 909 - Grozny, 2021; 191-197;
 8. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K.-S., Murtazaev S.-A.J., Mazhiev Kh.N., Goitemirov R.U., Gaziev M.A., Bataeva P.D. Formation of the Properties of High Strength Building Quasi-Structure Polymer Composites . *Conference: Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISES 2019).* Grozny, 2019; 403-407;
 9. Bazhenov Yu.M., Murtazaev S.-A.Yu., Bataev D.K-S., Alarkhanova Z.Z., Goitemirov R.U., Mazhiev Kh.N., Khasbulatova Z.S., Bataeva P.D. Ways to improve the properties of high-strength building polymer composites. III International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research", dedicated to the 75th anniversary of Professor Abdul-Khamid Makhmudovich Bisliev. Grozny: KNII im. H.I. Ibragimov RAS, 2020;
 10. Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.J., Mazhiev Kh.N., Maloroev M.M., Bataev G.K-S., Goitemirov R.U., Gaziev M.A., Bataeva P.D. Organic-inorganic composition for stone masonry walls of ancient tower and necropolis buildings in the North Caucasus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1103, International Scientific Conference Interstroyemeh (ISM 2020). - Samara;
 11. Bataev D.K-S., Goitemirov R.U., Bataeva P.D. Study of wear resistance and antifriction properties metal-polymer pairs working in seawater simulator. II International Scientific Congress "Modern science, man and civilization" V International Scientific Conference "Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism", dedicated to 70th anniversary of Doctor of Philosophy, Professor Akaev Vakhit Humidovich" Grozny, 2022;
 12. Sheina S.G., Bataev D.K-S., Goytemirov R.U., Abdullaev A.M., Bataeva P.D. Compositions for the repair and restoration of cultural objects heritage. II International Scientific Congress "Modern science, man and civilization" V International Scientific Conference "Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism", dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Philosophy, Professor Akaev Vakhit Humidovich" – Grozny, 2022;
 13. Sheina S.G., Murtazaev S.A.Yu., Bataev D.K.S., Bataeva P.D. Technical devices for access to the restored tower-type monuments of history and culture in conditions of inaccessibility and increased constraint. Proceedings of the IV International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research", dedicated to the 80th anniversary of Salambek Naibovich Khadzhiev, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences. Grozny: KNII im. H.I. Ibragimov RAS, 2020;

Сведения об авторах:

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; yarus-x@mail.ru

Петимат Денаевна Батаева, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов, bataeva_ggntu@mail.ru

Адам Денаевич Батаев, младший научный сотрудник, аспирант; adam.bataev1993@mail.ru

Information about authors:

Gadzhimagomed N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Petimat D. Bataeva, Cand. Sci. (Eng), Junior Researcher, Laboratory of Metals, Alloys and Composite Materials, bataev-ggntu@mail.ru

Adam D. Bataev, Junior Researcher, Graduate Student; adam.bataev1993@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 19.05.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 29.06.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.06.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202



Оригинальная статья /Original article

Адаптивные сейсмостойкие системы

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

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

Резюме. Цель. Данная статья является продолжением темы, затронутой в статье «Системы с оптимальными геометрическими формами», опубликованной в предыдущем выпуске настоящего журнала. Целью исследования является разработка конструктивных схем и пояснений к ним, изложение принципов их работы, конструктивных особенностей, обеспечивающих необходимую сейсмостойкость. **Метод.** Для обеспечения адаптивности используются различные конструктивные приёмы: включающиеся связи, выключающиеся связи, включающее-выключающиеся связи, здания и сооружения, состоящие из различных конструктивных блоков, имеющие различные частоты собственных колебаний. Таким образом блоки здания при колебаниях друг друга гасят, тем самым обеспечивает необходимую сейсмостойкость при землетрясениях. **Результат.** Приведены конструктивные системы с адаптивными свойствами, придающими высокую сейсмостойкость зданиям и сооружениям. **Вывод.** Изложенные в статье конструктивные приёмы обеспечивают высокую сейсмостойкость зданий и сооружений, которые могут найти применение в практике проектирования и строительства сейсмостойких систем.

Ключевые слова: сейсмостойкость, адаптивные системы, включающиеся связи, конструктивные схемы, частоты колебаний.

