

ISSN(Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Дагестанский государственный технический университет»



Том 47, №1, 2020.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 47, No.1, 2020.

HERALD

OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

Научно-исследовательский журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство ПИ № ФС77-30186 от 9 ноября 2007г. Подписной индекс Т71366 в федеральном каталоге периодических изданий ОАО Агентства «Роспечать».

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; GoogleScholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Соционет, КиберЛенинка.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2020.

The research journal is registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR), the certificate of PI No. FS77-30186 of November 9, 2007. Subscription index T71366 is in the federal catalogue of periodicals of the JSC Rospechat Agency.

The journal is included in the List of leading reviewed scientific journals and periodicals of the Higher Certifying Commission (VAK) of the Russian Federation, in which basic scientific results of dissertations are to be published. The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC) available on the Internet (<http://www.elibrary.ru> Scientific electronic library).

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2020.

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 47, № 1, 2020

Главный редактор: Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, Россия.

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

Абакаров А.Д., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Адамов А.П., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Алиев Р.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Давидюк А.Н., д.т.н., заслуженный строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева

АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, РФ.

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

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, генеральный 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.

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.

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

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

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

Мелехин В.Б., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

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.

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

Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, РФ.

Сопредседатели:

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

Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, 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.

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

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

Ползунова, г. Барнаул, РФ.

Группы научных специальностей

05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения,

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ

05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.17 – Строительная механика

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Вестник Дагестанского государственного технического университета.

Технические науки.

Том 47, №1

Махачкала, 2020 – 180 с.

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ... 8

В.А. Буланин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО
ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ 8

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов, А.А. Дюсенгалиев, Ш.З. Байрамов

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ 19

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, А.М. Ибрагимова

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ
ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ РЭА 30

В.Ю. Савин, В.Ю. Ильичев

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ПЛАСТИНЧАТЫХ
ГИДРОМОТОРАХ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ..... 39

Ш.А. Юсуфов

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛООБМЕННИК – ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ 48

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 58

В.П. Алферов, А.В. Бацких, А.В. Крислов, А.Д. Попов, Е.А. Rogozin

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО
ДОСТУПА ПРИ АНАЛИЗЕ ЕЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК 58

И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, В.В. Конобеевских

АНАЛИЗ ТИПОВЫХ СЕТЕВЫХ АТАК НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОРГАНОВ
ВНУТРЕННИХ ДЕЛ..... 72

Ю.Г. Жеглова, Б.П. Титаренко

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ 86

Д.Ф. Мамедов, К.С. Абдуллаев, З.М. Мурадлы, Е.М. Гасанова, С.Б. Алиева

РАЗРАБОТКА ФРЕЙМ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫБОРА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКОЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ..... 93

А. Молнар

ТРЕХМЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ГАЗОВ
ПРИ ПОМОЩИ КВАДРОКОПТЕРОВ..... 102

О.И. Степанов, Е.Е. Зайцева, С.А. Худякова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЗВЕНЬЕВ ГАЗОДЫМОЗАЩИТНОЙ
 СЛУЖБЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТА..... 117

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА..... 126

А.Л. Большеротов

СТРУКТУРА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА - ОСНОВА
 ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПАСПОРТА ТЕРРИТОРИИ 126

Е.А. Ефименко, М.Ю. Беккиев, Д.Р. Маилян, А.С. Чепурненко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОР В ПЛИТЕ ПЕРЕКРЫТИЯ
 ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ 138

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.А. Сеницын, Н.Н. Монаркин, А.Г. Гудков

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИ-
 РУЕМЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА 147

А.С. Личковаха, Б.А. Шемшур, С.А. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГИБКОГО СТЕРЖ-
 НЯ С НАЧАЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ..... 156

М.Ш. Саламанова, С-А.Ю. Муртазаев, Д.К-С. Батаев, А.Х. Аласханов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕСТИМОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАПОЛНЕННЫХ
 ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ..... 165

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ..... 174

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»
HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 4 7 , N o . 1 , 2 0 2 0 .

Editor-in-Chief: Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Editorial Board: Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Rasul M. Aliev, Doctor of Technical Science Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Doctor of Technical Science, Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Alexey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, 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, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland; Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia; Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Gadzhimurad N. Khadzishalapov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Doctor of Physics and Mathematics, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus; Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.	Research areas 05.04.03 - Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning systems and life support (Technical Sciences), 05.04.13 - Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences), 05.13.01 - System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.06 - Automation and management of technological processes and production (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.10 - Management in social and economic systems (Technical Sciences), 05.13.12 - Design automation systems (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 05.13.19 - Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences), 05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 05.23.05 - Building materials and products (Technical Sciences), 05.23.17 - Construction mechanics (Technical Sciences), 05.23.19 - Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences) Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 47, No.1 Makhachkala, 2020–180 c. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964
--	---

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING 8

V.A. Bulanin

USE OF GAS TURBINES FOR COMBINED ENERGY PRODUCTION 8

L.V. Galimova, D.Z. Bayramov, A.A. Dyusengaliev, Sh.Z. Bayramov

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SECONDARY ENERGY RESOURCES IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES USING SPECIAL REFRIGERATION EQUIPMENT 19

T.A. Ismailov, A.R Shakhmaeva, A.M. Ibragimova

THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR DEVICES FOR THERMAL STABILISATION OF REA POWERFUL TRANSISTORS 30

V.Yu. Savin, V.Yu. Ilyichev

STUDY OF TORQUE NONUNIFORMITY IN DOUBLE-ACTION HYDRAULIC ROTARY VANE MOTORS..... 39

Sh.A. Yusufov

THERMOELECTRIC HEAT EXCHANGER - HEAT TRANSMISSION INTENSIFIER FOR MAINTAINING A THERMAL REGIME IN ELECTRONIC SYSTEMS 48

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT 58

V.P. Alferov, A.V. Butskikh, A.V. Krisilov, A.D. Popov, E.A. Rogozin

USE OF A NUMERICAL ANALYTICAL MODEL FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL EFFECTIVENESS OF AN INFORMATION PROTECTION SYSTEM BY ANALYSING ITS PROBABILISTIC-TEMPORAL CHARACTERISTICS 58

I.G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, V.V. Konobeevsky

ANALYSIS OF TYPICAL NETWORK ATTACKS ON AUTOMATED SYSTEMS OF INTERNAL AFFAIRS DEPARTMENTS 72

Yu.G. Zheglova, B.P. Titarenko

METHOD FOR EVALUATING EXCAVATION SHORING DESIGN CONCEPTS 86

E.J.F. Mamedov, K.S. Abdullaev, Z.M. Muradli, E.M. Hasanova, S.B. Alieva

DEVELOPMENT OF FRAME MODELS FOR THE SELECTION AND DESIGN OF A FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEM 93

A. Molnár

THREE-DIMENSIONAL DETECTION OF GAMMA RADIATION AND POLLUTING GASES USING QUADROCOPTERS 102

O.I. Stepanov, E.E. Zaitseva, S.A. Khudyakova

MODEL OF CALCULATIONS FOR EXPERIMENTALLY-OBTAINED GAS AND WATERPROOF SERVICE LINE OPERATIONAL PARAMETERS 117

BUILDING AND ARCHITECTURE 126

A.L. Bolsherotov

ENVIRONMENTAL SECURITY STRUCTURE FORMING THE GROUNDWORK FOR A TERRITORIAL ENVIRONMENTAL PASSPORT 126

E.A. Efimenko, M.Yu. Bekkiev, D.R. Mayilyan, A.S. Chepurnenko

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF SUPPORTS IN THE FLOOR SLABS OF INDUSTRIAL BUILDINGS USING STOCHASTIC METHODS 138

D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.A. Sinitsyn, N.N. Monarkin, A.G. Gudkov

FEATURES OF MOUNTED VENTILATED FACADE HEAT CONTROL SYSTEMS IN CONSTRUCTION PROJECTS 147

A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov

STUDY OF THE STRAIN STATE AND MOVEMENTS OF A FLEXIBLE ROD WITH INITIAL CURVATURE 156

M.Sh. Salamanova, S.-A.Yu. Murtazaev, D.K.-S. Bataev, A.Kh. Alaskhanov

THEORETICAL BASIS OF COMPATIBILITY OF COMPLETELY-FILLED MULTICOMPONENT BINDING SYSTEMS 165

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS 174

Для цитирования: В.А.Буланин. Использование газовых турбин для комбинированного производства энергии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 8-18. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-8-18

For citation: V.A. Bulanin. Use of gas turbines for combined energy production. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 8-18. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-8-18

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-8-18

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

В.А. Буланин

ООО «Инновационные технологии – Энергетика»,
308007, г. Белгород, ул. Мичурина, 56, Россия

Резюме. Цель. Проблема состоит в том, что, ранее в СССР, а затем в СНГ газотурбинные (ГТУ) и парогазовые (ПГУ) установки использовались в ограниченном количестве, несмотря на очевидность и целесообразность их широкого внедрения. Актуальность проблемы заключается в том, что паротурбинные ТЭС исчерпали возможности повышения эффективности использования топлива и капитальных вложений. В мировой практике природный газ используют в первую очередь в ГТУ и ПГУ. В СНГ до последнего времени не было достаточно опыта проектирования, строительства и эксплуатации энергетических ГТУ и ПГУ. **Метод.** Исследования в данной области носили, как правило, эпизодический характер. Необходимо систематизировать результаты этих исследований, провести оценку состояния исследований на мировом уровне, определить программу исследований с учетом региональных особенностей. **Результат.** В статье указаны основные причины и потенциальная эффективность использования газовых турбин. Исследованы принципиальные схемы и конструкции ГТУ, технические и технико-экономические характеристики, оценка целесообразности их использования. **Вывод.** Учитывая положительный мировой опыт, уровень развития газотурбинных технологий и наличие природного газа, целесообразно и необходимо использовать газотурбинные и парогазовые установки в топливно-энергетическом комплексе, промышленности, сельском хозяйстве и коммунальной энергетике при техническом перевооружении этих отраслей, проектировании и строительстве новых источников энергии. Повсеместное (в центрах тепловых и электрических нагрузок) внедрение газотурбинных установок позволит сократить потребность экономики региона в энергетическом топливе и обеспечить прирост энергетических мощностей без строительства новых неэкономичных и сложных паротурбинных ГРЭС.

Ключевые слова: газовая турбина, теплоэнергетика, газотурбинные установки, теплоснабжение, когенерация, впрыск пара

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

USE OF GAS TURBINES FOR COMBINED ENERGY PRODUCTION

V.A. Bulanin

Innovative Technologies – Energy LLC,
56 Michurina St., Belgorod 308007, Russia

Abstract. Aim. Despite the obvious expediency of their widespread implementation, gas turbine (GT) and combined cycle gas turbine (CCGT) plants were only used in limited quantities in the former USSR and CIS countries. Due to the exhaustion of possibilities to increase the fuel use efficiency and return on investment (ROI) in steam-turbine combined heat and power (CHP) plants, the development of GT and CCGT plants becomes an urgent problem. In current global practice, the primary fuel for gas turbines and combined cycle gas turbines is natural gas. However, until recently, there has been a lack of experience in the design, construction and operation of GT and CCGT plants in the CIS countries. **Method.** Due to the ad hoc nature of research in this area, it was necessary to systematise the results of existing studies and assess the state of research at the world level taking regional characteristics into account. **Results.** The article presents the main considerations and potential effectiveness of the use of gas turbines. Basic gas turbine construction schemes are investigated along with their techno-economic characteristics and an assessment of their comparative utility. **Conclusion.** Considering the widespread availability of natural gas, it is recommended that gas turbine and combined-cycle plants be installed as part of the process of technical re-equipment in the fuel and energy complex, industry, agriculture and municipal energy sectors as part of the design and construction of new energy sources in the light of positive world experience and the current level of development of gas turbine technologies. Ubiquitous implementation of gas turbine units in the centres supplying heat and electric loads will reduce the regional economy's need for energy fuel and ensure an increase in energy capacity without the need to construct new complex and uneconomic steam turbine power plants.

Keywords: gas turbine, heat and power engineering, gas turbine installations, heat supply, co-generation, steam injection

Введение. Основными производителями электроэнергии в России являются мощные ГЭС, АЭС и ТЭС. Структура установленной мощности электростанций ЕЭС России по состоянию на 31.03.2019 приведена в табл. 1.

Таблица 1. Структура установленной мощности электростанций ЕЭС России
Table 1. The structure of the installed capacity of power plants
of the Unified Energy System of Russia

Электростанции Power plants	Установленная мощность Installed capacity	
	МВт MW	%
ЕЭС России, всего, в т.ч.: UES of Russia, total, including:	245 810	100,00
Тепловые электростанции Thermal Power Plants	166 070	67,56
Гидроэлектростанции Hydroelectric power stations	49 469	20,12
Солнечные электростанции Solar power plants	954	0,39
Ветровые электростанции Wind farms	184	0,07
Атомные электростанции Nuclear power plants	29 132	11,85

Распределение тепловых электростанций по установленной мощности (%): ГРЭС – 38, ТЭЦ – 30. Направления дальнейшего развития энергетики России представлены в «Схеме и программе развития Единой энергетической системы России на 2012–2018 годы» [1].

В России действуют 163 тепловых электростанций, из которых 124 составляют ТЭЦ с давлением пара 9 МПа и более, суммарная мощность последних – 54,8 ГВт (эл). Эти ТЭЦ имеют следующее распределение по мощностям (табл. 2).

Таблица 2. Распределение тепловых электростанций в России по мощностям

Table 2. Distribution of thermal power plants in Russia by capacity

Мощность ТЭЦ, МВт (эл.) Power of thermal power station, MW (el.)	50-100	101-200	201-500	501-750	751-1000	> 1000
Количество ТЭЦ Number of CHP	4	12	78	18	4	8
Суммарная мощность, МВт (эл.) Total power, MW (el.)	267	1932	28647	11229	2505	10280

Мощность ГТУ и ПГУ составляет 14 ГВт. Это менее 9 процентов от всего парка тепловых электростанций ЕЭС России.

Как видно из представленных данных, количество ТЭЦ меньшей мощности незначительно, в связи с чем, теплоснабжение городов с численностью населения менее 500 тыс. чел., как правило, осуществляется от котельных. За последние 20 лет доля теплофикационной выработки ТЭС уменьшилась с 34 до 28% [2]. При этом, например, Белгородской области не обременена, как другие регионы, большим количеством морально и физически устаревших паротурбинных электростанций, которые даже после их техперевооружения не смогут составить конкуренцию новым электростанциям, использующим современные газотурбинные технологии. С ростом цен на энергоресурсы до уровня мировых будут расти и тарифы на электроэнергию, производимую на федеральных электростанциях. Поэтому сохранение ориентации на электроснабжение Белгородской области преимущественно от внешних энергоисточников, через ФОРЭМ, станет фактором, сдерживающим экономический рост области.

Кроме электроэнергии в область по магистральным газопроводам поступает также природный газ, значительная доля которого используется неэффективно – на подогрев воды для горячего водоснабжения и отопления.

Постановка задачи. В статье [3] рассмотрено и проанализировано состояние мирового и отечественного рынков газотурбинных установок (далее – ГТУ) разной мощности. Приведены прогнозы и перспективы выпуска ГТУ. Газотурбинные установки имеют следующие преимущества [4]: малая стоимость, высокая степень автоматизации всех процессов, незначительное влияние на окружающую среду, маневренность и мн. др.. Относительно малая удельная стоимость газотурбинных установок обеспечивается тем, что в схеме ГТУ отсутствуют такие дорогостоящие элементы паротурбинного цикла, как паровой котел, конденсационная паротурбинная установка с системой технического водоснабжения, водоподготовительная установка. Все эти факторы делают ГТУ в 2-2,5 раза дешевле конденсационной электростанции соответствующей мощности.

С развитием газотурбостроения значительно улучшены технико-экономические характеристики ГТУ. Турбогруппа ГТУ (компрессор, камера сгорания, газовая турбина) выполняются, как правило, как единый блок на одной раме, испытываются на заводе и при монтаже не требует разборки. Турбогруппа доставляется на стандартной железнодорожной платформе и после монтажа ее необходимо подключить только к топливоподаче и электрооборудованию. Строительные работы и монтаж ГТУ длятся от 2 до 6 месяцев.

К.п.д. ГТУ в последние годы повышается за счет начальной температуры в камере сгорания до 1100°C. Если в 60-е годы к.п.д. ГТУ составлял 20%, то в настоящее время достигнут и превышен уровень 40%. Кроме того, значительно увеличился ресурс ГТУ. К недостаткам ГТУ относят большие потери теплоты с уходящими газами, температура которых достигает 500°C. Однако использование этой теплоты возможно, например, в котлах-утилизаторах, в топках действующих котлов.

Первое практическое применение газовых турбин в энергетике относится к 1932 г., когда фирма «Броун-Бовери» (Швейцария) применила сетевой компрессор с турбоприводом для наддува котла (так называемый цикл Веллокса). Первая электростанция с газовыми турбинами была пущена в Швейцарии в 1939 г. («Эшер Висс») и лишь к концу 40-х годов газовые турбины нашли применение в энергетике США. В конце 1976 г. установленная мощность американских ГТУ составила 45,6 ГВт, т.е. приблизительно 8,5% от мощности всех энергетических установок страны. К концу 1975 г. в США в эксплуатации находились установки комбинированного цикла общей мощностью около 1000 МВт.

Анализ новых технических решений, связанных с использованием природного газа, которые содержатся в зарубежных докладах и других материалах XIV Конгресса МИРЭК [5], в первую очередь в электроэнергетике, свидетельствует о том, что в Западной Европе, США и Японии широко используются ГТУ и ПГУ с газовыми турбинами единичной мощностью до 200 МВт и с начальной температурой до 1250 °С.

В СССР разработка стационарных газовых турбин проходила по двум основным направлениям, в качестве: приводов для компрессорных станций на газопроводах; энергетических установок для несения пиковых и полупиковых нагрузок.

Таким образом, основная задача советского газотурбостроения на этот период заключалась в строительстве стационарных газовых турбин для привода нагнетателей. В начале 1975 г. в эксплуатации находилось более 600 установок с турбинным приводом общей мощностью более 37 ГВт. Тем не менее, к 1975 г. были пущены и функционировали около 20 энергетических установок мощностью от 10 до 100 МВт. Они предназначались, прежде всего, для покрытия пиковых нагрузок, хотя некоторые из них применялись и как базисные. Кроме того, функционировало несколько установок комбинированного цикла.

В настоящее время в условиях импортозамещения и локализации производства в России импортных газовых турбин наметились определенные изменения. Например, ООО «Сименс Технологии Газовых Турбин», созданное в 2011 году в Санкт-Петербурге, занимается разработкой, сборкой, продажей и обслуживанием газовых турбин мощностью свыше 60 МВт для рынка России и СНГ, а также локализацией производства. Завод, построенный с нуля и оснащенный самым высокотехнологичным оборудованием, стал одним из крупнейших предприятий энергетического сектора в регионе. Продуктовая линейка СТГТ включает в себя газовые турбины SGT5-2000E мощностью 187 МВт и SGT5-4000F мощностью 329 МВт. Правительство России готово предоставлять субсидии российским организациям на финансовое обеспечение части затрат на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в рамках создания производства газовых турбин большой мощности в диапазоне 60 - 80 МВт и 150 - 180 МВт с КПД не менее 35 процентов в простом цикле [6].

Методы исследования. Одним из наиболее важных факторов, которые должны быть изучены при разработке ГТУ, является график нагрузки системы. В тех случаях, когда установка рассчитана на использование в течение коротких отрезков времени при высокой нагрузке с частыми пусками и остановками, важно учитывать не только требуемую мощность, но и число планируемых пусков и остановок, а также скорость нагружения установки. Если имеется возможность повышать нагрузку со сравнительно малой скоростью и при этом выполнять все необходимые требования, то износ оборудования будет минимальным. При быстром пуске с быстрым нагружением межремонтный период потребуется сократить.

Как указывалось выше, одними из первых ПГУ, реализованных на практике, были газотурбинные надстройки к паротурбинным блокам, в которых выхлопные газы газовой турбины сбрасывались в обычный паровой котел. Поскольку мощность ГТУ по сравнению с паровой турбиной относительно была мала, этот тип установок не позволял выявить все преимущества ПГУ. В связи с этим для дальнейшего анализа рассматриваются две наиболее характерные разновидности парогазовых установок.

1. Парогазовая установка с высоконапорным парогенератором. В данной установке теплота к паротурбинному циклу подводится как от уходящих газов газовой турбины, так и путем

расхолаживания продуктов сгорания перед газовой турбиной. Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания близок к стехиометрическому.

2. Парогазовая установка с котлом-утилизатором. В данной установке теплота к паротурбинному циклу подводится только от уходящих газов газовой турбины. Для регулирования параметров пара в котле-утилизаторе и повышения тепловой экономичности паротурбинной части цикла возможно дожигание дополнительного топлива в содержащих остаточный кислород уходящих газах. Температура рабочего тела перед газовой турбиной поддерживается регулированием избытка воздуха.

Внедрение газотурбинных установок (ГТУ) в энергетику идет в двух направлениях: в качестве самостоятельных энергетических установок и в составе парогазовых установок (ПГУ).

Современные газотурбинные установки мощностью от 12 до 150 МВт с температурами газов перед турбиной от 900 до 1200°C имеют КПД на уровне 28-33%, что обеспечивает удельные расходы топлива на выработку электроэнергии 440-370 г у.т./кВт.ч.

Несмотря на то, что ГТУ по экономичности заметно уступают паросиловым энергоблокам, благодаря более низким капиталовложениям, простоте сооружений, малой потребности в охлаждающей воде, высоким маневренным характеристикам – газотурбинные установки находят применение в качестве пиковых мощностей в энергосистемах (ГРЭС-3 Мосэнерго, Ивановская ГРЭС, Краснодарская ТЭЦ, Симферопольская ГРЭС) и базовых энергетических установок в отдаленных районах и изолированных энергосистемах (Якутская ГРЭС, Небит-Дагская ГРЭС, плавучие электростанции «Северное сияние», передвижные электростанции на Севере и т.п.).

Газовые турбины мощностью до 25 МВт, выполненные на базе авиационных и судовых двигателей, имеют независимые валы для привода компрессора (группы компрессоров) и генератора. Мощные современные ГТУ выполняются одновальными с единым приводом компрессора и генератора.

После освоения в энергетическом газотурбостроении газовых турбин с высокими начальными температурами газов на уровне 1100-1300°C температура газов на выходе газовых турбин достигла значений 520-550°C и утилизация теплоты стала возможной путем выработки пара достаточных параметров для его использования в мощных паросиловых установках. При применении газовых турбин с более низкими начальными температурами газов, когда на выходе их температура составляет 350-450°C, теплота газов может использоваться в котлах паросиловой установки, для подогрева питательной воды и конденсата, для производства пара для технологических нужд, для подогрева сетевой воды.

Наиболее экономичной ПГУ является установка, работающая по чисто утилизационной схеме, в которой утилизируемая теплота уходящих газов используется для производства пара, направляемого в паровую турбину. В утилизационных ПГУ мощность газовых турбин достигает 60-65 % мощности энергоблока, а КПД нетто 50-51%. При сооружении новых мощностей на электростанции, сжигающих только газовое топливо, приоритет за ПГУ утилизационного типа неоспорим. В этом типе ПГУ максимальная единичная мощность блока определяется мощностью газовых турбин. Газотурбинная надстройка по мощности может составлять 1/3 мощности паровой турбины, а с учетом повышения мощности паровой турбины, при отключении отборов пара на ПВД, мощность блока после надстройки повышается на 50%. КПД ПГУ с вытеснением регенерации на базе блока СКД мощностью 300 МВт достигает 45%.

В процессе освоения газовых турбин, когда температура газов перед газовыми турбинами определялась уровнем 700-800°C, были разработаны ПГУ с высоконапорным парогенератором (Невинномысская ГРЭС, ПГУ-170). По схеме ПГУ с высоконапорным парогенератором (ВПП) топливо сжигается в топке под давлением, а теплота сожженного топлива одновременно используется для производства пара и подачи в газовую турбину горячих газов. Схема достаточно сложна, имеет дополнительные камеры сгорания, а сравнительно малая мощность газовой турбины (около 15%) делает цикл малоэкономичным. Основным преимуществом ПГУ с ВПП - малые металлоемкости и габариты котла.

Следует отметить, что для оперативного резерва и пикового режима должны выбираться наиболее дешевые и мобильные типы газовых турбин. Для полупиковых и базовых режимов (как для автономно работающих ГТУ, так и для ГТУ, работающих в составе ПГУ) должны использоваться наиболее экономичные газотурбинные двигатели.

Специфические условия эксплуатации оборудования в составе ГТУ и ПГУ. Технические требования к газотурбинным установкам изложены в ГОСТ 29328-92 «Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические требования» и в главе 4.6 «Правил технической эксплуатации электростанций и сетей».

Оборудование ГТУ выполняется в виде блочных конструкций. Блоки должны быть готовыми к монтажу без разборки и ревизии. У ГТУ со свободной турбиной более высокий уровень заброса частоты вращения при сбросах нагрузки. ГТУ с подобными турбинами не могут разворачиваться при пусках от генератора через ТПУ, но на разворот требуются значительно меньшие мощности.

Номинальная скорость пуска и нагружения устанавливается в ТУ на ГТУ конкретного типа заводам-изготовителям и обычно составляет для ГТУ мощностью до 25 МВт – 10 мин., для ГТУ большей мощностью – до 20 мин.

Технико-экономическое обоснование применения ГТУ-ТЭЦ. Самым эффективным способом энергоснабжения и энергосбережения в мировой практике признан способ комбинированного производства электрической и тепловой энергии на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). При этом для производства электрической энергии в газотурбинных установках используется природный газ, а для производства тепловой энергии – низко-потенциальная теплота отработавшего в турбине газа. За счет утилизации этого тепла покрывается более 70% годовой потребности в тепловой энергии. Водогрейные котлы, в топках которых сжигается природный газ, используются, как правило, для снятия пиковых тепловых нагрузок в наиболее холодные периоды отопительного сезона и обеспечивают выработку до 30% годовой потребности.

Газотурбинные установки малой и средней мощности (2,5-30 МВт) найдут применение при реконструкции и модернизации систем энергоснабжения промышленных предприятий Белгородской области, систем теплоснабжения жилищно-коммунального хозяйства.

Газотурбинные установки большой мощности (до 100 МВт и более) целесообразно использовать в системах централизованного тепло- и электроснабжения крупных городов и горно-металлургического комплекса области.

В настоящее время известно много технологических схем ГТУ, каждая из которых учитывает специфику их применения и предъявляемые к ним требования.

Они отличаются друг от друга экономичностью, параметрами и формой теплоносителя, но основная идея высокоэффективного применения ГТУ – утилизация теплоты выхлопных газов (комбинированная схема) на ГТУ-ТЭЦ.

Основными преимуществами газотурбинных электростанций являются:

- низкий удельный расход условного топлива на производство электроэнергии (150...180 г/кВт.ч) по сравнению с действующими ГРЭС (360...390 г/кВт.ч);
- меньшие на 30...70 % удельные капитальные вложения;
- сокращенные в 2...3 раза сроки строительства;
- низкая удельная численность эксплуатационного персонала;
- пониженные в 2...3 раза выбросы вредных веществ в окружающую среду;
- отсутствие потребности в системах технического водоснабжения;
- максимальная приближенность к потребителю (не требуется строить дополнительные ЛЭП и подстанции 110...500 кВ);
- сокращение затрат в газодобывающую отрасль и магистральные газопроводы.

При реконструкции существующих котельных дополнительную экономию можно получить путем внедрения комбинированной схемы производства энергии за счет уменьшения затрат на строительство подъездных путей, здания для ГТУ-ТЭЦ, систем топливоподачи и дымоудаления, водоподготовительной установки и пр.

Один из показателей энергетической эффективности ТЭЦ – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении; ее зависимость на ГТУ-ТЭЦ от к.п.д. газовой турбины представлена на рис. 1.

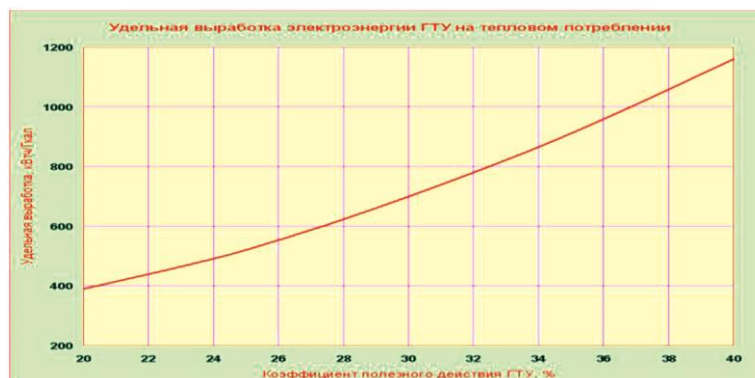


Рис. 1. Удельная выработка электроэнергии ГТУ-ТЭЦ на тепловом потреблении
Fig. 1. Specific power generation of GTU-TPP for heat consumption

Обсуждение результатов. Применение современных газотурбинных технологий и высокий уровень их самоокупаемости положительно влияют как на процесс привлечения инвестиций, так и на наращивание степени надежности и экономичности основных производств области: сельскохозяйственные перерабатывающие предприятия, горно-металлургический комплекс и др. В г. Белгороде построены и действуют две газотурбинные ТЭЦ с утилизацией теплоты отработавших газов в котлах-утилизаторах на ГТУ-ТЭЦ «Луч» и на Белгородской ТЭЦ мощностью каждой по 60 МВт (2 x 30 МВт).

Современное состояние экономики Белгородской области таково, что при суммарной присоединенной нагрузке потребителей порядка 2 000 МВт поставки электроэнергии на 93% осуществляются с федеральных электростанций по магистральным линиям электропередачи. Таким образом, ее электроснабжение полностью зависит от ситуации, складывающейся на федеральном оптовом рынке электроэнергии и мощности (ФОРЭМ) [7].

Сохранение ориентации на электроснабжение области преимущественно от внешних энергоисточников через оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) станет одним из основных сдерживающих факторов ее экономического роста. Современное состояние экономики области таково, что при суммарной присоединенной нагрузке потребителей до 2 000 МВт поставки электроэнергии на 95% осуществляются с федеральных электростанций по магистральным линиям электропередачи. Таким образом, ее электроснабжение полностью зависит от ситуации, складывающейся на ОРЭМ.

Основными потребителями электроэнергии в Белгородской области являются устойчиво работающие и постоянно наращивающие свое производство энергоемкие предприятия одного из крупнейших в мире горно-металлургического комплексов.

Область не обременена, как другие регионы, большим количеством морально и физически устаревших паротурбинных электростанций, которые даже после их техперевооружения не смогут составить конкуренцию новым электростанциям, использующим современные газотурбинные технологии. Кроме электроэнергии в область по магистральным газопроводам поступает также природный газ, значительная доля которого используется неэффективно – на подогрев воды для горячего водоснабжения и отопления.

Таким образом, экономика Белгородской области находится в двойной энергетической зависимости, обусловленной: постоянно возрастающим потреблением производимой в других регионах электроэнергии; ростом использования природного газа для покрытия потребности промышленности, а также нагрузок отопления и горячего водоснабжения (80%).

Подъем экономики области немыслим без снижения стоимости энергетической продукции и, как следствие, снижения затрат на производство, например, энергоемкой продукции ее

горно-металлургического комплекса. Реальный путь решения этой проблемы – сократить на 15...20% расход природного газа в промышленности и в жилищно-коммунальном секторе за счет внедрения энергосберегающих мероприятий и направить его на производство электроэнергии по комбинированному циклу на собственных газотурбинных ТЭЦ (ГТУ-ТЭЦ) [8]. Это, в свою очередь, на 50-70% сократит поставки электроэнергии в область с ОРЭМ. Одним из путей развития энергетики региона является использование в системах теплоснабжения ГТУ с энергетическим впрыском пара в камеру сгорания, ГТУ-STIG (Steam Injection Gas Turbine).

ГТУ с энергетическим впрыском пара в камеру сгорания. ГТУ-STIG являются одним из перспективных направлений их применения в источниках централизованного теплоснабжения. Под энергетическим впрыском обычно понимают подачу в камеру сгорания газотурбинной установки пара, произведенного в котле-утилизаторе теплотой уходящих газов газовой турбины, в количестве 10-25% по отношению к расходу воздуха поступающего через компрессор. Такой впрыск обеспечивает значительный рост КПД (на 20-60%) и мощности ГТУ (в 1,5-2,0 раза).

Подробный обзор состояния разработок ГТУ-STIG (с энергетическим впрыском пара в камеру сгорания) за рубежом представлен в [9-15].

Газотурбинные электростанции более эффективнее паротурбинных, а в связи с тем, что впрыск пара в камеру сгорания ГТУ дополнительно повышает их экономичность и экологичность, целесообразнее их применение в системах централизованного теплоснабжения городов. ТЭЦ, источники систем теплоснабжения, размещаются, как правило, в центрах теплопотребления в пределах радиуса эффективного теплоснабжения населенного пункта. Поэтому, исходя из вышеизложенного, предлагается в системах централизованного теплоснабжения городов, во-первых, вместо паротурбинных ТЭЦ применять газотурбинные установки, во-вторых, для более эффективного применения ГТУ целесообразно предусматривать в их технологической схеме энергетический впрыск пара.

На рис. 2 показан как один из предпочтительных вариантов ГТУ-ТЭЦ с впрыском пара. Эта задача актуальна, например, для Белгородской области, установленная мощность объектов генерации, на территории которой составляет 251 МВт, из них 185 МВт приходится на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и 66 МВт на станции промышленных предприятий (сахарные заводы).

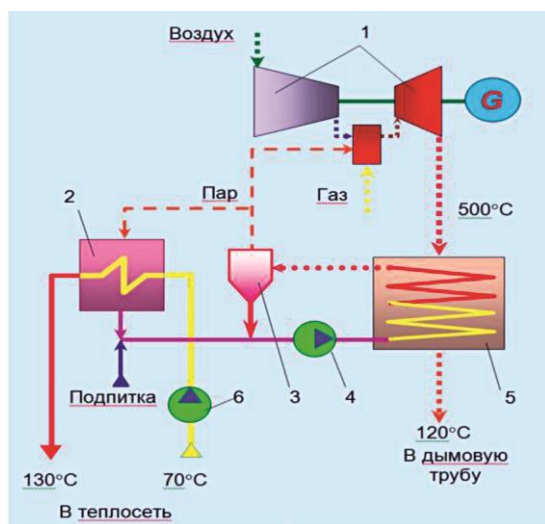


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема газотурбинной электростанции 25 МВт с энергетическим впрыском пара в камеры сгорания ГТУ

1 - ГТУ 25 МВт с энергетическим впрыском пара; 4 - Питательный насос; 2 - Пароводяной подогреватель сетевой воды производительностью 50 Гкал/ч, 850 т/ч; 5 - Паровой котел-утилизатор; 3 - Сепаратор пара; 6 - Сетевой насос.

Fig. 2. Schematic diagram of a gas turbine power plant of 25 MW with energy injection of steam into the combustion chamber of a gas turbine

1 - GTU 25 MW with energy injection of steam; 4 - feed pump; 2 - Steam-water heater of network water with a productivity of 50 Gcal / h, 850 t / h; 5 - Steam recovery boiler; 3 steam separator; 6 Mains pump.

Эти электростанции покрывает менее 5% потребности региона в электроэнергии. Поэтому теплоснабжение потребителей обеспечивается преимущественно от отопительных котельных.

ГТУ 25 МВт работают в базовом режиме со сбросом отработавших газов с содержанием кислорода 15% и температурой 450-500 °С в ПКУ. Вырабатываемый пар используется: в летний период – преимущественно в качестве энергетического впрыска в ГТУ, в зимний период – преимущественно для подогрева сетевой воды на отопление и горячее водоснабжение потребителей. Пиковая отопительная нагрузка кратковременно покрывается за счет дополнительного сжигания природного газа в ПКУ.

Основные научно-технические проблемы, которые решаются при создании ГТУ-ТЭЦ по предложенной технологической схеме с впрыском пара в камеру сгорания: подготовка умягченной воды требуемого качества для восполнения безвозвратных потерь пара на впрыск в камеру сгорания ГТУ с расходом ориентировочно 1 т/МВт·ч; разработка прямоточного парового котла-утилизатора оптимальной конструкции. Прогноз мирового выпуска газотурбинного оборудования в 2012–2021 гг. представлен в [16].

Вывод. Учитывая положительный мировой опыт, уровень развития газотурбинных технологий и наличие природного газа, целесообразно и необходимо использовать ГТУ и ПГУ в топливно-энергетическом комплексе, промышленности, сельском хозяйстве и коммунальной энергетике при техническом перевооружении этих отраслей, проектировании и строительстве новых источников энергии.

Повсеместное (в центрах тепловых и электрических нагрузок) внедрение газотурбинных установок позволит сократить потребность экономики региона в энергетическом топливе и обеспечить прирост энергетических мощностей без строительства новых неэкономичных и сложных паротурбинных ГРЭС.

Для выбора оптимальных вариантов технологических схем и оборудования ГТУ и ПГУ с учетом специфики и климатических условий региона целесообразно проведение комплекса прикладных научно-исследовательских работ. При этом необходимо максимально использовать опыт и технологии передовых зарубежных стран и Российской Федерации.

Библиографический список:

1. Приказ Минэнерго России от 13.08.2012 № 387. URL: <http://lawru.info/dok/2012/08/13/n20065.htm>
2. Кожуховский И.С. Перспективы развития тепловой энергетики России / АГБЭ. VII ежегодная конференция газеты ВЕДОМОСТИ. РОССИЙСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Москва, 2013.
3. Скиба М.В. Тенденции развития рынка газотурбинных установок // Вестник Самарского государственного университета. Серия «Экономика и управление». 2015. № 9/2 (131). с. 156–164.
4. Буланин В.А., Захидов Р.А. Пути совершенствования теплоэнергетики Узбекистана // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики", № 2, 1992. с. 23-28.
5. Баринберг Г.Д., Бененсон Е.И. Влияние параметров свежего пара, промежуточного перегрева и единичной мощности на экономичность теплофикационных турбин. - В сб.: Опыт создания турбин и дизелей. Свердловск, Ср.-Уральск. кн. изд-во, 1969. с. 97-102.
6. Правила предоставления из федерального бюджета субсидий российским организациям на финансовое обеспечение части затрат на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в рамках создания производства газовых турбин большой мощности. [Постановление Правительства России от 21.03.2019 № 301]. URL: <http://government.ru/news/36182/>.
7. Вольфберг Д.Б. XIV конгресс мировой энергетической конференции. - Энергохозяйство за рубежом, 1990, № 1. с. 1-5.
8. Буланин В.А., Буланин А.В., Лапин Е.А. Газотурбинные технологии – в энергетику Белгородской области // Журнал "Газотурбинные технологии", 2001, № 1 (10), стр. 14-16.
9. Масленников В.М., Выскубенко Ю.А., Штеренберг В.Я. (СССР), Смитсон Г.Р., Робсон Ф.Л., Лемон А.В., Лохон В.Т. (США). Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией топлива и экологические проблемы энергетики. М.: Наука, 1983. 264 с.
10. R. Kadi, A. Bouam, S. Aissani. Analyze of gas turbine performances with the presence of the steam water in the combustion chamber, Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007), p. 327 – 335
11. H. Haselbacher, "Performance of Water/Steam Injected Gas Turbine Power Plants Consisting of Standard Gas Turbines and Turbo Expanders", Int. J. Energy Technology and Policy, Vol. 3, No1/2, 2005.

12. K. Mathioudakis, "Evaluation of Steam and Water Injection Effects on Gas Turbine Operation using Explicit Analytical Relations", *Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 216, Part A: J Power and Energy 2002.
13. D.Y. Cheng & A.L.C. Nelson, "The Chronological Development of the Change Cycle Steam Injected Gas Turbine During the Past 25 Years", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002*, Amsterdam, the Netherlands, June 3-6, 2002.
14. D. Zhao, Y. Ohno, T. Furuhashi, H. Yamashita, N. Arai and Y. Hisazumi, "Combustion Technology in a Novel Gas Turbine System with Steam Injection and Two-Stage Combustion", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 34, No9, pp. 1159 - 1164, 2001.
15. Y. Ohno, D. Zhao, T. Furuhashi, H. Yamashita, N. Arai and Y. Hisazumi, "Combustion Characteristics and NOx Formation of a Gas Turbine System with Steam Injection and Two-Stage Combustion", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2001.
16. Ольховский Г.Г., Гончаров В.В. Конструкции некоторых современных ГТУ и ПГУ и прогноз мирового выпуска газотурбинного оборудования в 2012–2021 гг. (обзор). Москва, 2014 / Ассоциация газотурбинных технологий для энергетики и промышленности. Москва, 2014.

References:

1. Order of the Ministry of Energy of Russia dated 13.08.2012 No. 387. URL: <http://lawru.info/dok/2012/08/13/n20065.htm>. (In Russ.)]
2. Kozhukhovskiy I.S. Perspektivy razvitiya teplovoy energetiki Rossii / AGBE. VII yezhegodnaya konfe-rentsiya gazety VEDOMOSTI. ROSSIYSKAYA ENERGETIKA. Moskva, 2013. [Kozhukhovskiy I.S. Prospects for the development of thermal energy in Russia / AGBE. VII annual conference of the newspaper Vedomosti. RUSSIAN ENERGY. Moscow 2013. (In Russ.)]
3. Skiba M.V. Tendentsii razvitiya rynka gazoturbinnnykh ustanovok // Vestnik Samarskogo gosudar-stvennogo uni-versiteta. Seriya «Ekonomika i upravleniye». 2015. № 9/2 (131). s. 156–164. [Skiba M.V. Gas Turbine Plant Market Development Trends // Bulletin of Samara State University. Series "Economics and Management". 2015. No. 9/2 (131). pp. 156–164 (In Russ.)]
4. Bulanin V.A., Zakhidov R.A. Puti sovershenstvovaniya teploenergetiki Uzbekistana// Uzbekskiy zhurnal "Problemy informatiki i energetiki", № 2, 1992. s. 23-28. [Bulanin V.A., Zakhidov R.A. Ways to improve the heat power industry of Uzbekistan // Uzbek Journal "Problems of Informatics and Energy", No. 2, 1992. pp. 23-28. (In Russ.)]
5. Barinberg G.D., Benenson Ye.I. Vliyaniye parametrov svezhego para, promezhutochnogo peregreva i yed-nichnoy moshchnosti na ekonomichnost' teplofikatsionnykh turbin. - V sb.: Opyt sozdaniya turbin i dizeley. Sverdlovsk, Sr.-Ural'sk. kn. izd-vo, 1969. s. 97-102. [Barinberg G. D., Benenson E. I. Influence of parameters of fresh steam, intermediate overheating and unit power on the efficiency of cogeneration turbines. - In: The experience of creating turbines and diesel engines. Sverdlovsk, Sr.-Uralsk. Prince Publishing House, 1969. pp. 97-102. (In Russ.)]
6. Pravila predostavleniya iz federal'nogo byudzheta subsidiy rossiyskim organizatsiyam na finansovoye obespeche-niye chasti zatrat na provedeniye nauchno-issledovatel'skikh, opytno-konstruktorskikh i tekhnologicheskikh rabot v ramkakh sozdaniya proizvodstva gazovykh turbin bol'shoy moshchnosti. [Postanovleniye Pravitel'stva Rossii ot 21.03.2019 № 301]. URL: <http://government.ru/news/36182>. [Rules for the provision of subsidies from the federal budget to Russian organizations for the financial provision of a part of the costs of research, development and technological work as part of the creation of the production of high-power gas turbines. [Decree of the Government of Russia dated March 21, 2019 No. 301]. URL: <http://government.ru/news/36182>. (In Russ.)]
7. Vol'fberg D.B. KHIV kongress mirovoy energeticheskoy konferentsii. - Energokhozyaystvo za rubezhom, 1990, № 1. s. 1-5. [Wolfberg D.B/ XIV Congress of the World Energy Conference. - Energy Economy Abroad, 1990, No. 1. pp. 1-5. (In Russ.)]
8. Bulanin V.A., Bulanin A.V., Lapin Ye.A. Gazoturbinnnyye tekhnologii – v energetiku Belgorodskoy ob-lasti // Zhurnal "Gazoturbinnnyye tekhnologii", 2001, № 1 (10), str. 14-16. [Bulanin V.A., Bulanin A.V., Lapin E.A. Gas-turbine technologies - into the energy sector of the Belgorod region // Journal "Gas-turbine technologies", 2001, No. 1 (10), pp. 14-16. (In Russ.)]
9. Maslennikov V.M., Vyskubenko YU.A., Shterenberg V.YA. (SSSR), Smitson G.R., Robson F.L., Lemon A.V., Lokhon V.T. (SSHA). Parogazovyye ustanovki s vnitrtsiklovoy gazifikatsiyey topliva i ekologicheskiye problemy ener-getiki. M.: Nauka, 1983. 264 s. Maslennikov V.M., Vyskubenko Yu.A., Shterenberg V.Ya. (USSR), Smithson G.R., Rob-son F.L., Lemon A.V., Lohon V.T. (USA). Combined cycle gas turbine gasification plants and environmental problems of energy. M.: Nauka, 1983. 264 p.10. R. Kadi, A. Bouam, S. Aissani. Analyze of gas turbine performances with the pres-ence of the steam water in the combustion chamber, *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen* (2007), pp. 327 – 335. (In Russ.)]
11. H. Haselbacher, "Performance of Water/Steam Injected Gas Turbine Power Plants Consisting of Standard Gas Turbines and Turbo Expanders", *Int. J. Energy Technology and Policy*, Vol. 3, No1/2, 2005.
12. K. Mathioudakis, "Evaluation of Steam and Water Injection Effects on Gas Turbine Operation using Explicit An-alytical Relations", *Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 216, Part A: J Power and Energy 2002.
13. D.Y. Cheng & A.L.C. Nelson, "The Chronological Development of the Change Cycle Steam Injected Gas Tur-bine During the Past 25 Years", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002*, Amsterdam, the Netherlands, June 3-6, 2002.