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Адаптивные сейсмостойкие системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (3):197-202. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202

Adaptive Earthquake-resistant Systems

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

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

Abstract. Objective. This article is a continuation of the topic raised in the article “Systems with optimal geometric shapes”, published in the previous issue of this journal. The purpose of the study is to develop design diagrams and explanations for them, outline the principles of their operation, design features that provide the necessary seismic resistance. **Method.** To ensure adaptability, various design techniques are used: switching connections, switching connections, switching connections, buildings and structures consisting of various structural blocks having different frequencies of natural oscillations. Thus, the blocks of the building dampen each other during vibrations, thereby providing the necessary seismic resistance during earthquakes. **Result.** Structural systems with adaptive properties that impart high seismic resistance to buildings and structures are presented. **Conclusion.** The design techniques outlined in the article ensure high seismic resistance of buildings and structures, which can be used in the practice of designing and constructing earthquake-resistant systems.

Keywords: seismic resistance, adaptive systems, actuating connections, structural schemes, vibration frequencies.

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Adaptive Earthquake-resistant Systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(3): 197-202. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-3-197-202.

Введение. В связи с увеличением численности населения земного шара необходимость построения сейсмостойких зданий становится актуальной [1,2,5]. Недавние землетрясения, которые произошли в Турции, говорят о недостаточности сейсмостойкости построенных зданий и сооружений. В связи с чем встают новые проблемы, связанные с со строительством сейсмостойких систем. В частности, к повышению сейсмостойкости сооружений приводят так называемые адаптивные системы.

Постановка задачи. К адаптивным относятся системы, которые приспособляются к сейсмическим воздействиям, то есть обладают способностью «убегать» от резонансного или близкого к нему состояния [4,6,7,10]. А это может произойти, если меняются частоты собственных колебаний системы в зависимости от перемещений. Такое возможно только в нелинейных системах, поскольку частоты свободных колебаний в линейных системах не зависят от перемещений. Изменение частот собственных колебаний обеспечивается за счёт внедрения в систему связей включающихся, выключающихся, или связей, обладающих свойствами включаться и выключаться. Адаптивные системы относятся к современным способам сейсмозащиты зданий и сооружений [3,10]. Все сейсмостойкие здания и сооружения должны проектироваться в соответствии с требованиями СП [11].

Методы исследования. Далее приводятся конструктивные системы сейсмостойких зданий и сооружений. Причём каждая приведенная ниже конструктивная система имеет свои преимущества и недостатки. В комментариях к конструктивным системам мы приводим эти преимущества и недостатки. Рассматриваются различные конструктивные системы, включающихся и выключающихся элементов. Даются здания, скомпонованные из отдельных блоков, соединённых между собой гибкими связями, причём каждый блок здания обладает своими частотами собственных колебаний.

Обсуждение результатов. На рис. 1.а показано здание 2 на гибких колоннах 3. Верхняя часть здания жёсткая 2. Пунктирами (рис.1.а) показаны выключающиеся связи 4. Пока горизонтальные перемещения здания при землетрясении малы, выключающиеся связи 4 выдерживают усилия. С возрастанием перемещений, когда система начинает входить в резонанс, происходит отрыв (разрушение) выключающихся связей. При этом частоты собственных колебаний системы резко уменьшаются, и здание «убегает» от опасного состояния, то есть приспособляется (адаптируется). При этом система принимает другую конструктивную структуру (рис.1.б) – где уже нет связей.

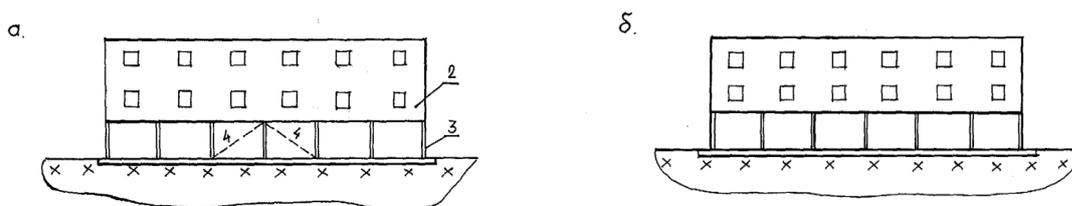


Рис.1. Здание на гибких колоннах:

а) – с выключающимися связями; б) – после выключения связей

Fig.1. Building on flexible columns:

a) – with switchable connections; b) – after turning off the connections

Недостатки: после землетрясения выключенные связи необходимо восстановить; новое состояние системы (рис.1.б) может иметь ещё относительно большие перемещения, которые, правда, быстро гасятся. Новое состояние системы должно выдерживать воздействие «новых» значений напряжений.