14. D. Zhao, Y. Ohno, T.Furuhata, H. Yamashita, N. Arai and Y. Hisazumi, "Combustion Technology in a Novel Gas Turbine System with Steam Injection and Two-Stage Combustion", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 34, No9, pp. 1159 - 1164, 2001.

15. Y. Ohno, D. Zhao, T. Furuhata, H. Yamashita, N. Arai and Y. Hisazumi, "Combustion Characteristics and NOx Formation of a Gas Turbine System with Steam Injection and Two-Stage Combustion", Journal of Chemical Engineering of Japan, 2001.

16. Ol'khovskiy G.G., Goncharov V.V. Konstruktsii nekotorykh sovremennykh GTU i PGU i prognoz mirovogo vypuska gazoturbinnogo oborudovaniya v 2012–2021 gg. (obzor). Moskva, 2014 / Assotsiatsiya gazoturbinnyykh tekhnologiy dlya energetiki i promyshlennosti. Moskva, 2014. [Olkhovsky G.G., Goncharov V.V. The design of some modern gas turbines and gas turbines and the forecast for the global production of gas turbine equipment in 2012–2021. (overview). Moscow, 2014 / Association of gas turbine technologies for energy and industry. Moscow, 2014. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

Буланин Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, генеральный директор; e-mail: v_bulanin@mail.ru

Information about the author:

Vladimir A. Bulanin, Cand. Sci. (Technical), General Director; e-mail: v_bulanin@mail.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.12.2019.

Принята в печать 18.01.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 10.12.2019.

Accepted for publication 18.01.2020.

Для цитирования: Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов, А.А. Дюсенгалиев, Ш.З. Байрамов. Анализ возможности использования вторичных энергоресурсов предприятий пищевой промышленности с применением специальной холодильной техники. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1):19-29. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-19-29

For citation: L.V. Galimova, D.Z. Bayramov, A.A. Dyusengaliyev, Sh.Z. Bayramov. Analysis of the possibility of using secondary energy resources in food industry enterprises using special refrigeration equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1):19-29. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-19-29

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-19-29

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов, А.А. Дюсенгалиев, Ш.З. Байрамов

Астраханский государственный технический университет,

414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия

Резюме. Проблемы энергосбережения в настоящее время имеют важное значение. В области холодильной техники к энергосберегающим системам относятся теплоиспользующие абсорбционные холодильные машины (АХМ). **Целью** работы является изучение возможности использования водоаммиачной абсорбционной холодильной машины для повышения эффективности работы пищевого предприятия. **Метод.** На основании анализа исходных данных предприятия определены возможные режимы работы холодильной машины с учётом различных видов греющих и охлаждающих источников, предложенных в задании. По результатам расчётов определены характеристики одноступенчатой схемы и схемы с двухступенчатой абсорбцией, подтверждающие возможность повышения эффективности предприятия за счёт использования вторичных энергоресурсов. **Результат.** Предварительный анализ был проведён по расчету величины интервала дегазации, на основании чего обоснован выбор исходных данных для проектирования одноступенчатой абсорбционной водоаммиачной холодильной машины (АВХМ). Расчёт вели с использованием диаграммы $\xi - i$ для водоаммиачного раствора. **Вывод.** Проведенный анализ 4-х заданных заказчиком условий дал возможность определить два расчетных режима для проектирования абсорбционной водоаммиачной холодильной машины с хорошими показателями работы. Для условий работы с низким значением интервала дегазации предложена схема абсорбционной водоаммиачной холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоиспользующая холодильная машина, режимы работы, тепловой расчёт, пищевая промышленность

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SECONDARY ENERGY RESOURCES IN FOOD INDUSTRY ENTERPRISES USING SPECIAL REFRIGERATION EQUIPMENT

L.V. Galimova, D.Z. Bayramov, A.A.Dyusengaliev, Sh.Z. Bayramov

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

Abstract. Aim. Due to the current priority given to energy conservation issues, a promising research avenue in the field of refrigeration consists in the developing of energy-saving systems based on heat-recovery absorption refrigerators. The aim of the work is to study the possibility of using a water-ammonia absorption refrigeration machine to increase the efficiency of food production facilities. **Method.** Based on an analysis of the initial enterprise data, the possible operating modes of the refrigeration machine were determined considering the various types of heating and cooling sources proposed in the task specification. The identification of the characteristics of single-stage and two-stage absorption schemes confirmed the possibility of increasing the enterprise's efficiency through the use of secondary energy resources. **Results.** The choice of initial data for the design of a single-stage absorption water-ammonia refrigeration machine (AVXM) was justified on the basis of a preliminary analysis carried out to calculate the size of the degassing interval. The calculation was carried out using a $\xi - i$ diagram for the ammonia water solution. **Conclusion.** Two prior conditions for the design of a high-performance absorption water-ammonia refrigeration machine were determined on the basis of an analysis of four conditions set by the customer. For operating conditions with a low degassing interval value, a scheme for an absorption water-ammonia refrigeration machine employing two-stage absorption is proposed.

Keywords: energy saving, heat-consuming refrigerating machine, operating modes, heat calculation, food industry

Введение. Абсорбционные холодильные машины работают, потребляя энергию в виде теплоты, причём в ряде случаев используются так называемые вторичные тепловые ресурсы, такие как тепловые сбросы технологических процессов. Изучение возможности использования абсорбционной водоаммиачной холодильной машины (АВХМ) для решения частных проблем предприятия пищевой промышленности было проведено на основе задания ЗАО «Янтарь», г. Воронеж, подписанного главным инженером Зелениным В.А. [3, 11- 13].

Постановка задачи. Целью работы является изучение возможности использования водоаммиачной абсорбционной холодильной машины для повышения эффективности работы пищевого предприятия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Изучение возможностей использования различных источников тепла для работы АВХМ на основании изучения результатов научных исследований.
2. Изучение характера источников тепла в соответствии с заданиями заказчика.
3. Предварительный анализ возможности использования предоставленных источников по расчету величины интервала дегазации.
4. Обоснование выбора расчетных режимов.
5. Разработка схем одноступенчатой АВХМ и АВХМ с 2х ступенчатой абсорбцией.

Методы исследования. На основании анализа задания предприятия определены возможные режимы работы машины с учётом различных видов греющих и охлаждающих источников, предложенных в задании. По результатам расчётов определены характеристики одноступенчатой схемы и схемы с двухступенчатой абсорбцией, подтверждающие возможность повышения эффективности предприятия за счёт использования вторичных энергоресурсов [10, 14, 17, 18].

На основании задания заказчика определены предполагаемые режимы работы АВХМ:

1. Режим работы:

- a) греющий источник - вода с параметрами 90/80° C и расходом 40 м³/ч;
- b) охлаждающая среда - артезианская вода с температурой 20 °C;
- c) охлаждаемая среда - 0/5 °C;
- d) режим работы - сезонный (теплый период года) в будние дни с 07:00 до 17:00;

2. Режим работы:

- a) греющий источник - вода с параметрами 90/80° C и расходом 40 м³/ч;
- b) охлаждающая среда - наружный воздух с температурой 29/34 °C;
- c) охлаждаемая среда - 0/5 °C;
- d) режим работы - сезонный (теплый период года) в будние дни с 07:00 до 17:00;

3. Режим работы:

- a) греющий источник - пар аммиака с температурой 70° C и расходом 12000 м³/ч и давлением 10 атм;

- b) охлаждающая среда - артезианская вода с температурой 20 °C;
- c) охлаждаемая среда - 0/5 °C;
- d) режим работы - сезонный (теплый период года);

4. Режим работы:

- a) греющий источник - пар аммиака с температурой 70° C и расходом 12000 м³/ч и давлением 10 атм;

- b) охлаждающая среда - наружный воздух с температурой 29/34 °C;
- c) охлаждаемая среда - 0/5 °C;
- d) режим работы - сезонный (теплый период года);

Предварительный анализ возможности использования предоставленных источников греющего тепла был проведен по расчету величины интервала дегазации, на основании чего, обоснован выбор исходных данных для проектирования одноступенчатой АВХМ. Расчет вели с использованием диаграммы $\xi - i$ для водоаммиачного раствора [4, 5, 6, 9].

Определение исходных данных для 1-го режима работы:

Температура греющего источника, $t_h = 90^\circ\text{C}$

Расход греющего источника, $G_h = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$

Температура охлаждающей воды, $t_{w1} = 20^\circ\text{C}$

Температура охлаждаемой среды, $t_{охл} = 5^\circ\text{C}$

Температура конденсации, °C,

$$t_k = t_{w1} + \Delta t = 20 + 5 = 25$$

Давление конденсации P_k определяется по температуре t_k для чистого аммиака, МПа

$$P_k = 1,0058$$

Низшая температура кипения, °C,

$$t_o = t_{охл} - \Delta t = 5 - 10 = -5$$

Давление насыщения паров аммиака P_o' определяется по температуре t_o , МПа

$$P_o' = 0,353$$

Разность давления кипения выбирается, исходя из нормированного значения, МПа

$$\Delta P_o = (0,01 \div 0,005)$$

Расчетное давление в испарителе, МПа

$$P_o = P_o' - \Delta P_o = 0,353 - 0,01 = 0,343$$

Низшая температура раствора t_4 , выходящего из абсорбера, определяется по температуре охлаждающей воды t_{w1} , °C,

$$t_4 = t_{w1} + \Delta t = 20 + 5 = 25$$

Высшая температура раствора t_2 , выходящего из генератора, определяется по температуре греющего источника t_h , °C,

$$t_2 = t_h - \Delta t = 90 - 10 = 80$$

Температура слабого раствора при выходе из теплообменника t_3 , °C,

$$t_3 = t_4 + \Delta t = 25 + 5 = 30$$

Параметры узловых точек циклов для данной схемы машины приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры узловых точек
Table 1. The parameters of the nodal points

Состояние вещества State of substance	t, °C	P, МПа	ξ кг/кг
Жидкость Liquid			
После генератора After generator	t ₂ = 80	P _k = 1,0058	ξ _a = 0,41
После абсорбера After the absorber	t ₄ = 25	P _o = 0,419	ξ _r = 0,56
В начале кипения в генераторе At the beginning of the boil in the generator	t ₁ = 57	P _k = 1,0058	ξ _r = 0,56
После конденсатора After capacitor	t ₆ = 25	P _k = 1,0058	ξ _d = 1
Пар Steam			
Равновесный крепкому раствору в генераторе Equilibrium to a strong solution in the generator	t _{d'} = 47	P _k = 1,0058	ξ _{d'} = 0,99
Выходящий из генератора Coming out of the generator	t ₅ = 40	P _k = 1,0058	ξ _d = 1

Интервал дегазации,

$$\Delta\xi = \xi_r - \xi_a = 0,56 - 0,41 = 0,15$$

Аналогично проводим расчет и для оставшихся 3-х режимов работы. Каждый из режимов рассчитывался в 3-х вариантах температур кипения t_o = 0,-3,-5° С. На основании расчёта по заданным заказчиком условиям установлено, что величина интервала дегазации изменяется в пределах от -0,005 до 0,15.

В качестве расчётных выбраны 1-й и 3-й режимы. Режим 4 не может быть использован, так как интервал дегазации меньше оптимального значения 0,04, а для 2-го режима интервал дегазации имеет отрицательное значение.

Поверочный расчёт одноступенчатой АВХМ для 2-х режимов работы проведён с использованием известной методики [2, 15, 16].

Исходные данные для 1-го режима работы:

Температура греющего источника, t_h = 90°С
Расход греющего источника, G_h = 40 м³/ч
Температура охлаждающей воды, t_{w1} = 20°С
Температура охлаждаемой среды, t_{охл} = 5°С

Тепловая нагрузка на генератор Q_h, кВт,

$$Q_h = G_h \times c_p \times \Delta t = 11,1 \times 4,2 \times 10 = 466,7$$

где:

$$G_h = \frac{40000}{3600} = 11,1 \text{ - расход греющего источника, кг/с;}$$

$$c_p = 4,2 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{С} \text{ - теплоемкость воды при } 90^\circ\text{С [7];}$$

$$\Delta t = 10^\circ\text{С} \text{ - разность температур на входе и выходе в генератор;}$$

Масса пара аммиака, поступающего в конденсатор D, кг/с,

$$D = \frac{Q_h}{q_h} = \frac{466,7}{1695,1} = 0,28$$

Полные тепловые нагрузки аппаратов холодильной машины, кВт,

$$Q_a = q_a \times D = 1550,7 \times 0,28 = 434,2$$

$$Q_k = q_k \times D = 1200 \times 0,28 = 336$$

$$Q_o = q_o \times D = 1290 \times 0,28 = 361,2$$

$$Q_R = q_R \times D = 54,73 \times 0,28 = 15,3$$

Тепловой коэффициент холодильной машины

$$\zeta = \frac{Q_o}{Q_h} = \frac{361,2}{466,7} = 0,77$$

Исходные данные для 3-го режима работы:

Температура греющего источника, $t_h = 70^\circ\text{C}$
Расход греющего источника, $G_h = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$
Температура охлаждающей воды, $t_{w1} = 20^\circ\text{C}$
Температура охлаждаемой среды, $t_{охл} = 5^\circ\text{C}$

Тепловая нагрузка на генератор Q_h , кВт,

$$Q_h = G_h \times c_p \times \Delta t = 3,33 \times 3,1 \times 10 = 103,23$$

где:

$$G_h = \frac{12000}{3600} = 3,33 - \text{расход греющего источника, кг/с;}$$

$$c_p = 3,1 \text{ кДж/кг}^\circ\text{C} - \text{теплоемкость воды при } 70^\circ\text{C} [7];$$

$$\Delta t = 10^\circ\text{C} - \text{разность температур на входе и выходе в генератор;}$$

Масса пара аммиака, поступающего в конденсатор D, кг/с,

$$D = \frac{Q_h}{q_h} = \frac{103,23}{1600} = 0,06$$

Полные тепловые нагрузки аппаратов холодильной машины, кВт,

$$Q_a = q_a \times D = 1596 \times 0,06 = 95,76$$

$$Q_k = q_k \times D = 1215 \times 0,06 = 72,9$$

$$Q_o = q_o \times D = 1335 \times 0,06 = 80,1$$

$$Q_R = q_R \times D = 54,73 \times 0,06 = 3,28$$

Тепловой коэффициент холодильной машины

$$\zeta = \frac{Q_o}{Q_h} = \frac{80,1}{103,23} = 0,75$$

Обсуждение результатов. Результаты расчётов подтвердили возможность использования одноступенчатой АВХМ в заданных условиях и могут быть использованы при проектировании элементов и системы в целом.

В развитие темы данного исследования рассмотрена возможность использования АХМ для режима 2 с величиной интервала дегазации, меньшей оптимального значения, в виде схемы с двухступенчатой абсорбцией. Пример схемы приведён на рис.1.

Обеспечение работы схемы с двухступенчатой абсорбцией происходит благодаря наличию двух абсорберов, работающих при различных давлениях и подключенных в схему последовательно [7, 19]. Для определения основных характеристик и подтверждения возможностей схемы с двухступенчатой абсорбцией были проведены расчёты цикла [1, 8, 20].

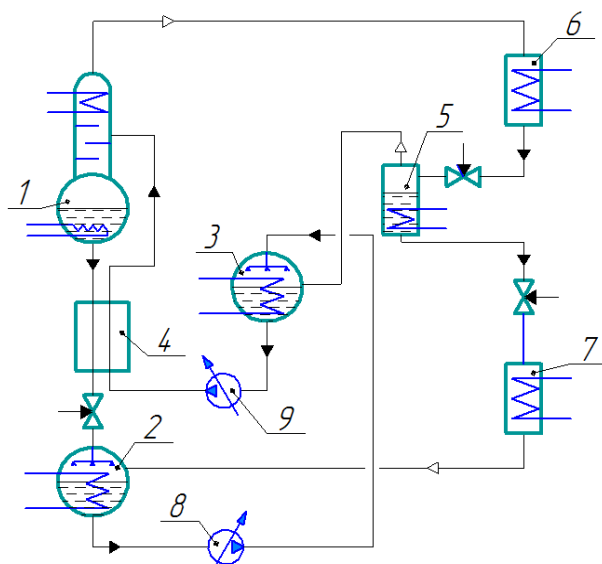


Рис.1 Схема абсорбционной холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией:

1 - генератор, 2 - абсорбер ступени низкого давления, 3 - абсорбер ступени высокого давления, 4 - теплообменник растворов, 5 - испаритель высокого давления, 6 - конденсатор, 7 - испаритель низкого давления, 8 - насос ступени низкого давления, 9 - насос ступени высокого давления

Fig. 1 Scheme of absorption refrigeration machine with two-stage absorption:

1 - generator, 2 - low pressure stage absorber, 3 - high pressure stage absorber, 4 - solution heat exchanger, 5 - high pressure evaporator, 6 - condenser, 7 - low pressure evaporator, 8 - low pressure stage pump, 9 - high pressure stage pump

Исходные данные:

Температура греющего источника, $t_h = 70^\circ\text{C}$
Температура кипения, $t_o = -5^\circ\text{C}$
Температура охлаждающей воды, $t_{w1} = 20^\circ\text{C}$
Температура охлаждаемой среды, $t_{охл} = 5^\circ\text{C}$
Температура конденсации, $^\circ\text{C}$,

$$t_k = t_{w1} + \Delta t = 20 + 5 = 25$$

Давление конденсации P_k определяется по температуре t_k для чистого аммиака, МПа

$$P_k = 1,0058$$

Низшая температура кипения, $^\circ\text{C}$,

$$t_o = t_{охл} - \Delta t = 5 - 5 = 0$$

Давление насыщения паров аммиака P_o' определяется по температуре t_o , МПа

$$P_o' = 0,429$$

Разность давления кипения выбирается, исходя из нормированного значения, МПа

$$\Delta P_o = (0,01 \div 0,005)$$

Расчётное давление в испарителе, МПа,

$$P_o = P_o' - \Delta P_o = 0,429 - 0,01 = 0,419$$

Низшая температура раствора t_4 , выходящего из абсорбера, определяется по температуре охлаждающей воды t_{w1} , $^\circ\text{C}$,

$$t_4 = t_{w1} + \Delta t = 20 + 5 = 25$$

Высшая температура раствора t_2 , выходящего из генератора, определяется по температуре греющего источника t_h , $^\circ\text{C}$,

$$t_2 = t_h - \Delta t = 70 - 10 = 60$$

Температура слабого раствора при выходе из теплообменника t_3 , $^\circ\text{C}$,

$$t_3 = t_4 + \Delta t = 25 + 5 = 30$$

Параметры узловых точек циклов для данной схемы машины приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры узловых точек
Table 2. The parameters of the nodal points

Состояние вещества State of substance	t, °C	P, МПа	ξ кг/кг	i, кДж/кг
Жидкость Liquid				
После генератора After generator	t ₂ = 60	P _k = 1,0058	ξ _a = 0,52	i ₂ = 220
После абсорбера After the absorber	t ₄ = 25	P _o = 0,419	ξ _r = 0,57	i ₄ = 80
В начале кипения в генераторе At the beginning of the boil in the generator	t ₁ = 35	P _k = 1,0058	ξ _{r*} = 0,77	i ₁ = 280
После конденсатора After capacitor	t ₆ = 25	P _k = 1,0058	ξ _d = 1	i ₆ = 490
Пар Steam				
Равновесный крепкому раствору в генераторе Equilibrium to a strong solution in the generator	t _{d'} = 47	P _k = 1,0058	ξ _{d'} = 0,99	i _{d'} = 1710
Выходящий из генератора Coming out of the generator	t ₅ = 40	P _k = 1,0058	ξ _d = 1	i ₅ = 1690

Величина промежуточного давления, P_m, МПа определена как среднее геометрическое между значениями давления конденсации и давления в абсорбере низкой ступени с уточнением по условию соблюдения материального баланса абсорбера высокой ступени:

$$(f - x) * \xi_r + x * 1 = f * \xi_r^*$$

где:

$f = \frac{1 - \xi_a}{\xi_r^* - \xi_a}$ - кратность циркуляции растворного цикла;

$x = \frac{i_7 - i_{710}}{i_{7'} - i_{710}}$ – удельная масса пара, выделившаяся при первом дросселировании;

$$P_m = \sqrt{P_k * P_o} = \sqrt{1,0058 * 0,419} = 0,649$$

Кратность циркуляции раствора f, кг/кг,

$$f = \frac{1 - \xi_a}{\xi_r^* - \xi_a} = \frac{(1 - 0,52)}{(0,77 - 0,52)} = 1,92$$

Удельная масса пара x, кг,

$$x = \frac{i_7 - i_{710}}{i_{7'} - i_{710}} = \frac{(480 - 410)}{(1580 - 410)} = 0,068$$

$$(1,92 - 0,068) * 0,57 + 0,068 * 1 = 1,92 * 0,77$$

$$2,124 = 1,346$$

Погрешность материального баланса равна

$$\delta = \frac{(1,346 - 1,277)}{1,346} * 100 = 5 \%$$

Определение удельных тепловых нагрузок по аппаратам АХМ с двухступенчатой абсорбцией:

Удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг,

$$q_o = (1 - x) * (i_{71'} - i_{710}) = (1 - 0,068) * (1580 - 410) = 1090,44$$

Удельная массовая тепловая нагрузка на конденсатор, кДж/кг,

$$q_k = (i_5 - i_6) = (1690 - 410) = 1200$$

Удельная массовая тепловая нагрузка на генератор, кДж/кг,

$$q_h = i_5 + (f - 1) * i_2 - f * i_1 = 1690 + (1,87 - 1) * 270 - 1,87 * 250 = 1457,4$$

Удельная массовая тепловая нагрузка на абсорбер высокой ступени, кДж/кг,

$$q_a^* = x * i_{7'} + (f - x) * i_4 - f * i_4 = 0,068 * 490 + (1,87 - 0,068) * 60 - 1,87 * 60 = 29,24$$

Удельная массовая тепловая нагрузка на абсорбер низкой ступени, кДж/кг,

$$q_a = (f - 1) * i_3 + (1 - x) * i_{71'} - (f - x) * i_4 \\ = (1,87 - 1) * 50 + (1 - 0,068) * 1580 - (1,87 - 0,068) * 60 = 1407,94$$

Уравнение теплового баланса, кДж/кг,

$$q_h + q_o = q_k + q_a + q_a^* \\ 1457,4 + 1090,44 = 1200 + 29,24 + 1407,94 \\ 2547,8 = 2637,18$$

Погрешность теплового баланса равна,

$$\delta = \frac{(2637,18 - 2547,84)}{2637,18} * 100 = 3\%$$

Так как погрешность равна 3 %, тепловой баланс рассчитан с достаточной точностью

Интервал дегазации, кг/кг,

$$\xi_{r*} - \xi_a = 0,77 - 0,52 = 0,25$$

Холодопроизводительность, кВт,

$$Q_o = 380$$

Нагрузка на генератор-ректификатор, кВт,

$$Q_h = 310$$

Нагрузка на конденсатор, кВт

$$Q_k = 420$$

Нагрузка на абсорбер 1, кВт

$$Q_{a1} = 390$$

Нагрузка на абсорбер 2, кВт

$$Q_{a2} = 10$$

Тепловой коэффициент холодильной машины

$$\zeta = \frac{q_o}{q_h} = \frac{1090}{1382} = 0,79$$

Вывод.

1. На основании проведённого исследования обоснованы предполагаемые режимы работы АВХМ, произведён расчёт циклов. Результаты расчётов подтвердили возможность достижения поставленной цели;
2. Проведенный анализ 4-х заданных заказчиком условий дал возможность определить два расчетных режима для проектирования АВХМ с хорошими показателями работы;
3. Для условий работы с низким значением интервала дегазации предложена схема АВХМ с двухступенчатой абсорбцией.

Библиографический список:

1. Абсорбционная водоаммиачная холодильная машина с двухступенчатой абсорбцией для ОАО «АЗОТ» г. Невинномыска. // Сб. материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Одесской государственной академии холода Одесса, 2012.
2. Автономова И.В., Мазурин Э.Б., Братусь А.В. Разработка технологической схемы установки с рекуперацией теплоты. Анализ и подбор конструкции промежуточного охладителя // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. С. 78-97.
3. Аракелов В.Е. О потребности отраслей экономики России в энергосберегающем оборудовании многоотраслевого применения / Варварский В.С., Перепелкин Ю.М. // Промышленная энергетика. 1992. № 10. С. 5-7.
4. Бамбушек Е.М., Бухарин Н.Н., Герасимов Е.Д. и др. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / под общ. ред. Сакуна И.А. – Л.: Машиностроение, 1987. 423 с.
5. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. – М.: Политехника, 2006. 944 с.
6. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. Монография. – СПб.: СПбГУНиПТ. 2005. 338 с.
7. Веденеева А.И., Галимова Л.В. Научно-практические основы процесса абсорбции с применением к действующей абсорбционной водоаммиачной холодильной машины // III Международная конференция «Инновационные технологии в области техники и физики низких температур» (М. Университет машиностроения 2014): Сборник научных трудов. 2014. С. 191.
8. Галимова Л.В., Веденеева А.И. Совершенствование процесса абсорбции водоаммиачной холодильной машины в системе синтеза аммиака // Холодильная техника. 2013. № 12. С.18-25.
9. Галимова Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. – Издательство АГТУ, 1997. 226 с.
10. Денисов-Винский Н.Д. Использование тепла компрессорных установок // Энергосбережение. 2010. № 7. С 54-60.
11. Жигулев Г.В. Проблемы энергосбережения в Ульяновской области / Иванов Л.Л., Сторожков А.П. // Материалы третьей Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск. 2001. С. 18-21.
12. Колесников А.И., Михайлов С.А. Энергоресурсосбережение. М.: МРАИ ЭЕМ, 2006 – 231 с.
13. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции "Функциональные продукты питания: научные основы разработки производства и потребления" (ФПП). – М.: ФНЦ пищевых систем им. В.А. Горбатова. РАН. 2017.
14. Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В., Миллер Ю.В. «Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений»// Журнал «АВОК». 2013. № 7. С. 38.
15. Шишов В.В., Талызин М.С. Эффективность работы холодильного оборудования с учётом годового изменения температур окружающей среды // Холодильная техника. 2019. № 6. С. 28-33.
16. Шишов В.В., Талызин М.С. Повышение энергоэффективности холодильных установок при уменьшении температурного напора в конденсаторах с воздушным охлаждением // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 41-44.
17. Kang Y.T., Kashiwagi T. Heat transfer enhancement by Marangoni convection in the NH₃ – H₂O absorption process. Int. J. Refrigeration. 2002 Sep 1; 25 (6). pp. 780-788. DOI: 10.1016/s0140-7007(01)00074-3
18. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. Int. J. Energy. 2008 Sep 1; 33 (6). pp. 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
19. Mejbri Kh., Bellagi A. Modelling of the thermodynamic properties of the water–ammonia mixture by three different approaches. Int. J. Refrigeration. 2006 Sep (1); 29 (2). pp. 211-218. DOI: 10.15406/ipcse.2018.03.00090
20. Titliv A., Osadchuk E., Tsoy A., Alimkeshova A., Jamasheva R. Development of cooling system on the basis of absorption water-ammonia refrigerating machines of low refrigeration capacity. Eastern-European J. of Enterprise Technologies. 2019 Vol. 2 No 8(98). pp. 57-67. DOI: 10.15587/1729-4016.2019.164301

References:

1. Absorbtsionnaya vodoammiachnaya kholodil'naya mashina s dvukhstupenchatoy absorbtsiyey dlya OAO "AZOT" g. Nevinnomysk. // Sb. materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Odesskoy gosudarstvennoy akademii kholoda Odessa, 2012. [Absorption water-ammonia refrigerating machine with two-stage absorption for "AZOT" plant in Nevinnomyssk. // Collection of materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Odessa state Academy of cold Odessa, 2012.
2. Avtonomova I.V., Mazurin E.B., Bratus' A.V. Razrabotka tekhnologicheskoy skhemy ustanovki s rekupera-tsiyey teploty. Analiz i podbor konstrukt-sii promezhutochnogo okhladitelya // Vestnik MGTU im. Bauman. Ser. "Mashinostroyeniye". 2011. S. 78-97. [Avtonomova I. V., Mazurin E. B., Bratus A.V. Development of the technological scheme of the installation with heat recovery. Analysis and selection of the intermediate cooler design / / Vestnik MGTU im. Bauman's. Ser. "Engineering". 2011. pp. 78-97. (In Russ.)]

3. Arakelov V.Ye. O potrebnosti otrasley ekonomiki Rossii v energosberegayushchem oborudovanii mnogoot-raslevogo primeneniya / Varvarskiy V.S., Perepelkin YU.M. // Promyshlennaya energetika. 1992. № 10. S. 5-7. [Arakelov V. E. On the needs of Russian economic sectors in energy-saving equipment for multi-industry applications / Varvarsky V. S., Perepelkin Yu. M. // Industrial energy. 1992. No. 10. pp. 5-7. (In Russ.)]
4. Bambushek Ye.M., Bukharin N.N., Gerasimov Ye.D. i dr. Teplovyye i konstruktivnyye raschety kholodil'nykh mashin / pod obshch. red. Sakuna I.A. – L.: Mashinostroyeniye, 1987. – 423 s. [Bambushek E. M., Bukharin N. N., Gerasimov E. D., and others. Thermal and structural calculations of refrigerating machines / ed. Sakun I. A.-L.: mechanical engineering, 1987. 423 p. (In Russ.)]
5. Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Timofeyevskiy L.S. Kholodil'nyye mashiny. – M.: Politekh-nika, 2006. – 944 s. [Baranenko A.V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeevsky L. S. Refrigerating machines. – M.: University Of Technology, 2006. 944 p. (In Russ.)]
6. Baranenko A.V., Timofeyevskiy L.S., Dolotov A.G., Popov A.V. Absorbtsionnyye preobrazovateli teplo-ty. Mono-grafiya. – SPb.: SPbGUNiPT. 2005. – 338 s. [Baranenko A.V., Timofeevsky L. S., Dolotov A. G., Popov A.V. Absorption heat converters. Monograph. – SPb.: Institute of refrigeration and biotechnology. 2005. 338 p. (In Russ.)]
7. Vedeneyeva A.I., Galimova L.V. Nauchno-prakticheskiye osnovy protsessa absorbtsii s primeneniym k deystvuyushchey absorbtsionnoy vodoammiachnoy kholodil'noy mashiny // III Mezhdunarodnaya konferentsiya "Innovatsionnyye tekhnologii v oblasti tekhniki i fiziki nizkikh temperatur" (M. Universitet mashino-stroyeniya 2014): Sbornik nauchnykh trudov. 2014. S. 191. [Vedeneeva A. I., Galimova L. V. Scientific and practical bases of the absorption process with application to the current absorption water-ammonia refrigerating machine // III international conference "Innovative technologies in the field of low temperature engineering and physics" (Moscow University of mechanical engineering 2014): Collection of scientific papers. 2014. pp. 191. (In Russ.)]
8. Galimova L.V., Vedeneyeva A.I. Sovershenstvovaniye protsessa absorbtsii vodoammiachnoy kholodil'noy mashiny v sisteme sinteza ammiaka // Kholodil'naya tekhnika. 2013. № 12. S.18-25. [Galimova L. V., Vedeneeva A. I. Improving the process of absorption of a water-ammonia refrigerating machine in the system of ammonia synthesis. // Technical refrigeration. 2013. No. 12. pp. 18-25. (In Russ.)]
9. Galimova L.V. Absorbtsionnyye kholodil'nyye mashiny i teplovyye nasosy. – Izdatel'stvo AGTU, 1997. – 226 s. [Galimova L. V. Absorption refrigerating machines and heat pumps. AGTU publishing house, 1997. 226 p.]
10. Denisov-Vinskiy N.D. Ispol'zovaniye tepla kompressornykh ustanovok // Energoberezheniye. 2010. № 7. S 54-60. [Denisov-Vinsky N. D. Using the heat of compressor units // energy Saving. 2010. No. 7. pp. 54-60. (In Russ.)]
11. Zhigulev G.V. Problemy energosberezheniya v Ulyanovskoy oblasti / Ivanov L.L., Storozhkov A.P. // Materialy tret'yey Rossiyskiy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Energoberezheniye v gorodskom khozyay-stve, energetike, promyshlennosti" Ulyanovsk. 2001. S. 18-21. [Zhigulev G. V. Problems of energy saving in the Ulyanovsk region / Ivanov L. L., Storozhkov A. P. // Materials of the third Russian scientific and technical conference "energy Saving in urban economy, energy, industry" Ulyanovsk. 2001. pp. 18-21. (In Russ.)]
12. Kolesnikov A.I., Mikhaylov S.A. Energoresursosberezheniye. M.: MRAI EYEM, 2006 – 231 s. [Kolesnikov A. I., Mikhaylov S. A. Energy Saving. Moscow: MRAI EEM, 2006.231 p. (In Russ.)]
13. Materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Funksional'nyye produkty pitaniya: nauchnyye osnovy razrabotki proizvodstva i potrebleniya" (FPP). – M.: FNTS pishchevykh sistem im. V.A. Gorbatoва. RAN. 2017. [Materials of the 1st International scientific and practical conference "Functional food products: scientific bases of production and consumption development" (FPP). – M.: Federal scientific center for food systems. V. A. Gorbatoва. RAS. 2017. (In Russ.)]
14. Tabunshchikov YU.A., Shilkin N.V., Miller YU.V. "Metody i rezul'taty otsenki effektivnosti energo-sberegayushchikh resheniy" // Zhurnal "AVOK". 2013. № 7. S. 38. [Tabunshchikov Yu. a., Shilkin N. V., Miller Yu. V. "Methods and results of evaluating the effectiveness of energy-saving solutions" // AVOK Magazine. 2013. No. 7. pp. 38. (In Russ.)]
15. [Shishov V. V., Talyzin M. S. The efficiency of refrigeration equipment taking into account the annual change in ambient temperatures. // Technical refrigeration. 2019. No. 6. pp. 28-33. (In Russ.)]
16. Shishov V.V., Talyzin M.S. Effektivnost' raboty kholodil'nogo oborudovaniya s uchotom godovogo izmeneniya temperatur okruzhayushchey sredy // Kholodil'naya tekhnika. 2019. № 6. S. 28-33. [Shishov V. V., Talyzin M. S. Improving the energy efficiency of refrigeration units when reducing the temperature head in air-cooled condensers // Heat power engineering. 2015. No. 9. pp. 41-44. (In Russ.)]
17. Kang Y.T., Kashiwagi T. Heat transfer enhancement by Marangoni convection in the NH₃ – H₂O absorption process. Int. J. Refrigeration. 2002 Sep 1; 25 (6). pp. 780-788. DOI: 10.1016/s0140-7007(01)00074-3.
18. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. Int. J. Energy. 2008 Sep 1; 33 (6). pp. 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
19. Mejbri Kh., Bellagi A. Modelling of the thermodynamic properties of the water–ammonia mixture by three different approaches. Int. J. Refrigeration. 2006 Sep (1); 29 (2). pp. 211-218. DOI: 10.15406/ipcse.2018.03.00090
20. Titliv A., Osadchuk E., Tsoy A., Alimkeshova A., Jamasheva R. Development of cooling system on the basis of absorption water-ammonia refrigerating machines of low refrigeration capacity. Eastern-European J. of Enterprise Technologies. 2019 Vol. 2 No 8(98). pp. 57-67. DOI: 10.15587/1729-4016.2019.164301

Сведения об авторах:

Галимова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, e-mail: galimova_lv@mail.ru

Дюсенгалиев Амир Айтуганович, магистр, e-mail: kz.amir.adai@mail.ru

Байрамов Шамиль Загидович, бакалавр, e-mail: bairamov.shamil@mail.ru

Байрамов Джамиль Загидович, аспирант, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Information about the authors:

Larisa V. Galimova, Dr. Sci. (Technical), Prof., e-mail: galimova_lv@mail.ru

Amir A. Dyusengaliev, master, e-mail: kz.amir.adai@mail.ru

Shamil Z. Bayramov, bachelor's degree, e-mail: bairamov.shamil@mail.ru

Dzhamil Z. Bayramov, Postgraduate, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.02.2020.

Принята в печать 06.03.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.02.2020.

Accepted for publication 06.03.2020.

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, А.М. Ибрагимова. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для термостабилизации мощных транзисторов РЭА. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(1): 30-38. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

For citation: T.A. Ismailov, A.R. Shakhmaeva, A.M. Ibragimova. Thermoelectric semiconductor devices for thermal stabilisation of REA powerful transistors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 30-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК. 621.576:614.8.084

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-30-38

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ РЭА

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, А.М. Ибрагимова
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Целью исследования является анализ проблемы отвода выделяющего тепла в мощных транзисторах и разработка устройств для термостабилизации мощных транзисторов в радиоэлектронной аппаратуре. **Метод.** Предложен способ испытания мощных транзисторов при использовании устройства обеспечения заданной температуры в объеме статирования двухпозиционным регулятором температуры и модели устройств для термостабилизации мощных транзисторов. Предложенные устройства обеспечивают высокую точность термостабилизации мощных транзисторов в системе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), связанную с высокой точностью поддержания температуры на заданном уровне термоэлектрической батареей. **Результат.** Для обеспечения требуемых тепловых режимов мощных транзисторов разработаны конструкции устройств, повышающих точность термостабилизации мощных транзисторов, с высокой эффективностью, малым потреблением энергии и небольшими размерами. **Вывод.** По результатам экспериментальных исследований были получены оптимальные конструкции устройств, предназначенных для термостабилизации элементов РЭА, рассеивающих при своей работе значительные мощности. Техническим результатом устройств является повышение точности термостабилизации элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Разработанные устройства обладают следующими функциями работы: в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества, будет последовательно отключать секции термоэлементов термоэлектрической батареи; батарея термоэлектрического модуля (ТЭМ) отводит избыток тепла от термостабилизирующего вещества, сохраняя при этом необходимую температуру элемента РЭА, избыток тепла от тепловыделяющих спаев батареи ТЭМ отводится теплообменником; при плавлении рабочего вещества температура тонкостенной металлической емкости и соответственно температура элемента РЭА будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества.

Ключевые слова: мощные транзисторы, радиоэлектронная аппаратура, термостабилизация, термостатирование, температура плавления, токораспределение

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR DEVICES FOR THERMAL STABILISATION
OF REA POWERFUL TRANSISTORS

T.A. Ismailov, A.R Shakhmaeva, A.M. Ibragimova
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Aim. The aim of the study is to analyse the problem of heat dissipation in high-power transistors and develop devices for their thermal stabilisation when used in electronic equipment. **Method.** A method is proposed for testing power transistors using a device to ensure thermal stabilisation in the stating volume by means of a two-position temperature controller along with a model for the use of these components in electronic devices. The proposed devices support high thermal stabilisation accuracy of power transistors in a radioelectronic device system allowing temperature to be maintained at a given level with high accuracy by means of a thermoelectric battery. **Results.** Device designs were developed for increasing the accuracy of thermal stabilisation of power transistors with high efficiency, low energy consumption and small size. **Conclusion.** Based on the results of experimental studies, optimal designs for devices for the thermostabilisation of radioelectronic device components that dissipate significant power during their operation are presented. The devices can be used to increase the accuracy of thermal stabilisation of the radioelectronic device element by means of a working substance whose melting point coincides with its thermal stabilisation temperature. The developed devices have the following functions: the thermoelectric battery sections of the thermoelectric battery will be sequentially disconnected depending on the electrical signals from the temperature sensors to which the solid phase of the working substance has moved. The battery of the thermoelectric module (TEM) removes excess heat from the heat-stabilising substance while maintaining the required temperature of the radioelectronic device element. Excess heat from the heat-generating junctions of the TEM battery is removed by the heat exchanger. During melting of the working substance, the temperature of the thin-walled metal container – and, accordingly, the temperature of the CEA element – can be maintained at a constant value equal to the melting temperature of the working substance.

Keywords: power transistors, electronic equipment, thermal stabilisation, temperature control, melting temperature, current distribution

Введение. При производстве элементов радиоэлектронной аппаратуры повышение качества их изготовления очень важно, так как от этого зависит надежность работы будущих радиоэлектронных систем.

В настоящее время на внутреннем и внешнем рынках имеется большая потребность в мощных транзисторах (МТ), выпуском которых занимаются многие ведущие предприятия России [15]. МТ используются в энергосистемах, в телевидении, в автомобильном транспорте, электровозах, радиосвязи, станкостроении, оборонной и бытовой технике.

Технология изготовления МТ и полупроводниковых приборов включает порядка 200 операций. Для обеспечения требований, предъявляемых к параметрам мощных транзисторов и полупроводниковых приборов, необходимо качественное выполнение наукоемких операций, которые обеспечивали бы надежность работы этих приборов в РЭА.

Функциональные элементы современной РЭА предъявляют жесткие требования к обеспечению заданных тепловых режимов и допустимому разбросу рабочих температур между ними. При этом необходимо иметь в виду, что оптимальный режим работы некоторых элементов РЭА достигается при температурах, превышающих на несколько десятков градусов температуру окружающей среды, но при работе они разогреваются значительно сильнее и необходимо интенсивно отводить от них излишек теплоты [1, 2, 6, 10, 11].

Постановка задачи. На базе научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств при Дагестанском государственном техническом университете были проведены экспериментальные работы по посадке МТ марки КТ872 с различной технологией обработки и напыления обратной стороны пластин. Анализ статистических данных показал зависимость брака транзисторных структур КТ872 по электрическим параметрам от технологии обработки и напыления обратной стороны, а также от технологии посадки кристалла на основание корпуса ТО-218.

Анализ транзисторов, вышедших из строя в результате вторичного пробоя, показал, что он возникает из-за концентрации тока в пределах малых областей активной площади прибора, возникает проблема равномерного токораспределения по структуре и отвода выделяющего тепла в транзисторах. Задачей исследований является разработка устройства для термостабилизации МТ в РЭА [14].

Методы исследования. Под влиянием климатических факторов в материалах транзисторов протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их свойства и способствующие возникновению отказов из-за деградации электрических параметров, обрывов, коротких замыканий, потери герметичности [16-19].

Особенно заметное влияние на надежность мощных транзисторов оказывают высокие и низкие температуры, их циклические воздействия. Это объясняется температурной зависимостью основных электрофизических параметров применяемых материалов [20-22].

В лаборатории полупроводниковых термоэлектрических преобразователей и устройств разработано устройство для испытания транзисторов, интегральных схем и микросборок. Оно предназначено для обеспечения заданной температуры в объеме статирования [7].

Устройство представляет собой теплоизолированную камеру, охлаждение которой обеспечивается трехкаскадной термоэлектрической батареей (ТЭБ). Поддержание заданной температуры статирования обеспечивается двухпозиционным регулятором температуры, датчик которого установлен в стенке термостатируемого объема. Кроме того, в состав термостата входит система отключения ТЭБ при перегреве в случае отсутствия подачи охлаждающей воды. Датчики системы защиты установлены в стенках водяных теплообменников. Датчик измерения температуры, имеющий внешний выход, установлен в стенке термостатируемого объема.

Недостатками существующих устройств для отвода тепла, описанных в следующих работах [3-5], являются их малоэффективность, если температура работы элемента РЭА превышает температуру окружающей среды, значительные габариты из-за использования радиаторов больших размеров и потребление большого количества энергии.

Обсуждение результатов. Для обеспечения требуемых тепловых режимов мощных транзисторов в системе РЭА разработаны конструкции устройств, повышающих точность термостабилизации МТ в РЭА [6, 8, 9, 12, 13].

В результате экспериментальных исследований получены оптимальные конструкции устройств, предназначенных для термостабилизации элементов РЭА, рассеивающих при своей работе значительные мощности.

Устройство (рис. 1) содержит тепловой демпфер 1, выполненный из высокотеплопроводного материала в виде усеченной пирамиды, на малом основании которой предусмотрена выемка 2. В выемку помещен кожух 3 с термостатирующим веществом 4, точка фазового перехода которого совпадает с температурой статирования охлаждаемого объекта 5, а охлаждаемый объект - в находящуюся в непосредственном тепловом контакте с кожухом и теплоизолированную от окружающей среды камеру 6. На большем основании усеченной пирамиды через керамическую пластину 7 установлена своими теплопоглощающими спаями ТЭБ 8. Отвод тепла от горячих спаев ТЭБ осуществляется радиатором 9. Блок управления 10 осуществляет контроль сопротивления термостабилизирующего вещества и подачу питания на ТЭБ или ее отключение.