На рис. 2, а показано здание на гибких колоннах 3. Верхняя часть 1 здания – жёсткая. На рис. 2.б показан фрагмент, где даётся включающаяся связь 2 в виде железобетонного простенка, жестко соединенного с фундаментными конструкциями 5. Из-за наличия (рис. 2, б) зазора 4 здание 1 на гибких колоннах 3 может получить достаточно большие горизонтальные перемещения. При этом сейсмические нагрузки на здание уменьшаются. Если система начинает входить в резонанс, то колонны 3 ударяются об резиновые

упругоподатливые подушки, установленные на элементе 2 (рис. 2) в местах соприкосновения его с колоннами. При этом жёсткость системы возрастает, резко увеличиваются частоты свободных колебаний, и система «убегает» от резонансного состояния. В местах соединения гибких колонн 3 с верхней 1 и нижней 5 частями здания (рис. 2, б) могут быть два варианта сопряжения: колонны гибкие, сопряжения жесткие; колонны очень жёсткие, сопряжения – в виде конструктивного шарнира.

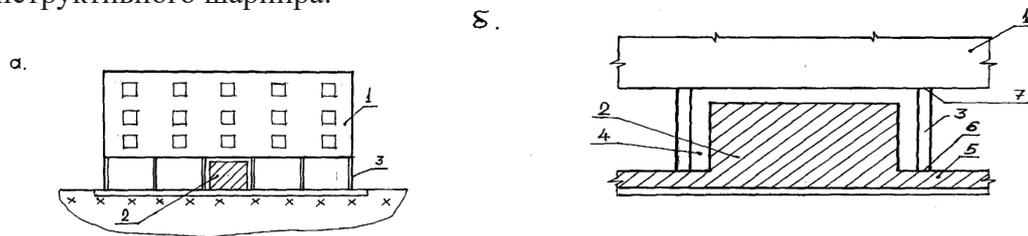


Рис. 2. Здание на гибких колоннах:

а) – с включающимися связями; б) – фрагмент включающейся связи в виде простенка

Fig. 2. Building on flexible columns:

Недостатки: в элементах включающихся связей (элемент 2, рис. 2) могут возникать чрезмерно большие нагрузки; чтобы исключить соударений необходимо устроить буферные конструкции. Устройство включающихся, выключающихся связей требует высокой культуры производства: изготовления и монтажа.

На рис. 3. показана схема кинематической опоры [8,9], состоящая из ствола и двух оголовков со сферическими поверхностями.

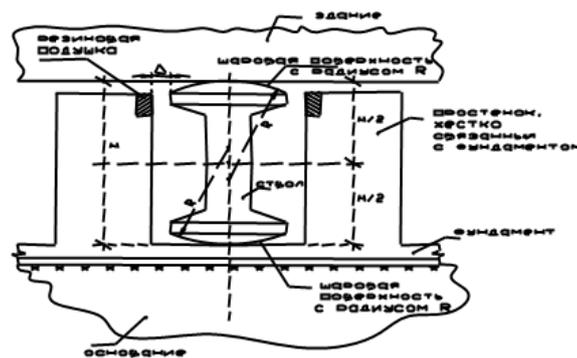


Рис.3. Кинематическая опора

Fig.3. Kinematic support

При сейсмических колебаниях такая опора работает, как «Ванька-встанька» [$R > \frac{H}{2}$]. Система – низкочастична. Она эффективна при землетрясениях с высокочастотным спектром. При спектрах низкочастотных и широкополосных система может войти в резонанс и получить большие перемещения. Тогда включаются в работу (рис. 3) упругие буфера, например, резиновые подушки, и повышается жесткость системы: частоты собственных колебаний увеличиваются – система «убегает» от резонансного или близкого к нему состояния. Зазор Δ назначается по расчету (рис. 3). В частном случае, такая кинематическая опора может иметь только один шарообразный оголовок.