Известно, что фазовый переход кристаллических веществ происходит при строго определенном значении температуры. Это значение у некоторых кристаллических материалов лежит в диапазоне 30-50°C.

Если поместить в непосредственный тепловой контакт с таким материалом, находящимся в состоянии фазового перехода, тепловыделяющий элемент РЭА, то можно осуществить его термостабилизацию с очень высокой точностью. При этом возникает проблема отвода тепла, выделяемого элементом РЭА, от термостабилизирующего вещества, находящегося в состоянии фазового перехода. В предлагаемом решении такой отвод избытка тепловыделений осуществляется посредством батареи ТЭБ. Контроль состояния термостабилизирующего вещества реализуется измерением его сопротивления.

Если сопротивление термостабилизирующего вещества 4 отличается от допустимого значения, то блок управления 10 подает необходимый ток питания на батарею термоэлектрического модуля (ТЭМ) 8. В результате батарея ТЭМ 8 отводит избыток тепла от термостабилизирующего вещества 4, сохраняя при этом необходимую температуру элемента РЭА 5. Избыток тепла от тепловыделяющих спаев батареи ТЭМ 8 отводится теплообменником 9. При установлении сопротивления термостабилизирующего вещества 4 на необходимый уровень, блок управления 10 отключает батарею ТЭМ 8.

Техническим результатом устройства (рис. 2) является повышение точности термостабилизации элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Устройство состоит из тонкостенной металлической емкости 1, заполненной рабочим веществом 2, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА 3, установленном на верхней поверхности тонкостенной металлической емкости 1 с обеспечением теплового контакта. К нижней поверхности тонкостенной металлической емкости 1 присоединена своим теплопоглощающим спаем ТЭБ 4, состоящая из нескольких последовательно соединенных секций термоэлементов. Своим тепловыделяющим спаем ТЭБ 4 приведена в тепловой контакт с воздушным радиатором 5. В объеме тонкостенной металлической емкости 1 с рабочим веществом 2 размещены датчики температуры 6, число которых равно числу секций ТЭ в ТЭБ 4. Они электрически связаны с входом устройства управления 7, выход которого электрически связан с ТЭБ 4.

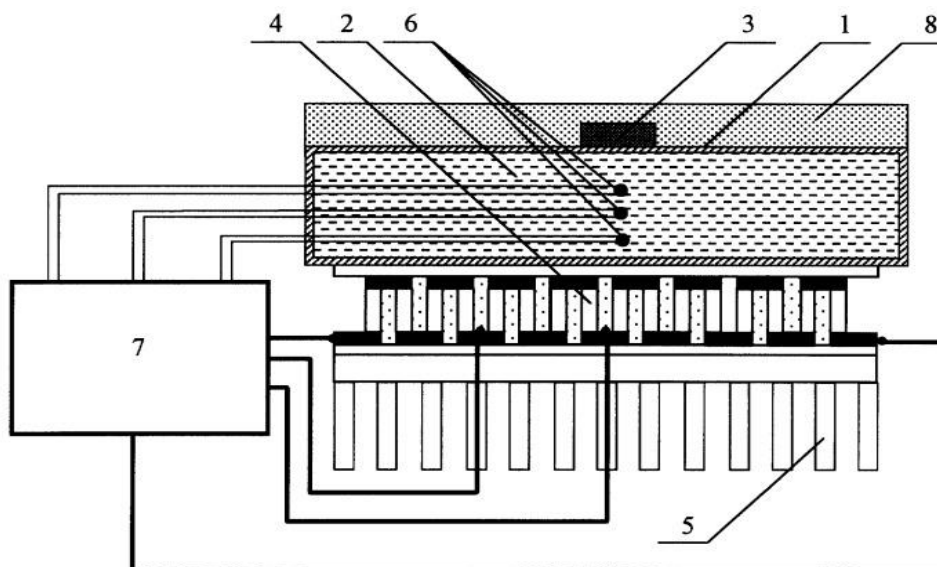


Рис. 2. Устройство термостабилизации элементов РЭА большой мощности
Fig. 2. Device for thermal stabilization of high power CEE elements

Тепло, поступающее от элемента РЭА 3, передается тонкостенной металлической емкости 1 и через поверхность соприкосновения рабочему веществу 2. Далее одновременно происходит прогрев рабочего вещества 2 до температуры плавления и процесс плавления, связанный с появлением жидкой фазы рабочего вещества 2 и ее перемещением в горизонтальной плоскости в направлении, противоположном размещению элемента РЭА 3. При плавлении рабочего вещества 2 температура тонкостенной металлической емкости 1 и соответственно температура элемента РЭА 3 будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества 2.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 2 не переместится до места расположения первого датчика температуры 6, термоэлектрическая батарея 4 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 2 до места расположения первого датчика температуры 6 с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 7, которое начинает осуществлять питание электрической энергией крайней секции термоэлементов в термоэлектрической батарее 4. Часть термоэлектрической батареи 4, состоящая из термоэлементов крайней секции, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 1.

При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 2 второго датчика температуры 6, в соответствии с поступившим от него электрическим сигналом устройство управления 7 начинает осуществлять питание электрической энергией крайней и расположенной рядом с ней секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться уже двумя секциями термоэлектрической батареи 4. При еще большем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 3 посредством датчиков температуры 6 и устройства управления 7 к процессу теплоотвода будут подключаться последовательно следующие секции термоэлементов термоэлектрической батареи 4.

Процесс последовательного подключения секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4 и, следовательно, увеличения уровня теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 1 будет осуществляться до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 3 за счет отвода тепла термоэлектрической батареей 4 жидкая фаза рабочего вещества 2 будет перемещаться в обратном

направлении. При этом устройство управления 7 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 6, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать секции термоэлементов термоэлектрической батареи 4. Процесс отключения секций термоэлементов термоэлектрической батареи 4 будет происходить до тех пор, пока граница раздела жидкой и твердой фазы рабочего вещества 2 не стабилизируется на определенном уровне.

Отвод тепла от тепловыделяющего спая термоэлектрической батареи 4 производится воздушным радиатором 5. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется теплоизоляция 8.

Устройство (рис. 3), повышающее точность термостабилизации мощного транзистора – элемента РЭА за счет использования рабочего вещества, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации элемента РЭА. Устройство содержит ТЭБ 1, состоящую из расположенных в середине низких ветвей 2 и по краям высоких ветвей 3, тепловыделяющие спаи которых расположены на одном уровне и примыкают к теплообменнику 4, а теплопоглощающие спаи расположены на двух уровнях. В середине ТЭБ образовано углубление, в которое помещена тонкостенная металлическая емкость 5, заполненная рабочим веществом 6, температура плавления которого совпадает с температурой термостабилизации транзистора в системе РЭА 7. Транзистор помещен в камеру 8, размещенную на подставке 9 в тонкостенной металлической емкости 5 и находящуюся в непосредственном тепловом контакте с рабочим веществом 6. В объеме тонкостенной металлической емкости с рабочим веществом размещены два датчика температуры 10 и 11, электрически связанные с входом устройства управления 12, выход которого электрически связан с ТЭБ.

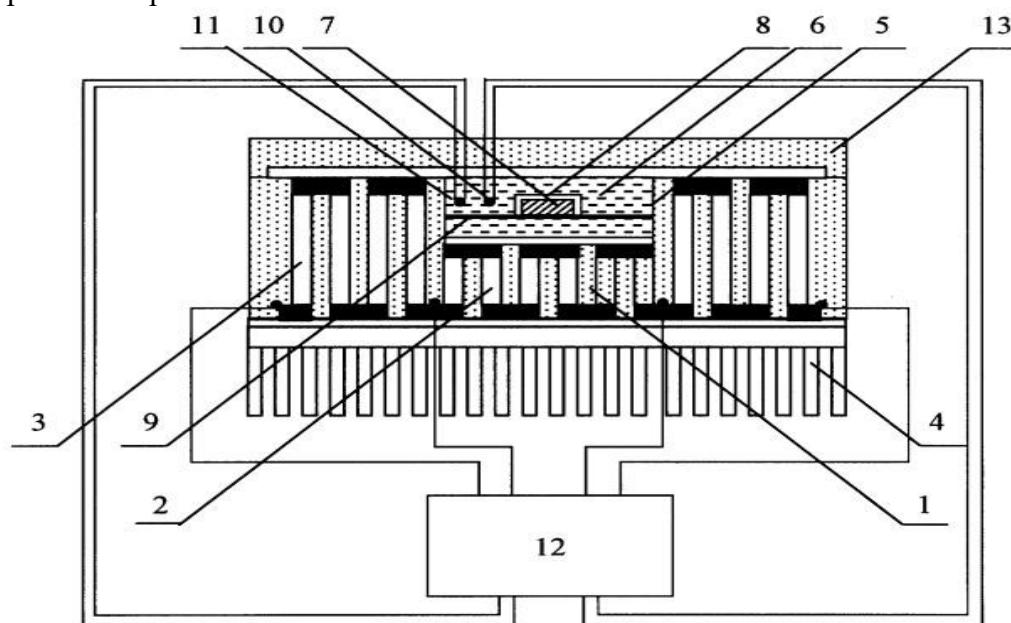


Рис. 3. Устройство термостабилизации мощных транзисторов в системе РЭА
Fig. 3. Thermostabilization device of power transistors in the CEE system

Тепло, поступающее от элемента РЭА 7, находящегося в камере 8, размещенной на подставке 9 передается через поверхность соприкосновения рабочему веществу 6. Происходит прогрев рабочего вещества 6 до температуры плавления и процесс плавления, связанный с появлением жидкой фазы рабочего вещества 6 и ее перемещением в направлении от поверхности камеры 8 к стенкам тонкостенной металлической емкости 5. При плавлении рабочего вещества 6 температура тонкостенной металлической емкости 5 и соответственно температура элемента РЭА 7 будет поддерживаться при постоянном значении, равном температуре плавления рабочего вещества 6.

До тех пор, пока жидкая фаза расплавленного рабочего вещества 6 не переместится до места расположения первого датчика температуры 10, термоэлектрическая батарея 1 не питается электрической энергией и не отводит тепло. При проплавлении рабочего вещества 6 до места расположения первого датчика температуры 10, с последнего передается электрический сигнал на устройство управления 12, которое начинает осуществлять питание электрической энергией части термоэлектрической батареи 1, состоящей из низких ветвей 2. Часть термоэлектрической батареи 1, состоящая из низких ветвей, начинает интенсивно отводить тепло от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6. При дальнейшем увеличении мощности рассеяния тепла элементом РЭА 7 и соответственно при достижении жидкой фазы расплавленного рабочего вещества 6 второго датчика температуры 11, в соответствии с поступившим от него электрическим сигналом устройство управления 12 подключает к питанию электрической энергией дополнительно к низким ветвям 2 высокие ветви 3 термоэлектрической батареи 1. При этом отвод тепла от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 будет осуществляться уже всей термоэлектрической батареей 1.

При уменьшении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 за счет отвода тепла термоэлектрической батареей 1 жидкая фаза рабочего вещества 6 будет перемещаться в обратном направлении (от стенки тонкостенной металлической емкости 5 и камере 8). При этом устройство управления 12 в зависимости от электрических сигналов с датчиков температуры 10 и 11, до которых переместилась твердая фаза рабочего вещества 2, будет последовательно отключать высокие ветви 3 и низкие ветви 2 термоэлектрической батареи 1 соответственно.

Последовательное подключение и отключение низких ветвей 2 и высоких ветвей 3 термоэлектрической батареи 1 к процессу теплоотвода от тонкостенной металлической емкости 5 с рабочим веществом 6 при изменении уровня тепловыделений элемента РЭА 7 будет способствовать повышению экономичности устройства термостабилизации. Отвод тепла от тепловыделяющего спая термоэлектрической батареи 4 производится теплообменником 4. Для снижения до минимума влияния колебаний температуры окружающей среды применяется теплоизоляция 13.

Вывод. Проведенные исследования позволили разработать устройства, которые применялись для термостабилизации мощных транзисторов в РЭА.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наукова Думка, 1979. 768 с.
2. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника, №7, 2009. С. 34-37.
3. Вайнер А.Л., Спокойный Ю.Е., Лукишер Э.М., Сомкини М.Н. Проектирование термоэлектрических микрохолодильников глубокого охлаждения для радиоэлектроники // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1970. № 3.
4. Воронин А.Н., Гальперин В.Л., Зорин И.В., Кудасов А.С. Термоэлектрический холодильник для радиоэлектронной аппаратуры ТЭХРА-1 // Приборы и техника эксперимента, 1988. № 5. С. 212-214.
5. Дульнев Г. И. Тепло-и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
6. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005. 534 с.
7. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для испытания мощных транзисторов // Радиотехника, 2008. № 6. С.134-136.
8. Исмаилов Т.А., Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Термоэлектрическое устройство для обеспечения теплового режима блоков радиоэлектронных систем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2015. Т. 37, № 2. С.50-59.
9. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Термоэлектричество, 2015. № 6. С. 74-87.
10. Исмаилов Т.А., Саркаров Т.Э., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р. Защита поверхности кремниевых подложек на основе легкоплавкого стекла для изготовления кремниевых транзисторов // Стекло и керамика, 2017. № 5. С. 25-28.

11. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А. Исследование параметров, влияющих на пробивное напряжение биполярного транзистора со статической индукцией // Известия Высших учебных заведений. Радиоэлектроника, 2017. № 2. С. 23-28.
12. Патент РФ № 2534508. Конденсационный шкаф РЭА // Исмаилов Т.А., Рашидханов А.Т., Гаджиев А.М. Б.И. № 33, 2014.
13. Патент РФ № 2634927. Устройство для отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Казумов Р.Ш. Бюл. № 31, 2017.
14. Шахмаева А.Р. Оптимизация технологии посадки кристалла кремниевого транзистора на основание корпуса // Проектирование и технология электронных средств, 2006. № 4. С.26-27.
15. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 3/2007. С. 26-29.
16. Cengel Yu., Ghajar A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – New-York, McGraw-Hill Education, 6 edition, 2019. 1056 pp.
17. Chin H.S., Cheong K.Y., Ismail A.B. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metall. Mater. Trans. B, vol. 41, no. 4, 2010. pp. 824-832.
18. Khazaka R., Mendizabal L., Henry D., Hanna R.. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging component s// IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 5, 2015. pp. 2456-2464.
19. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, pp. 1035-1043
20. Tang G., Chai T.C., Zhang X. Thermal optimization and characterization of SiC-based high power electronics packages with advanced thermal design // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9 (5), art. no. 8423098, 2019. pp. 854-863.
21. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design // Electron. Packag. and Prod., № 9, 1994.
22. Yangang W., Xiaoping D., Guoyou L., Yibo W., Daohui L., Steve J. Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging // Electronic Packaging Technology (ICEPT) 2015 16th International Conference on, 2015. pp. 396-402.

References:

1. Anatychuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 s. [Anatychuk L.I. Thermal elements and thermal-electric devices. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 p. (In Russ.)]
2. Bulat L.P. Prikladnye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. [Bulat L.P. Applied studies and developments in the area of thermal-electric cooling in Russia. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. (In Russ.)]
3. Vainer A.L., Spokoiniy Yu.E., Lukisher E.M., Somkni M.N. Proektirovanie termoelektricheskikh mikroholodilnikov glubokogo okhlazhdeniya dlya radioelektroniki. Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO, 1970 № 3. [Vainer A.L., Spokoiniy Yu.E., Lukisher E.M., Somkni M.N. Design of thermoelectric micro-refrigerators of deep cooling for radio electronics. Voprosy radioelektroniki. Ser. TRTO, 1970. No 3. (In Russ.)]
4. Voronin A.N., Galperin V.L., Zorin I.V., Kudasov A.S. Termoelektricheskiy holodilnik dlya radioelektronnoy apparatury TEHRA-1. Prybory i tekhnika eksperimenta, 1988. – № 5. – S. 212-214. [Voronin A.N., Galperin V.L., Zorin I.V., Kudasov A.S. Thermoelectric refrigerator for electronic equipment TEHRA-1. Prybory i tekhnika eksperimenta, 1988. № 5. pp. 212-214. (In Russ.)]
5. Dulnev G.I. Teplo- i massoobmen v radioelektornnoy apparature. M.: Vysshaya shkola, 1984. – 247 s. . [Dulnev G.I Heat and mass transfer in electronic equipment. M.: Vysshaya shkola, 1984. 247 p. (In Russ.)]
6. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensivatory teploperedachi. SPb.: Politekhnik; 2005. 534 s. [Ismailov T.A. Thermal-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politekhnik; 2005. 534 p. (In Russ.)]
7. Ismailov T.A. Shakhmaeva A.R. Poluprovodnikovoe termoelektricheskoe ustroistvo dlya ispytaniya moshnykh tranzistorov. Radiotekhnika, 2008. № 6. S. 134-136. [Ismailov T.A. Shakhmaeva A.R. Semiconductor thermoelectric device for testing power transistors. Radiotekhnika, 2008. No 6. pp. 134-136. (In Russ.)]
8. Ismailov T.A., Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Thermoelectric device to ensure the thermal regime of blocks of electronic systems // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015. Vol. 37, No. 2. pp.50-59. (In Russ.)]
9. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. The results of theoretical studies of the cooling system of REA elements operating in the mode of intermittent heat release // Thermoelectricity, 2015. No. 6. pp. 74-87. (In Russ.)]
10. Ismailov T.A., Sarkarov T.E., Shangereeva B.A., Shakhmaeva A.R. Surface protection of silicon substrates based on fusible glass for the manufacture of silicon transistors // Glass and Ceramics, 2017. No. 5 pp. 25-28. (In Russ.)]

11. Ismailov T.A., Shakhmaeva A.R., Shangereeva B.A. Investigation of parameters affecting the breakdown voltage of a bipolar transistor with static induction // News of Higher Education Institutions. Radioelectronics, 2017. No.2. pp 23-28. (In Russ.)]
12. Patent RF No. 2534508. Condensation cabinet REA // Ismailov T.A., Rashidkhanov A.T., Gadzhiev A.M. B.I. No. 33, 2014. (In Russ.)]
13. Patent RF No. 2634927. A device for removing heat from CEA elements operating in the mode of intermittent heat release // Ismailov TA, Evdulov OV, Evdulov DV, Kazumov R.Sh. Bull. No. 31, 2017. (In Russ.)]
14. Shakhmaeva A.R. Optimizatsiya tehnologii posadki kristalla kremnievogo transistor na osnovanie korpusa. Proektirovanie i tehnologiya elektronnykh sredstv, 2006. – № 4. – S. 26-27. [Shakhmaeva A.R. Optimization of technology for chip assembly on the base. Proektirovanie i tehnologiya elektronnykh sredstv, 2006. No 4. pp. 26-27. (In Russ.)]
15. Elektronika: Nauka, Tehnologiya, Biznes 3/2007. – S. 26-29 [Electronics: Science, Technology, Business 3/2007. pp. 26-29 (in Russ.)]
16. Cengel Yu., Ghajar A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. – New-York, McGraw-Hill Education, 6 edition, 2019. 1056 p.
17. Chin H.S., Cheong K.Y., Ismail A.B. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metall. Mater. Trans. B, vol. 41, no. 4, 2010 pp. 824-832.
18. Khazaka R., Mendizabal L., Henry D., Hanna R.. Survey of high-temperature reliability of power electronics packaging component s// IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 5, 2015. pp. 2456-2464.
19. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, pp.1035-1043
20. Tang G., Chai T.C., Zhang X. Thermal optimization and characterization of SiC-based high power electronics packages with advanced thermal design // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9 (5), art. no. 8423098, 2019. pp. 854-863.
21. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design // Electron. Packag. and Prod., No. 9, 1994.
22. Yangang W., Xiaoping D., Guoyou L., Yibo W., Daohui L., Steve J. Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging // Electronic Packaging Technology (ICEPT) 2015 16th International Conference on, 2015. pp. 396-402.

Сведения об авторах:

Исмаилов Тагир Абдурашидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, Президент ДГТУ; e-mail: dstu@dstu.ru

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

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: ibrasya@mail.ru

Information about the authors:

Tagir A.Ismailov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical Engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU; e-mail: dstu@dstu.ru

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

Asiyat M. Ibragimova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: ib-rasya@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.02.2020.

Принята в печать 26.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.02.2020.

Accepted for publication 26.02.2020.

Для цитирования: В.Ю. Савин, В.Ю. Ильичев. Исследование неравномерности крутящего момента в пластинчатых гидромоторах двойного действия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47(1): 39-47. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-39-47

For citation: V.Yu. Savin, V.Yu. Ilyichev. Study of torque nonuniformity in double-action hydraulic rotary vane motors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1): 39-47. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-39-47

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 532.14:678

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-39-47

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ПЛАСТИНЧАТЫХ ГИДРОМОТОРАХ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

В.Ю. Савин, В.Ю. Ильичев

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
248000, г. Калуга, ул. Баженова, д.2., Россия

Резюме. Цель. К числу основных характеристик пластинчатого гидромотора относится крутящий момент при номинальном давлении. При этом важнейшим параметром крутящего момента является его неравномерность. Исследован вопрос определения крутящего момента и его неравномерности для гидромоторов с десятью и двенадцатью пластинами. Приоритетом является обеспечение максимального постоянства данного параметра. **Метод.** Выражение для теоретического крутящего момента не учитывает тормозящее действие пластин. На пластинах возникает тормозящий момент вследствие их прижима давлением рабочей жидкости к статору. Составлено выражение для тормозящего момента пластин при типе кривой статора, обеспечивающей постоянное ускорение пластины относительно ротора. **Результат.** Построены графики изменения тормозящих моментов для 10 и 12 пластин. Получены отношения минимального и максимального тормозящих моментов равные 0,33 и 0,5 для моторов с десятью и двенадцатью пластинами соответственно. **Вывод.** Получены коэффициенты неравномерности крутящего момента для гидромоторов на заданные параметры, составляющие $\delta = 11,6\%$ и $\delta = 8,8\%$ для моторов с десятью и двенадцатью пластинами соответственно. Результаты анализа полученных параметров указывают на незначительное увеличение неравномерности крутящего момента в моторе с десятью пластинами. При этом уменьшение количества пластин ведет к повышению механического КПД гидромашины.

Ключевые слова: пластинчатый гидромотор, статор, кривая профиля статора, пластина, крутящий момент

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

STUDY OF TORQUE NONUNIFORMITY IN DOUBLE-ACTION HYDRAULIC ROTARY VANE MOTORS

V.Yu. Savin, V.Yu. Ilyichev

*Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University
(National Research University),
2 Bazhenova St., Kaluga 248000, Russia*

Abstract. Aim. Hydraulic rotary vane motors rely on the principle of torque maintained at a nominal pressure. In this case, the most important parameter of the torque is its nonuniformity. The problem of determining nonuniform torque in hydraulic motors having ten and twelve vanes is investigated with the aim of ensuring the maximum stability of this parameter. **Method.** Braking torque occurs on the vanes of hydraulic rotary vane motors due to the pressure of the working fluid on the stator; the theoretical expression for torque does not take the braking effect of the vanes into account. Therefore, an expression is compiled for the braking torque of the vanes with a type of stator curve that provides constant acceleration of the vane relative to the rotor. **Results.** Plots of changes in braking torques were constructed for 10- and 12-vane motors. Ratios of the minimum and maximum braking torques equal to 0.33 and 0.5 for motors with ten and twelve vanes, respectively, were obtained. **Conclusion.** The torque nonuniformity coefficients for hydraulic motors for the given parameters of $\delta = 11,6\%$ and $\delta = 8,8\%$ for motors having ten and twelve vanes, respectively, were obtained. The results of the analysis of the obtained parameters indicate a slight increase in the nonuniformity of torque in a ten-vane motor. In this case, a decrease in the number of vanes leads to an increase in the mechanical efficiency of the hydraulic machine.

Keywords: hydraulic rotary vane motor, stator, stator profile curve, vane, torque

Введение. Анализируя особенности и характеристики объемных гидромашин [1-3] можно выделить преимущества пластинчатых гидромоторов. Данные агрегаты отличаются простотой конструкции, относительная дешевизна, малые габариты, сравнительно нежесткие требования к фильтрации рабочей жидкости.

Пластинчатые гидромоторы по совокупности характеристик и конструктивных особенностей являются одними из наиболее совершенных видов гидромоторов, применяемых для автоматизации рабочих процессов в промышленности, сельском хозяйстве [4,5]. Широчайшее использование пластинчатые гидромоторы так же получили в путевых машинах, предназначенных для выполнения работ при текущем содержании и ремонте путей железных дорог. К числу основных характеристик пластинчатого гидромотора относится крутящий момент при номинальном давлении. При этом важнейшим параметром крутящего момента является его неравномерность. Одним из путей снижения неравномерности крутящего момента является увеличение числа пластин в гидромоторе [6].

Постановка задачи. Существуют определенные рекомендации по выбору числа пластин при проектировании гидромотора. Число пластин рекомендуется выбирать кратным 4, т.е. 8, 12, 16 и т.д. [7]. При этом, необходимо отметить, что значительная часть гидромашин фирмы Denison, поставляемых для комплектации выправочно-подбивочно-рихтовочных путевых машин имеет 10 пластин. Проведенные исследования рабочих процессов пластинчатых гидромашин с десятью пластинами и допустимых соотношений параметров не выявили критических противоречий [8-10]. Исследуем вопрос определения крутящего момента и его неравномерности для гидромотора с десятью пластинами и гидромотора с двенадцатью пластинами. Приоритетом является обеспечение максимального постоянства параметров движения выходного звена [11].

Методы исследования. Выражение для расчета крутящего момента через рабочее давление и расход [12,13] не дает представления о характере действия составляющих момента, об изменении момента и причинах возникновения неравномерности.

Теоретический крутящий момент, развиваемый пластинчатым гидромотором двойного действия равен:

$$M_T = 2(M_1 - M_2), \quad (1)$$

где M_1 – момент от давления рабочей жидкости на пластину, которая контактирует со статором на радиусе R ; M_2 – момент от давления рабочей жидкости на пластину, которая контактирует со статором на радиусе r_0 .

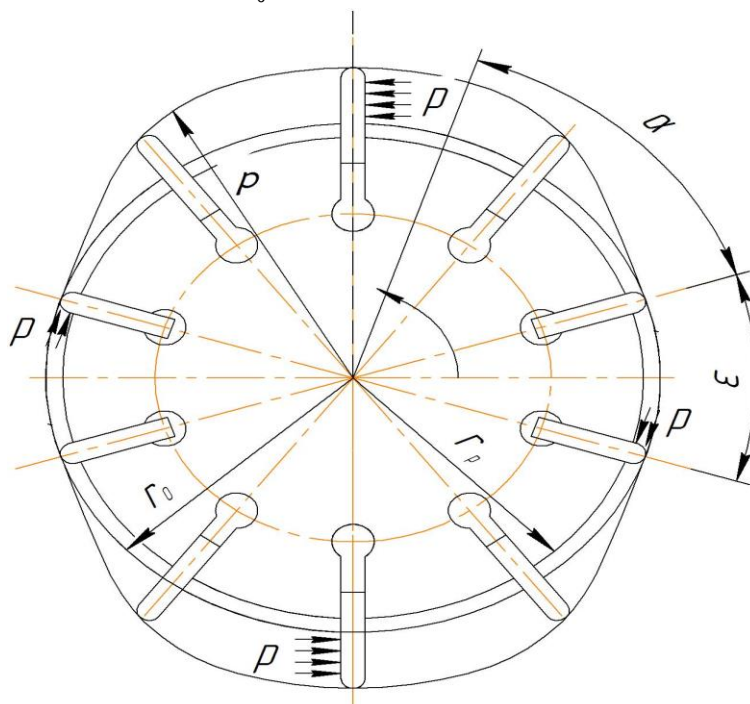


Рис. 1. Схема пластинчатого гидромотора с десятью пластинами

Fig. 1. Diagram of a ten-plate vane motor

Момент M_1 определяем как произведение силы давления на плоскую стенку [14, 15] на плечо силы:

$$M_1 = Fr_D, \quad (2)$$

где F – результирующая сил давления рабочей жидкости на пластину; r_D – плечо результирующей силы давления относительно центра вращения рабочей секции.

В зависимости от формы, пластина может иметь криволинейный участок в зоне контакта со статором. При этом, формально, сила давления рабочей жидкости на пластину должна рассчитываться как сила давления жидкости на криволинейную стенку [16]. В тоже время относительно небольшая площадь криволинейного участка позволяет принять допущение о прямолинейности пластины.

Результирующая сила давления равна

$$F = pS, \quad (3)$$

где p – давление рабочей жидкости; S – площадь выдвинутой из ротора части пластины.

Площадь выдвинутой из ротора части пластины определим в соответствии со следующим выражением:

$$S = B(R - r_p), \quad (4)$$

где B - толщина пластины; r_p - радиус ротора.

Так как давление рабочей жидкости передается всем точкам площади S одинаково, то равнодействующая силы будет приложена в центре тяжести площади S .

Таким образом, плечо результирующей сил давления относительно центра вращения рабочей секции будет равно

$$r_D = r_p + \frac{R - r_p}{2}. \quad (5)$$

Подставив выражения (3), (4), (5) в выражение (2) получим:

$$M_1 = pB(R - r_p) \left(r_p + \frac{R - r_p}{2} \right). \quad (6)$$

Аналогичным образом определяем момент M_2 от давления рабочей жидкости на пластину, которая контактирует со статором на радиусе r_0 :

$$M_2 = pB(r_0 - r_p) \left(r_p + \frac{r_0 - r_p}{2} \right). \quad (7)$$

Выражение для крутящего момента (1) не учитывают тормозящее действие пластин. На пластинах возникает тормозящий момент вследствие того что пластины прижимаются давлением рабочей жидкости к статору. Тормозящий момент одной пластины равен

$$M_{n1} = F_{mp} \rho, \quad (8)$$

где F_{mp} - сила трения скольжения пластины о статор.

Сила трения пластины о статор является составляющей силы реакции F_R шероховатой поверхности статора (рис. 2) и определяется следующим образом

$$F_{mp} = fN = N \operatorname{tg} \gamma, \quad (9)$$

где f - коэффициент трения пластины о статор, N - нормальная реакция.

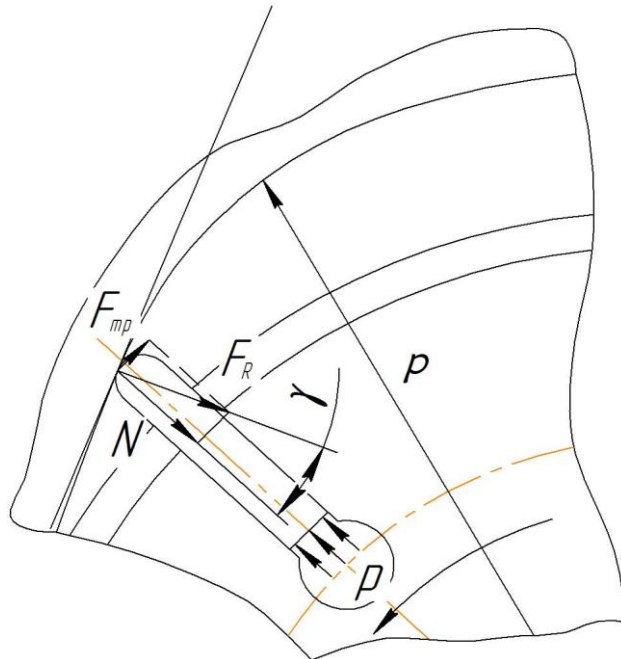


Рис. 2. Сила реакции F_R шероховатой поверхности статора и ее составляющие

Fig. 2. The reaction force of the rough surface of the stator and its components

Анализируя рис. 2, в соответствии с понятием понятия угла трения [17] можно записать следующее соотношение

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{d\rho/d\varphi}{\rho}. \quad (10)$$

Нормальная реакция или сила давления рабочей жидкости на торец пластины равна

$$N = pS_m = pBb, \quad (11)$$

где S_m - площадь торцевой поверхности пластины, b - толщина пластины.

Необходимо отметить, что данное выражение для насосов, имеющих разгрузку пластин [18,19], необходимо корректировать с учетом давления, действующего на поверхность пластины, контактирующую со статором.

Для пластин расположенных в зоне нагнетания давление рабочей жидкости, подводимой к кольцевой канавке, в первом приближении уравнивается давлением масляной пленки в месте контакта пластин с кривой статора.

На пластины, находящиеся в зоне слива действует сила, определяемая уравнением (11). В гидромоторе двойного действия в зоне слива одновременно находится две пластины. В соответствии с этим, а также, учитывая выражения (8), (9), (10) и (11) получим выражение для тормозящего момента пластин гидромотора

$$M_n = 2pBb \frac{d\rho}{d\varphi}. \quad (12)$$

Радиус ρ на рабочих участках статора не постоянен, а изменяется по определенному закону. Соответственно и крутящий момент в соответствии с выражением (12) так же будет изменяться.

Проанализируем характер изменения крутящего и тормозящего моментов гидромотора с профилем кривой статора, обеспечивающим постоянное ускорение пластины относительно ротора [20].

Уравнение кривой при угле φ от нуля до $\frac{\alpha}{2}$:

$$\rho = r_0 + \frac{2(R - r_0)}{\alpha^2} \varphi^2, \quad (13)$$

где R - максимальный радиус кривой статора; r_0 - минимальный радиус кривой статора; α - угол, внутри которого расположена кривая профиля статора.

При φ от $\frac{\alpha}{2}$ до α :

$$\rho = 2r_0 - R + \frac{4(R - r_0)}{\alpha} \left(\varphi - \frac{\varphi^2}{2\alpha} \right). \quad (14)$$

Из уравнений (13) и (14) дифференцирование определяем скорости пластины и подставляем их в уравнение 12.

При угле φ от нуля до $\frac{\alpha}{2}$

$$M_n = 8pBb \frac{(R - r_0)}{\alpha^2} \varphi. \quad (15)$$

При φ от $\frac{\alpha}{2}$ до α тормозящий момент равен:

$$M_n = 8pBb \frac{(R - r_0)}{\alpha} \left(1 - \frac{\varphi}{\alpha}\right). \quad (16)$$

Углы α определим через число пластин гидромотора. Для этого запишем уравнение, построенное на основе схемы пластинчатого гидромотора двойного действия (рис. 1):

$$2\alpha + 2\varepsilon = \pi \quad (17),$$

где ε - угол, на котором расположения уплотнительной перемычки.

При допускаемом соотношении

$$\varepsilon = \beta, \quad (18)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{z}$ - угол между соседними пластинами, получим

$$\alpha = \frac{\pi(z - 4)}{2z}. \quad (19)$$

Применив выражение (18) получим для десяти пластин $\alpha = \frac{3\pi}{10}$ и для двенадцати пластин $\alpha = \frac{\pi}{3}$.

Обсуждение результатов. С учетом того, что угол α зависит от числа пластин, построим графики изменения тормозящих моментов для гидромоторов с 10 и 12 пластинами (рис.3).

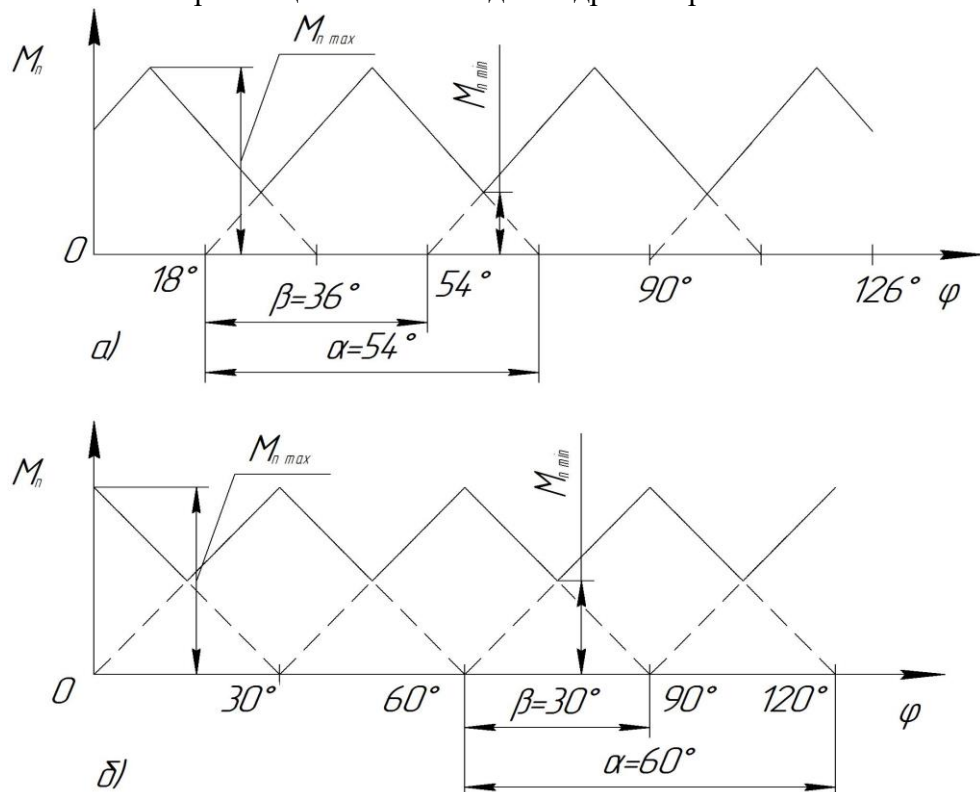


Рис. 3. Графики изменения тормозящих моментов для гидромоторов с десятью (а) и двенадцатью (б) пластинами

Fig. 3. Diagrams of changes in braking moments for hydraulic motors with ten (a) and twelve (b) plates

Из графиков видно, что максимальный и минимальный тормозящий моменты связаны следующими соотношениями:

для гидромоторов с десятью пластинами, $\alpha = \frac{3\pi}{10}$, $\varepsilon = \beta = \frac{\pi}{5}$

$$\frac{M_{n \min}}{M_{n \max}} = 0,33,$$

для гидромоторов с двенадцатью пластинами, $\alpha = \frac{\pi}{3}$, $\varepsilon = \beta = \frac{\pi}{6}$

$$\frac{M_{n \min}}{M_{n \max}} = 0,5.$$

Полученные соотношения $\frac{M_{n \min}}{M_{n \max}}$ указывают на незначительное увеличение неравно-

мерности крутящего момента при переходе от двенадцати к десяти пластинам.

В то же время уменьшение количества пар трения ведет к повышению механического КПД гидромашины.

Еще одним объективным показателем неравномерности является коэффициент неравномерности крутящего момента, определяемый следующим соотношением

$$\delta = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_T} \cdot 100, \quad (20)$$

где $M_{\max}$ - максимальный крутящий момент с учетом минимального тормозящего момента; $M_{\min}$ - минимальный крутящий момент с учетом максимального тормозящего момента.

Для гидромотора с десятью пластинам, номинальным давлением 7 МПа, размерами $B=32$ мм, $b=5,4$ мм, $r_0=57,6$ мм, $R=66,3$ мм получаем $\delta=11,6\%$. Для мотора с двенадцатью пластинами в первом приближении получим $\delta=8,8\%$.

Вывод. Произведено исследование неравномерности крутящего момента в пластинчатых гидромоторах двойного действия с десятью и двенадцатью пластинами. В качестве типа кривой статора принята кривая, обеспечивающая постоянное ускорение пластины относительно ротора.

Построены графики изменения тормозящих моментов для гидромоторов с десятью и двенадцатью пластинами. Получены отношения максимального и минимального тормозящих моментов, равные 0,33 и 0,5 для моторов с десятью и двенадцатью пластинами соответственно.

Получены коэффициенты неравномерности крутящего момента, составляющие $\delta=11,6\%$ и $\delta=8,8\%$ для моторов с десятью и двенадцатью пластинами соответственно.

Результаты анализа полученных параметров указывают на незначительное увеличение неравномерности крутящего момента в моторе с десятью пластинами. При этом уменьшение количества пластин ведет к повышению механического КПД гидромашины.

Библиографический список

1. Гавриленко Б.А. Гидравлический привод / Б.А. Гавриленко, В.А. Минин, С.Н. Рождественский – М.: Машиностроение, 1968. – 502 с.
2. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах / Б.Б. Некрасов – М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.
3. Башта Т.М. Объемные гидравлические приводы / Т.М. Башта. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 628 с.
4. Исаев А.П. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов / А.П. Исаев, Б.И. Сергеев, В.А. Дидур. – М.: Агропромиздат, 1990. – 400 с.
5. Исупова И.В. Повышение долговечности ротационных вакуумных насосов / И.В. Исупова, И.Г. Цубера // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. - №3. – С. 151-154.

6. Борзов В.М. Идентификация параметров и расчет крутящего момента пластинчатого пневмомотора / В.М. Борзов, И.В. Ивлев // *Технология машиностроения и материаловедение*. – 2019. – №3. – С. 10-14.
7. Зайченко И.З. Пластинчатые насосы и гидромоторы / И.З. Зайченко, Л.М. Мышлевский. – М.: Машиностроение, 1970. – 229 с.
8. Савин В.Ю. Исследование равномерности расходов всасывающих и нагнетающих пластин для пластинчатого насоса / В.Ю. Савин // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – 2017. – №3 (14). – С. 18-22.
9. Савин В.Ю. Определение допустимых отношений радиусов статора пластинчатого насоса / В.Ю. Савин, Г.В. Волков, В.С. Малахов // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – 2017. – №3 (14). – С. 38-42.
10. Савин Р.В. Выбор числа пластин в насосах двойного действия / Р.В. Савин, В.Ю. Савин // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – 2018. – №4. – С. 6-13.
11. Гойдо, М.Е. Проектирование объемных гидроприводов / М.Е. Гойдо. — Москва : Машиностроение, 2009. — 304 с.
12. Башта, Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т.М. Башта – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
13. Гринчар Н.Г. Основы гидропривода машин. Часть 1 / Н.Г. Гринчар, Н.А. Зайцева. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 444 с.
14. Справочник по гидравлическим расчетам/ П.Г. Киселев. [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.
15. Примеры расчетов по гидравлике/ А.Д. Альтшуль. [и др.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 256 с.
16. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / Д.А. Бутаев. [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 628 с.
17. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики/ Н.Н. Никитин – М.: Высшая школа, 1990. – 607 с.
18. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
19. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы: справочник / В.К. Свешников. – М.: Машиностроение, 2008. – 640 с.
20. Савин В.Ю. Корректировка профиля статора с целью снижения шума в пластинчатых насосах / В.Ю. Савин // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. – 2016.- № 11-4. – С. 29-31.

References:

1. Gavrilenko B.A. Gidravlicheskiy privod / B.A. Gavrilenko, V.A. Minin, S.N. Rozhdestvenskiy – М.: Mashinostroyeniye, 1968. – 502 s. [Gavrilenko B.A., Minin V.A., Rozhdestvenskiy S.N. Hydraulic drive. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968, 502p. (In Russ.)]
2. Nekrasov B.B. Gidravlika i yeye primeneniye na letatel'nykh apparatakh / B.B. Nekrasov – М.: Mashinostroyeniye, 1967. – 368 s. [Nekrasov B.B. Hydraulics and its use in aircraft. Moscow, Mashinostroyeniye, 1967, 368p. (In Russ.)]
3. Bashta T.M. Ob'yemnyye gidravlicheskiye privody / T.M. Bashta. [i dr.]. – М.: Mashinostroyeniye, 1979. – 628 s. [Bashta T.M., Zaichenko I. Z., Ermakov V.V., Haimovich E.M. Positive-displacement hydraulic machinery. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979, 628p. (In Russ.)]
4. Isayev A.P. Gidravlika i gidromekhanizatsiya sel'skokhozyaystvennykh protsessov / A.P. Isayev, B.I. Sergeev, V.A. Didur. – М.: Agropromizdat, 1990. – 400 s. [Isayev A.P., Sergeev B.I., Didur V.A. Hydraulics and hydromechanization of agricultural processes. Moscow, Agropromizdat, 1990, 400p. (In Russ.)]
5. Isupova I.V. Povysheniye dolgovechnosti rotatsionnykh vakuumnnykh nasosov / I.V. Isupova, I.G. Tsubera // *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. – 2015. – №3. – S. 151-154. [Isupova I.V., Tsubera I.G. Rotary vacuum pumps life extension. Agricultural Innovation. 2015; 3:151-154. (In Russ.)]
6. Borzov V.M. Identifikatsiya parametrov i raschet krutyashchego momenta plastinchatogo pnevmomomota / V.M. Borzov, I.V. Ivlev // *Tekhnologiya mashinostroyeniya i materialovedeniye*. – 2019. – №3. – S. 10-14. [Borzov V.M., Ivlev V.I. Mathematical modeling and vector identification of air vane. Engineering Technology and Materials Science. 2019; 3:10-14. (In Russ.)]
7. Zaychenko I.Z. Plastinchatyye nasosy i gidromotory / I.Z. Zaychenko, L.M. Myshlevskiy. – М.: Mashinostroyeniye, 1970. – 229 s. [Zaichenko I. Z., Myshlevsky L.M. Rotary vane pumps and hydraulic motors. Moscow, Mashinostroyeniye, 1970, 229p. (In Russ.)]
8. Savin V.YU. Issledovaniye ravnomernosti raskhodov vsasyvayushchikh i nagnetayushchikh plastin dlya plastinchatogo nasosa / V.YU. Savin // *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovaniye*. – 2017. – №3 (14). – S. 18-22. [Savin V.Yu. Research of consumptions of suctions and injections vanes of the rotary vane pump. Science, technology and education. 2017; 3:18-22. (In Russ.)]
9. Savin V.YU. Opredeleniye dopustimyykh otnosheniy radiusov statora plastinchatogo nasosa / V.YU. Savin, G.V. Volkov, V.S. Malakhov // *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovaniye*. – 2017. – №3 (14). – S. 38-42. [Savin V.Yu., Volkov G.V., Malakhov V.S. Determination of allowable ratios of the stator radius of the rotary vane pump. Science, technology and education. 2017; 3: 38-42. (In Russ.)]
10. Savin R.V. Vybora chisla plastin v nasosakh dvoynogo deystviya / R.V. Savin, V.YU. Savin // *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovaniye*. – 2018. – №4. – S. 6-13. [Savin R.V., Savin V.Yu. Selection of the number of plates in double-acting pumps. Science, technology and education. 2018; 4: pp. 6-13. (In Russ.)]