Недостатки: конструкция сложна для изготовления. При качении опоры, ствол ее работает на сжатие с изгибом; в местах перехода оголовка к стволам, из-за концентрации напряжений, материал охрупчивается. Эксперименты показывают, что в наклонном состоянии опоры (во время колебаний) края оголовка дают трещины: скалываются. Конструкция рациональна в сооружениях специального назначения.

На рис. 4 дана конструктивная схема здания с гибкими колоннами 3 на первом этаже. Жёсткие простенки 5 неподвижно соединены с фундаментами. В местах соприкосновения простенка 5 с жесткой верхней частью 1 здания (рис.4, а, б) имеется сварной шов 6. Между гибкими колоннами 3 и простенками 5 имеются зазоры 4. Здесь в зависимости от величины

зазора 4 наблюдаются два варианта.

Первый вариант: зазор значительный. Система в целом изначально жёсткая. Для неё опасны землетрясения с высокочастотным спектром: система может войти в резонансное состояние. При этом развиваются значительные горизонтальные перемещения и высокие напряжения в сварном шве 6 (рис.4, б). Шов разрушается, и система становится гибкой: частоты собственных колебаний здания резко падают и сооружение в целом «убегает» от резонансного состояния. Если изначально, пока сварной шов не вышел из строя, землетрясение – низкочастотное, горизонтальные перемещения будут незначительными: система работает «хорошо».

Второй вариант: зазор незначительный. При низкочастотных землетрясениях, как уже было указано выше, система работает с малыми перемещениями. При землетрясениях система может войти в резонанс и привести к разрушению сварного шва 6 (рис.4, б). Таким образом здание «убегает» от высокочастотного резонанса. Но нередко землетрясения имеют широкий спектр частот (широкополосный спектр): имеют и высокие и низкие частоты. При этом, поскольку система (рис.4) высокочастотна, то здание реагирует на высокие частоты сейсмических воздействий, и при наступлении высокочастотного резонанса оно «убегает» от него.



Рис. 4. Здание на гибких колоннах:

а) – с включающимися – выключающимися связями;

б) – фрагмент связи с включающимися и выключающимися элементами

Fig. 4. Building on flexible columns:

a) – with switching connections; b) – a fragment of connection with elements that turn on and off

Сооружение в целом превращается в низкочастотную систему, для которой опасны уже низкие частоты. Наличие в широкополосном спектре землетрясения низких частот приводит здание в низкочастотное резонансное состояние: развиваются большие перемещения. При этом, поскольку зазор 4 мал (рис.4), простенки 5, соприкасаясь с гибкими колоннами 3, включают в работу (включаются связи), повышается жёсткость всего здания. Частоты собственных колебаний увеличиваются, система уже второй раз «убегает» от резонанса. Недостатки: они такие же, как и на рис. 2.

На рис. 4.а показано здание на гибких колоннах 3. Верхняя часть 1 здания жесткая. Из-за наличия достаточно большого зазора 4 между колоннами 3 и жёстко закреплённого к фундаментным конструкциям простенка 5 здание при землетрясении может получить значительные горизонтальные перемещения. При этом снижается сейсмические нагрузки на здание. С целью ограничения развития чрезмерно больших перемещений между верхней частью 1 (рис.4, б) и простенком 5 устраивается демпфер сухого трения 6, работа которого описывается законом Амонтова. Как и в случае вязких демпферов, демпфер сухого трения, хотя не меняет частоты собственных колебаний системы, уменьшает величину перемещений: не даёт системе раскачиваться.

Недостатки: в процессе эксплуатации характеристики демпферов сухого трения довольно скоро становятся не стабильными: демпферы теряют свои свойства.

На рис. 5, а показана схема фасада здания, имеющего ядро 1 и «обойму» 2. Между ними имеется зазор 3, за счёт наличия которого при землетрясении происходят колебания ядра и «обоймы» независимо (не совсем зависимо). Ядро имеет относительно низкие частоты свободных колебаний, а «обойма», как жёсткая конструкция, – более высокие частоты. Если «обойма»

и ядро совершенно друг с другом не связаны, то резонансные состояния для каждого из них будут наступать при различных частотах сейсмических сил. Чтобы «обойма» и ядро друг другу «мешали», друг друга гасили при землетрясении, их соединяют с помощью демпферов. На рис. 5, в дана принципиальная схема такого демпфера. В ёмкости 6 находится вязкая жидкость, которая просачивается при перемещениях поршня 5 через его отверстия. Шток 4 соединён с ядром 1, а ёмкость 7 с вязкой жидкостью - с «обоймой 2» (рис.5, в). Вязкий демпфер не меняет собственной частоты системы в целом, но уменьшает величину перемещения, так как в соответствующей функции Грина, коэффициент, обеспечивающий её убывание во времени значителен.