11. Goydo, M.Ye. *Proyektirovaniye ob'yemnykh gidroprivodov* / M.Ye. Goydo. — Moskva : Mashinostroyeniye, 2009. — 304 s. [Goydo M.E. Design of hydraulic drives. Moscow, Mashinostroenie, 2009, 304p. (In Russ.)]
12. Bashta, T.M. *Gidroprivod i gidropnevmomatika* / T.M. Bashta — M.: Mashinostroyeniye, 1972. — 320 s. [Bashta T.M. Hydraulic drive and hydropneumatic automation. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 320p. (In Russ.)]
13. Grinchar N.G. *Osnovy gidroprivoda mashin. Chast' 1* / N.G. Grinchar, N.A. Zaitseva. — M.: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2016. — 444 s. [Grinchar N.G., Zaitseva N.A. Basics of hydraulic machinery. Part 1. Moscow, Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2016, 444p. (In Russ.)]
14. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* / P.G. Kiselev. [i dr.]. — M.: Energiya, 1974. — 312 s. [Kiselev P.G., Altshul A.D., Danilchenko N.V., Kasparsen A.A., Krivchenko G.I., Pashkov N.N. Slissky S.M. Hydraulic Calculation Reference. Moscow, Energy, 1974, 312p. (In Russ.)]
15. *Primery raschetov po gidravlike* / A.D. Al'tshul'. [i dr.]. — M.: Stroyizdat, 1976. — 256 s. [Altshul A.D., Kalitsun V.I., Mairanovsky F.G., Palgunov P.P. Examples of hydraulic calculations. Moscow, Stroyizdat, 1976, 256p. (In Russ.)]
16. *Sbornik zadach po mashinostroitel'noy gidravlike* / D.A. Butayev. [i dr.]. — M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002. — 628 s. [Butayev D.A., Kalmykova Z.A., Podviz L.G., Popov K.N., Rozhdestvensky S.N., Yanshin B.I. Collection of tasks in engineering hydraulics. Moscow. Publishing House Bauman Moscow State Technical University, 2002, 628p. (In Russ.)]
17. Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* / N.N. Nikitin — M.: Vysshaya shkola, 1990. — 607 s. [Nikitin N.N. Theoretical Mechanics Course. Moscow, Graduate School, 1990, 607p. (In Russ.)]
18. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vuzov* / T.M. Bashta, S.S. Rudnev, B.B. Nekrasov i dr. — M.: Mashinostroyeniye, 1982. — 423 s. [Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B., Baybakov O.V. Hydraulics and hydraulic machines. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 423p. (In Russ.)]
19. Sveshnikov, V.K. *Stanochnyye gidroprivody: spravochnik* / V.K. Sveshnikov. — M.: Mashinostroyeniye, 2008. — 640 s. [Sveshnikov V.K. Hydraulic machines: manual. Moscow, Mashinostroenie, 2008, 640p. (In Russ.)]
20. Savin V.YU. *Korrektirovka profilya statora s tsel'yu snizheniya shuma v plastinchatykh nasosakh* / V.YU. Savin // *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*. — 2016.- № 11-4. — S. 29-31. [Savin V.Yu. Correction of the stator profile to reduce noise in vane pumps. Actual problems of the humanities and natural sciences. 2016; 11-4:29-31. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Савин Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Тепловые двигатели и гидромашин»; ORCID0000-0002-2476-9768; e-mail: savin.study@yandex.ru

Ильичев Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Тепловые двигатели и гидромашин»; e-mail: patrol8@yandex.ru

Information about authors:

Vladimir Yu. Savin, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Thermal Engines and Hydraulic Machines; e-mail: savin.study@yandex.ru

Vladimir Yu. Ilyichev, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Thermal Engines and Hydraulic Machines; e-mail: patrol8@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.01.2020.

Принята в печать 21.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.01.2020.

Accepted for publication 21.02.2020.

Для цитирования: Ш.А. Юсуфов. Термоэлектрический теплообменник – интенсификатор теплопередачи для обеспечения теплового режима электронных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47(1): 48-57. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

For citation: Sh.A. Yusufov. Thermoelectric heat exchanger - Heat transmission intensifier for maintaining a thermal regime in electronic systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1): 48-57. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 637.

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-48-57

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛООБМЕННИК – ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Ш.А. Юсуфов

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

Резюме. Цель. В статье рассматривается термоэлектрический теплообменник – интенсификатор теплопередачи, предназначенный для обеспечения теплового режима электронного оборудования, размещенного во внешних установках. **Метод.** Применены методы моделирования теплообменных процессов. **Результат.** Предлагается термоэлектрическая система, представляющая собой теплообменник – интенсификатор теплопередачи, который размещен во внешней установке. Конструктивно внешняя установка содержит первый отсек с электронными тепловыделяющими компонентами, в котором предусмотрены проходы или каналы для продува внешнего воздуха и второй отсек, содержащий элементы с необходимостью герметизации от внешних воздействий и недопустим контакт с внешним охлаждающим воздухом. Приведена математическая модель, которая позволяет определить температуру потоков воздуха по теплообменным поверхностям термоэлектрической системы (ТЭС), а также предельную длину термоэлектрической системы для достижения равенства температур потоков на выходе при заданных токах питания термоэлектрических батарей. **Вывод.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что большей длине термоэлектрической системы для обеспечения режима интенсификации соответствует большая разница температур теплоносителей на входе. Очевидно, что при дальнейшем увеличении длины термоэлектрический теплообменник переходит в режим работы термоэлектрической холодильной машины, и температура потока воздуха на выходе становится ниже.

Ключевые слова: термоэлектрическая система, система обеспечения теплового режима, термоэлектрический теплообменник, математическая модель

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC HEAT EXCHANGER - HEAT TRANSMISSION INTENSIFIER FOR MAINTAINING A THERMAL REGIME IN ELECTRONIC SYSTEMS

Sh.A. Yusufov

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

Abstract. Aim. The article presents a thermoelectric heat exchanger / heat transfer intensifier design for ensuring the thermal regime of electronic equipment located in external installations. **Method.** Methods for modelling heat exchange processes were applied. **Result.** A thermoelectric system is proposed, consisting of a heat exchanger / heat transfer intensifier component located in an external installation. In structural terms, the external installation comprises a compartment disposing electronic heat-generating components, in which are located channels for ventilating external air, while a second compartment contains elements that require to be sealed from external influences, including contact with external cooling air. A mathematical model is provided for determining the temperature of air flows from the heat-exchange surfaces of a thermoelectric system (TES), as well as the limiting length of a thermoelectric system to achieve equal output temperature at given supply currents of thermoelectric batteries. **Conclusion.** On the basis of the conducted studies, it is concluded that a longer thermoelectric system for ensuring the intensification mode corresponds to an increased difference in the temperature of the coolant at the inlet. The temperature of the air flow at the outlet becomes lower with a further increase in length due to the thermoelectric heat exchanger entering the operating mode of the thermoelectric refrigeration unit.

Keywords: thermoelectric system, thermal regime control system, thermoelectric heat exchanger, mathematical model

Введение. Преобразователи напряжения, силовые электронные компоненты и иная полупроводниковая элементная база, используемая в составе электронных систем, излучают большое количество тепла, которое необходимо отводить в окружающую среду. До 90% излучаемой теплоты приходится на выходные каскады оборудования. При этом охлаждение достигается в основном за счет выбора соответствующей конструкции корпуса, а не при помощи использования холодильного оборудования или установок [1].

В случае использования электронных систем, используемых в составе возобновляемых источников энергии, для их разрешения, как правило, применяются внешние установки.

В настоящее время используются внешние установки трех типов: непосредственно охлаждаемые окружающим воздухом; герметизированные корпуса, оснащенные теплообменниками; герметизированные корпуса, оснащенные оборудованием кондиционирования и охлаждения воздуха. Установки первого типа содержат внешний корпус, вмещающий электронное оборудование, предназначенное для работы во внутренних помещениях, и охлаждаются при помощи внешнего воздуха, проходящего эффективную очистку фильтрацией. Хотя в процессе фильтрации и устраняются твердые загрязняющие вещества, но влага и кислотные газы, которые могут повредить электронное оборудование, не удаляются.

В установках второго типа излучаемое тепло отводится в воздух окружающей среды через теплообменники. В этом случае излучаемое тепло, мощность которого может достигать несколько кВт, должно пройти несколько стадий прежде, чем будет рассеяно в окружающем воздухе: от элемента к теплоотводу, к воздуху внутри корпуса или шкафа, и через теплообменники во внешний воздух. Каждая стадия или этап приводят к некоторому повышению температуры элемента.

Теплообменник может привести к повышению температуры воздуха внутри корпуса по сравнению с окружающей средой на 15°C. В климатических условиях с температурой 45-50 °C

такая конструкция позволяет поддерживать температуру электронных и радиотехнических устройств равной 70-80 °С. Теплообменники должны быть рассчитаны для всего проходящего тепла, и в случае рассеяния одного-двух кВт означает, что размеры теплообменника должны быть сопоставимы или почти равняться размерам электронного или радиооборудования.

Используемое в установках третьего типа охлаждающее оборудование, включающее устройства охлаждения, а также, возможно, и теплообменники, может иметь размеры, достигающие половины размеров электронного и радиооборудования. При этом сложно обеспечить резервирование. Устройство имеет высокую сложность и требует совершенной системы охлаждения. Текущая стоимость нуждающегося в резервировании оборудования достигает одной трети или даже половины стоимости целевого оборудования базовой станции. Расходы на эксплуатацию также весьма высоки. При отводе тепла из корпуса устройством охлаждения выделяется дополнительно тепло, мощность которого составляет более одной трети от тепла, излучаемого электронным оборудованием. Это дополнительное тепловыделение оказывает влияние на окружающие предметы. Однако охлаждающие устройства такого типа являются единственными устройствами, которые могут удовлетворить требованиям к температуре электронного оборудования, предъявляемым с учетом как внешних, так и внутренних условий.

Использование в качестве охлаждающих и теплообменных устройств полупроводниковых термоэлектрических модулей позволяет избавиться от таких недостатков установок третьего типа, как громоздкость, выделение дополнительного тепла в охлаждаемом объеме, совместимость с электронным устройством по питанию и т.д.

Преимуществом термоэлектрических систем (ТЭС) является то, что тип и режим работы системы определяется комбинацией таких факторов как направление потока теплоты, направление потока электрической энергии и температуры объекта теплового воздействия относительно температуры среды.

Вектор потока теплоты в ТЭС может либо совпадать с вектором потока процесса естественной теплопередачи, то есть быть направленным от больших температур к меньшим, либо направлен навстречу вектору естественной теплопередачи.

Вектор потока электроэнергии может быть направлен либо к термоэлектрической батарее, что соответствует подключению ее к внешнему источнику питания, либо от термоэлектрической системы, которая в этом случае будет термоэлектрическим генератором.

Термоэлектрическая система, разделяющая две среды с различными температурами, будет находиться в потоке теплоты естественного направления, если электрическая цепь разомкнута. Наличие перепада температур обуславливает появление разности потенциалов на клеммах термоэлектрической системы и в этом случае, будет работать в режиме генерации электрической энергии.

При подключении системы к внешнему источнику в ней возникает ток, который в свою очередь порождает эффект Пельтье, то есть, выделение тепла на спаях с низкой температурой и поглощение тепла на спаях с высокой температурой. Изменение направления вектора потока теплоты в устройстве на противоположный направлению естественной теплопередачи, вследствие подвода электроэнергии необходимой полярности, определяет его функционирование либо в режиме теплового насоса с нагреванием объекта до температуры большей, чем температура среды, либо в режиме холодильной машины с охлаждением объекта до температуры меньшей, чем температура среды. Если направление теплового потока за счет подводимой электроэнергии к термобатарее совпадает с направлением потока естественной теплопередачи в ней, то усиливается процесс теплопередачи. Термоэлектрические устройства, работающие в этом режиме, являются интенсификаторами теплопередачи. В зависимости от соотношения температур среды и объекта теплового воздействия, последний, либо охлаждается, либо нагревается.

Комбинации направлений потоков тепловой и электрической энергии, реализуемых в системе, и определяет возможные типы ТЭС: на термоэлектрические генераторы, термоэлектрические тепловые насосы, холодильные машины и интенсификаторы теплопередачи.

Постановка задачи. Существует множество вариаций конструктивной реализации термоэлектрических систем, определяемых спецификой сред источников теплоты и системы теплосброса, но разработки новых вариантов с целью улучшения энергоэффективности и КПД актуальны и сегодня [2-3, 5-19].

Предлагается термоэлектрическая система, представляющая собой теплообменник – интенсификатор теплопередачи, который размещен во внешней установке.

Конструктивно внешняя установка содержит первый отсек с электронными тепловыделяющими компонентами, в котором предусмотрены проходы или каналы для продува внешнего воздуха и второй отсек, содержащий элементы с необходимостью герметизации от внешних воздействий и недопустим контакт с внешним охлаждающим воздухом.

На рис. 1 схематически показано разработанное устройство блока преобразовательного оборудования, с использованием системы обеспечения теплового режима на основе термоэлектрического теплообменника – интенсификатора теплопередачи.

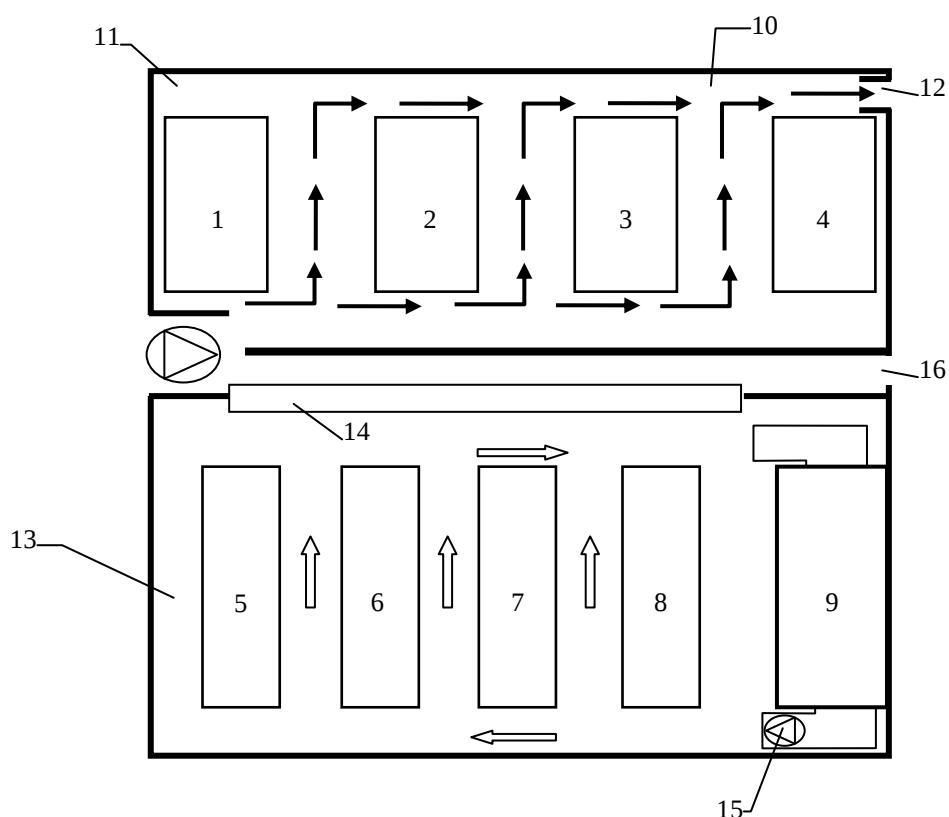


Рис.1. Внешняя установка (шкаф) для оборудования
Fig. 1. External installation (cabinet) for equipment

Электронное оборудование размещено в шкафу и включает в себя электронные элементы, оконечные каскады, преобразователи переменного/постоянного тока, мощные элементы (каскады) и т.п. Шкаф разделен на первый отсек 10 и второй герметично закрытый отсек 13. В первом отсеке располагаются элементы 1 - 4 с невысоким уровнем тепловыделений и не критичных к параметрам охлаждающей среды. Для охлаждения этих элементов используется воздушный поток с температурой равной температуре окружающей среды и подаваемый в отсек посредством вентилятора 11.

Элементы 5-8, излучающие наибольшее количество тепла, типа мощных элементов, радиопередатчиков, оконечных каскадов и т.п., заключенных в герметичные экранированные кожухи, обеспечивающие электромагнитную совместимость и снабженные радиаторами, размещены в герметичном отсеке 13. Охлаждение воздушного потока, создаваемого вентилятором

15, в этом отсеке осуществляется ТЭС 14 и в данном случае работает как теплообменник-интенсификатор теплопередачи.

Направления потоков в этом случае и схематичное представление теплообменника может быть представлено как на рис. 2.

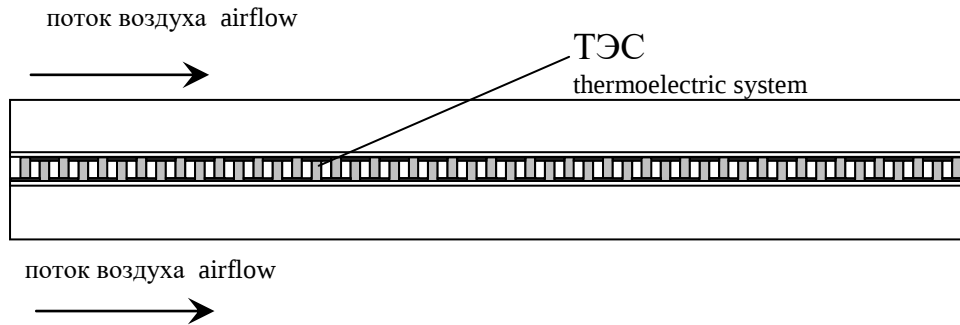


Рис.2. Схема термоэлектрического теплообменника теплопередачи
Fig. 2. Scheme of thermoelectric heat transfer heat exchanger

Методы исследования. Особенностью работы термоэлектрического теплообменника-интенсификатора теплопередачи является совпадение потока передаваемой устройством теплоты с направлением передачи теплоты естественной теплопроводностью.

Для данной конструктивной схемы уравнения теплового баланса по потокам теплоносителей (воздуха) будут определены как [4]:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 \xi L (T_{1ТЭБ} - T_1) + \alpha_1' (1 - \xi) L (T_{1М} - T_1), \quad (1)$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 \xi L (T_{2ТЭБ} - T_2) + \alpha_2' (1 - \xi) L (T_{2М} - T_2), \quad (2)$$

где $T_{1ТЭБ}, T_{2ТЭБ}$ – температуры спаев ТЭ, $T_{1М}, T_{2М}$ – температуры поверхностей тепловых мостиков, $T_{1,2}$ – температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Тепловые процессы в данной конструкции целесообразно рассматривать с учетом теплового для спаев термоэлементов, из которых состоит ТЭС [4]:

$$\alpha_1 (T_1 - T_{1ТЭБ}) = \bar{e} j T_{1ТЭБ} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (3)$$

$$\alpha_2 (T_{2ТЭБ} - T_2) = \bar{e} j T_{2ТЭБ} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (4)$$

где $\bar{e}$ – коэффициент термо-ЭДС, j – плотность электрического тока.

В соответствии с [4], необходимо исключить температуры поверхностей термобатарей и в безразмерном виде изменение температуры потоков воздуха вдоль теплообменника будет определяться как:

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = b \xi \left\{ [m \beta v^2 - (1 + v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 - v) m \beta] \right\} + b' (1 - \xi) (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (5)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dx} = \eta b \xi \left\{ [\beta v^2 - (1 - v)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{v^2}{2} [1 + (2 + v) \beta] \right\} + \eta b' (1 - \xi) (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (6)$$

где:

$$b' = \frac{K'}{W_1} S; \quad \Theta_1 = \frac{\bar{e}^2}{\rho\lambda} T_1; \quad \Theta_2 = \frac{\bar{e}^2}{\rho\lambda} T_2; \quad v = \frac{\bar{e}d}{\lambda} j;$$

$$b = \frac{K}{W_1} S; K = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{d}{\lambda} + v \left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} - \frac{v\lambda}{\alpha_1\alpha_2 d} \right) \right]^{-1}.$$

В зависимости от конструктивной реализации возможно обеспечение функционирования теплообменника, как для режима прямотока, так и для противотока.