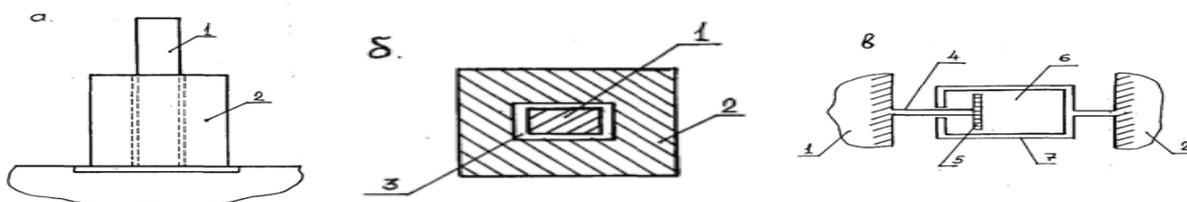


Рис. 5. Здание, состоящее из ядра и обоймы:

а) – общий вид здания; б) – схема плана здания; в) – схема демпфера

Fig. 5. A building consisting of a core and a cage:

а) – general view of the building; б) – diagram of the building plan; в) – damper diagram

Недостатки: демпфера требуют периодической проверки в процессе эксплуатации; вязкие жидкости, используемые в демпферах, очень дороги.

На рис. 6, а дана схема фасада здания. Здание сконструировано из блоков большей высоты 2 и меньшей 1. На рис. 6, б приведён план. Оба блока соединены между собой кольцами. Конструктивная схема одного из них показана на рис. 6, в. Если бы блоки не были соединены, они бы имели разные частоты собственных колебаний и резонансные ситуации у них наступали бы не одновременно. Имея соединения, они друг другу «мешают» входить в резонансное состояние. При этом кольцо 3 деформируется, становясь эллипсом, меняя положение больших и малых полуосей; возникают пластические шарниры, поглощается энергия, которая не восстанавливается (уходит в виде тепла). Всё это приводит к уменьшению перемещений здания при землетрясении. Для устройства демпферов удобна также конструктивная схема здания, показанная на рис. 2, а.

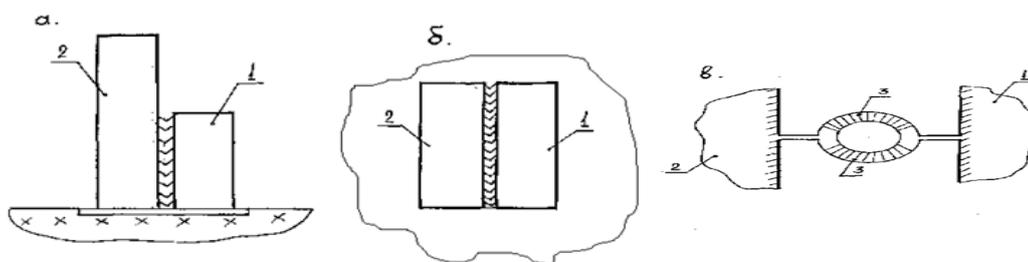


Рис. 6. Здание, состоящее из двух блоков различной высоты:

а) – общий вид здания; б) – схема здания в плане; в) – схема демпфера

Fig. 6. A building consisting of two blocks of different heights:

а) – general view of the building; б) – plan diagram of the building; в) – damper diagram

Недостатки: прочность материала колец определяется малоцикловою прочностью; происходит накопление деформаций в элементах конструкции, из которых изготовлены демпферы пластических деформаций.

Вывод. Разработаны конструктивные системы сейсмостойких зданий и сооружений с адаптивными свойствами. Приведены схемы включающихся, выключающихся и включающе - выключающихся связи.

Изложены недостатки и преимущества предлагаемых конструктивных приёмов. Даны схемы сейсмостойких зданий с демпферами сухого и пластического трения. Предлагаемые конструктивные схемы могут найти применение при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений различного назначения.

Библиографический список:

1. Айзенберг Я.М. Два разрушительных землетрясения в Турции за три месяца 1999г. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2000. - №1.- С. 54-57.
2. Абакаров А.Д., Крамынин П.И. Выбор рациональных площадок для строительства сейсмостойких зданий в г. Махачкале (Инженерно геологические особенности Дагестанской АССР), 1984.
3. Айзенберг Я.М., Миносян А.В. Взаимодействие сооружения с упруго-пластическим грунтом при сейсмических воздействиях //Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2001, №2.
4. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция зданий в России и СНГ// Сейсмостойкое строительство», 1998, № 1. С. 23-26.
5. Кириков Б. А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. Изд-во “Наука”, М. 1990.
6. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (Основы теории сейсмостойкости). Изд-во Высшая школа, М.1983.
7. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. Стройиздат, М. 1989.
8. Уздин А.М. Задание сейсмического воздействия. Взгляд инженера-строителя//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. №1.С. 27-31.
9. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. — М.: Стройиздат, 1978.—311с.
10. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах.
11. Айзенберг Я.М, В. И. Смирнов, А. В. Минасян. Качающиеся опоры с гидроциркуляционной системой для сейсмоизоляции сооружений// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений — Вып. 2. 2000. С. 34-36.

References

1. Aizenberg Ya.M. Two devastating earthquakes in Turkey in three months in 1999. Earthquake-resistant construction. Building safety”. 2000; 1: 54-57. (In Russ)
2. Abakarov A.D., Kramynin P.I. Selection of rational sites for the construction of earthquake-resistant buildings in the city of Makhachkala (Engineering and geological features of the Dagestan ASSR), 1984. (In Russ)
3. Aizenberg Ya.M., Minosyan A.V. Interaction of a structure with an elastic-plastic soil under seismic influences. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2001; 2. (In Russ)
4. Aizenberg Ya.M. Seismic isolation of buildings in Russia and the CIS. *Earthquake-resistant construction*, 1998; 1: 23-26. (In Russ)
5. B.A. Kirikov, Ancient and Newest Seismic-Resistant Structures. Publishing house “Science”, M. 1990. (In Russ)
6. Polyakov S.V. Seismic-resistant structures of buildings (Fundamentals of the theory of seismic resistance). Publishing House Higher School, M.1983. (In Russ)
7. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Modern methods of seismic protection of buildings. Stroyizdat, M. 1989. (In Russ)
8. Uzdin A.M. Setting the seismic impact. View of a civil engineer. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2005; 1:27-31. (In Russ)
9. Polyakov S.V. Consequences of strong earthquakes. M. : Stroyizdat, 1978; 311. (In Russ)
10. SP 14.13330.2018 “SNiP II-7-81* Construction in seismic areas. (In Russ)
11. Aizenberg Ya.M., V.I. Smirnov, A.V.Minasyan. Swinging supports with a hydrocirculation system for seismic isolation of structures. *Earthquake-resistant construction. Building Safety*.2000;2: 34-36. (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»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyuan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 17.07.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.08.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 31.08.2023.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить: распечатку рукописи (1 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи; электронную копию (допустима передача по электронной почте); экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. 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 Microsoft Word или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом **«Библиографический список»**. Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул Microsoft Word 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки. Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам

не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: aidaesetova@rambler.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: “**Introduction**”, “**Background**”, “**Methods**”, “**Results and Discussion**”, “**Conclusion**”. The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
 - List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
 - Title of the article (in Russian and English).
 - Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English).
 - Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).
- Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. “References” should be drawn up according to the “Vancouver” standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word “Table” and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article. Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imama Shamiya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: aidaesetova@rambler.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



**ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**
Махачкала, Том 50– №3 – 2023.

**HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**
Makhachkala, Volume 50, No.3. 2023.

**Верстка: Красикова А.В., Бирюкова И.А.
Перевод: Эсетова А.М.**

Адрес редакции:
367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет»
Тел./факс(8722)623715
(8722)623964
E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

**Layout: Krasikova A.V., Biriukova I.A.
Translation: Esetova A.M.**

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964
«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 01.10.2023г. Сдано в печать 15.10.2023г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 23.83 Уч. изд.л. 17,0315
Заказ № 271023

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.
394052, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.
Тел.: 89507656959. E-mail: Kopyltsow_Pavel@mail.ru