Для рассматриваемого случая прямотока граничные условия будут иметь вид:

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \quad \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (7)$$

Решение вышеприведенной системы дифуравнений с граничными условиями для прямотока получим выражения для определения температур теплоносителей вдоль ТЭС:

$$\Theta_1 = C_1(\Psi_1 - b_2) \frac{e^{\Psi_1 x}}{b_1} + C_2(\Psi_2 - b_2) - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1}(\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}(\Psi_2 - b_2), \quad (8)$$

$$\Theta_1 = C_1 e^{\Psi_1 x} + C_2 e^{\Psi_2 x} - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}, \quad (9)$$

где

$$C_1 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_2 - b_2) V - b_1 \delta] / (\Psi_1 - \Psi_2),$$

$$C_2 = [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_1 - b_2) V - b_1 \delta] / (\Psi_2 - \Psi_1),$$

$$P_1 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_2 + b_3 b_2) / (\Psi_1 - \Psi_2),$$

$$P_2 = (a_3 b_1 - b_3 \Psi_1 + b_3 b_2) / (\Psi_2 - \Psi_1),$$

$$\delta = \frac{P_1}{\Psi_1 b_1}(\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}(\Psi_2 - b_2), \quad V = -\frac{P_1}{\Psi_1} - \frac{P_2}{\Psi_2},$$

$$\Psi_{1,2} = \frac{b_2 + a_1 \pm \sqrt{(b_2 - a_1)^2 + 4a_2 b_1}}{2},$$

$$a_1 = b\xi[v^2 m\beta - (1 + v)] - b'(1 - \xi), \quad a_2 = b\xi + b'(1 - \xi),$$

$$a_3 = b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2 - v)m\beta], \quad b_1 = \eta b\xi + \eta b'(1 - \xi),$$

$$b_2 = \eta b\xi[v^2 \beta - (1 - v)] - b'\eta(1 - \xi), \quad b_3 = \eta b\xi \frac{v^2}{2} [1 + (2 + v)\beta].$$

Обсуждение результатов. Особенностью использования в ТЭС в качестве теплообменника-интенсификатора в конкретном рассматриваемом случае является возможность эффективной передачи теплоты от одного потока к другому при ограниченной длине теплообменника, что и является основным вопросом при обеспечении теплового режима теплонагруженного электронного устройства.

В случае работы теплообменника как интенсификатора теплопередачи граничным условием является не превышение длины теплообменника той величины, при которой температуры потоков вдоль теплообменниками станут равными.

Исходя из анализа результатов численного расчета на рис. 3 представлен график изменения предельной длины ТЭС, с учетом коэффициента заполнения [4], т.е. тех длин, при которых температуры потоков воздуха на выходе равны между собой.

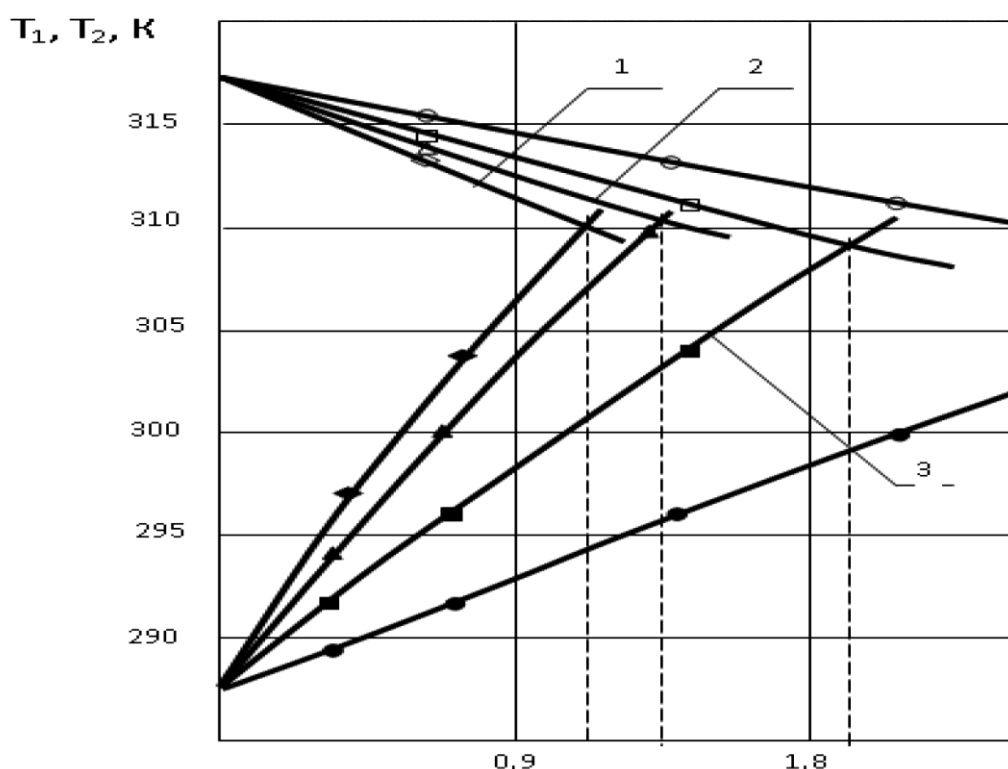


Рис.3. Зависимость температур потоков на выходе из ТЭС в зависимости от длины (1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 0,8$; 3 – $\xi = 0,5$; $I = 10$ А)

Fig. 3. The dependence of the temperature of the flows at the outlet of the thermoelectric system depending on the length at the outlet (1 - $\xi = 1$; 2 - $\xi = 0.8$; 3 - $\xi = 0.5$; $I = 10$ A)

Как показывают зависимости, большей длине ТЭС для обеспечения режима интенсификации соответствует большая разница температур теплоносителей на входе. Очевидно, что при дальнейшем увеличении длины термоэлектрический теплообменник переходит в режим работы термоэлектрической холодильной машины, и температура потока воздуха на выходе становится ниже.

Анализ холодильного коэффициента для ТЭС тока (рис. 4) показывает, что имеется область применимого повышения тока, и у, кроме того, зависит от коэффициента заполнения. Это обстоятельство объясняется тем, что у ТЭС с меньшим коэффициентом заполнения он больше, при прочих равных иных параметрах, по сравнению с большим его значением, в связи с тем, что затраты энергии в первом случае меньше, чем во втором.

Поскольку параметры ТЭС зависят от коэффициента заполнения, то были проанализировано его влияние на пределы изменения тока для удержания режима интенсификации теплообмена. Как показал анализ, больший коэффициент заполнения приводит к уменьшению области изменения тока питания термобатарей для режима интенсификации.

В случае высоких уровней тепловыделения и необходимости более низкого охлаждения потока воздуха можно добиться лишь при высоких значениях коэффициента заполнения. Данный режим возможен на практике, когда имеются ограничения на потребляемую электрическую мощность от сети в целом устройство или ограничение по потреблению системой обеспечения теплового режима.

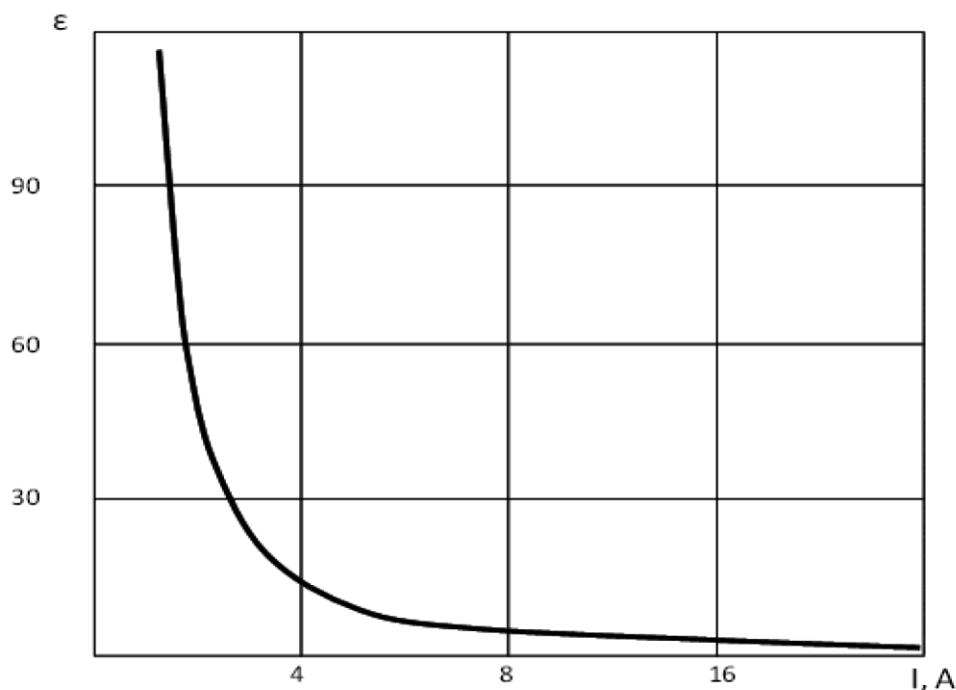


Рис.4. Зависимость холодильного коэффициента от тока
Fig. 4. Refrigeration coefficient versus current

Вывод. Предложена конструкция внешней установки для размещения электронного оборудования с обеспечением теплового режима с использованием термоэлектрической системы, работающей как теплообменник-интенсификатор.

Предложенная математическая модель позволяет проанализировать зависимость предельной длины теплообменника-интенсификатора от тока питания и коэффициента заполнения ТЭС, а также обеспечения заданного температурного режима воздушного потока на сторонах теплообменника.

Библиографический список:

- Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
- Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств.- Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
- Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
- Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. С-Пб.: Политехника, 2005.
- Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г. Термоэлектрическая система для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):53-64. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64>
- Патент РФ № 2203523 Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Цеханская Т.Э., Салманов Н.Р., Юсуфов Ш.А.
- Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрын В.П.
- Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
- Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Абросимов А.И.
- Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
- Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов //Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
- Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфи-

- лов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
 14. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebbarjadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
 15. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoq, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.
 16. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
 17. Haddad, C., Périllon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125
 18. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf
 19. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf

References:

1. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye. - Makhachkala: IPTS DGTU, 2012. – 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Cooling of electronic systems: a training manual. - Makhachkala: CPI DGTU, 2012. 165 p. (In Russ.)]
2. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv. - Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. – 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Nezhvedilov T.D. Thermostabilization of microelectronic equipment using semiconductor thermoelectric devices. - Makhachkala: CPI DGTU, 2013. 149 p. (In Russ.)]
3. Rashidkhanov A.T., Yusufov SH.A. Sistema obespecheniya teplovogo rezhima shkafa telekommunikatsionnogo oborudovaniya. / Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96 [Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. The system for ensuring the thermal regime of the telecommunication equipment cabinet. / Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 87-96. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2017-44-2-87-96. (In Russ.)]
4. Ismailov T.A. Termoelektricheskkiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivizatsiya teplopere-dachi. S-Pb.: Politehnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. St. Petersburg: Polytechnic, 2005. (In Russ.)]
5. Yusufov SH.A., Ibragimova A.M., Peredkov S.A., Sarkarov T.E., Mitarov R.G. Termoelektricheskaya sistema dlya obespecheniya teplovogo rezhima modul'nogo elektronnoy oborudovaniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2019;46(4):53-64. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64> [Yusufov Sh.A., Ibragimova A.M., Peredkov S.A., Sarkarov T.E., Mitarov R.G. Thermoelectric system to ensure the thermal regime of modular electronic equipment. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2019; 46 (4): 53-64. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64>. (In Russ.)]
6. Patent RF № 2203523 Shkaf dlya okhlazhdeniya radioelektronnoy apparatury / Ismailov T.A., Tsekhanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov SH.A. [RF patent No. 2203523 Cabinet for cooling electronic equipment / Ismailov T.A., Tsekhanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov Sh.A. (In Russ.)]
7. Patent RF №369860. Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury / Voronin G.I., Antonov YU.V., Fedorov V.N., Chizhikov YU.V., Dryn' V.P. [RF patent No. 369860. Equipment cooling device / Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Dryn V.P. (In Russ.)]
8. Patent RF №1755398 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Sidorin V.I. [RF patent №1755398 A device for cooling fuel equipment. / Sidorin V.I. (In Russ.)]
9. Patent RF №1287699 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Abrosimov A.I. [RF patent No. 1287699 A device for cooling fuel equipment. / Abrosimov A.I. (In Russ.)]
10. Patent RF №1595321 Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. [RF patent No. 1595321 Device for cooling fuel equipment. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ulyanov N.A. (In Russ.)]
11. Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya [Tekst]: monografiya / D.A. Kononov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VGTU, 2013. – 222 s. [Development and modeling of microchannel cooling systems [Text]: monograph / D.A. Kononov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VSTU, 2013. 222 p. (In Russ.)]

12. Proyektirovaniye i ispytaniya okhladiteley silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Tekst] / C.A. Panfilov V.M. Kalikanov, YU.A. Fomin, A.S. Savanin// // Pribory i sistemy Upravleniye, kontrol', diagnostika. 2008 №3. S. 41-43. [Design and testing of power semiconductor device coolers [Text] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, Yu.A. Fomin, A.S. Savanin // Devices and Systems. Management, control, diagnostics, 2008. No. 3. pp. 41-43. (In Russ.)]
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
14. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebajadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
15. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoœur, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.
16. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
17. Haddad, C., Périllon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125
18. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf
19. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf

Сведения об авторе:

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: yshirali@yandex.ru

Information about authors:

Shirali A.Yusufov, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: yshirali@yandex.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.02.2020.

Принята в печать 12.03.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 18.02.2020.

Accepted for publication 12.03.2020.

Для цитирования: В.П. Алферов, А.В. Бацких, А.В. Крисилов, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин. Использование численно-аналитической модели оценки эффективности функционирования системы защиты информации от несанкционированного доступа при анализе ее вероятностно-временных характеристик. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(1): 58-71. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-58-71

For citation: V.P. Alferov, A.V. Butskikh, A.V. Krisilov, A.D. Popov, E.A. Rogozin. Use of a numerical analytical model for assessing the functional effectiveness of an information protection system by analysing its probabilistic-temporal characteristics. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 58-71. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-58-71

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.71

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-58-71

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА ПРИ АНАЛИЗЕ ЕЕ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.П. Алферов¹, А.В. Бацких², А.В. Крисилов³, А.Д. Попов², Е.А. Рогозин²

¹Воронежский государственный технический университет,

¹394066, г. Воронеж, Московский пр-т, 179, Россия,

² Воронежский институт Министерства внутренних дел России,

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

³Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

³394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время выполнение вычислительных экспериментов по определению вероятностно-временных характеристик систем защиты информации автоматизированных систем представляет собой сложную и затратную задачу. С целью исследования динамики переходов между состояниями систем данного типа необходимо разработать математическую модель и алгоритм расчета соответствующих характеристик. **Метод.** Для достижения поставленной цели разработана математическая модель системы защиты информации в программной среде MATLAB. Достоинствами данной программной среды являются: высокий уровень визуализации, возможность модификации моделей для анализа других систем данного типа, наличие средств интеграции с другими программными продуктами. **Результат.** В статье предлагается численно-аналитическая модель системы защиты информации от несанкционированного доступа. Динамика функционирования системы описывается с помощью стохастической сети Петри. Для решения интегральных уравнений и определения вероятностей достижения конечного состояния за заданное время применяется преобразование Лапласа. Решение выполняется в аналитической форме, что позволяет получить явный вид зависимостей вероятностно-временных характеристик системы от вероятностей переходов между состояниями и средних значений времени пребывания системы в каждом состоянии. Представлены результаты расчета вероятностно-временных характеристик подсистемы «Включение персонального компьютера и идентификация пользователя» системы защиты информации от несанкционированного доступа «Страж NT». **Вывод.** Разработанная модель позволяет исследовать динамику переходов между состояниями системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированной системе, осуществить оптимизацию времени выполнения ею функциональных задач и может быть использована для совершенствования функционала и повышения эффективности эксплуатации данных систем.

Ключевые слова: автоматизированная система, система защиты информации, несанкционированный доступ, конечный марковский процесс, вероятностно-временные характеристики, граф, численно-аналитическая модель

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

USE OF A NUMERICAL ANALYTICAL MODEL FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL EFFECTIVENESS OF AN INFORMATION PROTECTION SYSTEM BY ANALYSING ITS PROBABILISTIC-TEMPORAL CHARACTERISTICS

V.P. Alferov¹, A.V. Butskikh², A.V. Krisilov³, A.D. Popov², E.A. Rogozin²

¹Voronezh State Technical University,

¹179 Moskovsky Ave., Voronezh 394066, Russia,

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

²53 Patriotov St., Voronezh 394065, Russia,

³Gagarin-Zhukovsky Military Combined Air Force Academy,

³54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russia

Abstract. *Aim* Currently, the implementation of computational experiments to determine the probabilistic-temporal characteristics of protection functions for automated information systems is a complex and costly task. In order to study the dynamics of transitions between the states of this type of system, it is necessary to develop a mathematical model and an algorithm for computing the corresponding characteristics. **Method.** To achieve this goal, a mathematical model of the information security system was developed in the MATLAB software environment. The main advantages of this software environment consist in a high level of visualisation, the ability to modify models to analyse other systems of this type and the availability of integration tools with other software products. **Results.** The article presents a numerical and analytical model of a system for protecting information from unauthorised access. The functional dynamics of the system are described using a stochastic Petri net. In order to solve the integral equations and determine the probabilities of reaching the final state in a given time, the Laplace transform is used. The solution is carried out in an analytical mode to obtain an explicit form of the dependences of the probability-time characteristics of the system on the probabilities of transitions between states and the average times the system stays in each state. The paper presents the results of calculating the probability-time characteristics of the “Turning on the personal computer and user identification” subsystem of the “Guard NT” system for preventing unauthorised access to information. **Conclusion.** The developed model, which can be used to study the dynamics of transitions between states of an information protection system against unauthorised access in an automated system, as well as to optimise the time it takes to complete functional tasks, can also be used to improve the operational efficiency of these systems.

Keywords: automated system, information protection system, unauthorised access, finite Markov process, probability-time characteristics, graph, numerical-analytical model

Введение. В настоящее время автоматизированные системы (АС) становятся все более уязвимыми по отношению к новым видам угроз безопасности информации и, в первую очередь, к угрозам, связанным с несанкционированным доступом (НСД) к их информационным ресурсам. Поэтому развитие адекватных механизмов и средств противодействия этим угрозам и обеспечение информационной безопасности (ИБ) современных АС является актуальной задачей [1]. В соответствии с международными и отраслевыми стандартами Российской Федерации по ИБ [2, 3], руководящими документами Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [4-6] для обеспечения защиты информации (ЗИ) от угроз НСД применяются системы защиты информации (СЗИ), являющиеся сложными иерархическими системами, входящими в АС в качестве подсистем ИБ [7]. Оценка эффективности функционирования СЗИ от НСД рассматривается как значимый показатель ее работы в целом, позволяющий решать проблемы эксплуатации системы, учитывая временные характеристики [8-11]. В связи со сложностью структуры и характера взаимодействия компонентов СЗИ от НСД проведение указанной оценки приводит к необходимости решения целого ряда задач, связанных с созданием математических моделей динамики функционирования системы, определением и анализом

причинно-следственных связей между объектами в процессе ее разработки [12].

Для исследования процессов ЗИ от НСД в АС и решения указанных задач целесообразно использовать математический аппарат сетей Петри [13-16], применяемый для моделирования сложных систем, к которым относятся и СЗИ от НСД. Его несомненными достоинствами являются: возможность применения для имитации параллельных процессов, удобство в представлении графической модели и исследовании динамики моделируемого объекта, возможность программирования моделируемых процессов. Таким образом, использование аппарата сетей Петри для моделирования процесса функционирования СЗИ от НСД в АС позволит осуществить анализ динамики временных параметров системы и оценить эффективность ее функционирования [1].

Для исследования процессов ЗИ от НСД в АС применяются преимущественно аналитические способы моделирования. При этом в аналитической модели часто имитируется только функциональный аспект системы, а описание алгоритма ее работы осуществляется в виде аналитических соотношений или логических условий. Модификация аналитической модели с учетом ряда математических неточностей, обнаруженных в процессе реализации типовой аналитической модели в программном комплексе оценки эффективности функционирования СЗИ от НСД, и использование для решения интегральных уравнений новой численно-аналитической математической модели позволит получить явный вид зависимостей вероятностно-временных характеристик (ВВХ) системы от вероятностей переходов между ее состояниями и средних значений времени пребывания СЗИ от НСД в каждом из этих состояний.

Современное развитие вычислительной техники и компьютерных программ для проведения символьных и численных расчетов стимулируется необходимостью решать, как фундаментальные проблемы, так и прикладные инженерные задачи. Возможность выполнения таких задач, как аналитическое решение систем уравнений большой размерности и обработка аналитических выражений, занимающих несколько страниц, открывает новые перспективы для исследования динамики функционирования сложных систем [17]. Для анализа нестационарных систем массового обслуживания широко применяются аналитические и численные методы, в том числе с использованием пакета программ MATLAB [18]. В соответствии с выше изложенным, для оценки эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС возникает потребность в разработке численно-аналитической модели, описывающей динамику переходов между состояниями системы, и построении алгоритма ее реализации на основе использования математического аппарата сетей Петри в программной среде MATLAB.

Постановка задачи. Для модификации аналитической модели СЗИ от НСД в АС с учетом математических неточностей, выявленных в процессе реализации типовой модели в программном комплексе оценки эффективности функционирования систем, и проведения оценки точности моделирования необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать графовую модель стохастической сети Петри для получения статистических данных. Произвести сбор и обработку данных об отслеживаемых событиях функционирования СЗИ от НСД.
2. Построить матрицу переходных вероятностей и описать динамику функционирования СЗИ от НСД на основании теории марковских процессов.
3. Получить в аналитическом виде образ вероятности достижения системой, находящейся в начальном состоянии, своего конечного состояния, выполнить обратное преобразование Лапласа.
4. Разработать алгоритм оценки интегральной эффективности функционирования типовой СЗИ от НСД в АС.
5. Произвести расчет и построить графики вероятностей перехода СЗИ от НСД в конечное поглощающее состояние на примере ее подсистемы, обеспечивающей вход в систему, с использованием пакета программ MATLAB.

Методы исследования. Процесс функционирования СЗИ от НСД в АС можно представить, как марковский процесс с конечным числом состояний, в котором время пребывания си-

системы в каждом из состояний аппроксимируется экспоненциальным законом распределения. С целью анализа вероятностно-временных характеристик СЗИ от НСД в АС применяется графовая модель, в которой обращение к СЗИ от НСД соответствует входу конечного марковского процесса (КМП) в начальное состояние, а завершение выполнения системой своего функционала по данному обращению — входу КМП в конечное поглощающее состояние. Описание динамики функционирования СЗИ от НСД осуществляется на основе использования модели стохастической сети Петри [19] и вероятностного подхода, изложенного в работах [12, 20].

Основываясь на теории марковских процессов, описать процесс динамики рассматриваемой системы возможно при помощи матрицы переходных вероятностей [21]:

$$K(\tau) = \|K_{ab}(\tau)\|, a = \overline{1, n}, b = \overline{1, n} \quad (1)$$

Элемент $K_{ab}(\tau)$ матрицы определяет переходную вероятность КМП из состояния a в состояние b , за время, не превышающее τ , следовательно, его можно рассчитать по формуле

$$K_{ab}(\tau) = p_{ab}F_a, a = \overline{1, n}, b = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $F_a(\tau)$ — вероятность того, что время пребывания КМП в состоянии a меньше, чем τ ;

p_{ab} — вероятность перехода КМП, находящегося в состоянии a , в состояние b .

Функции распределения $F_a(\tau)$, $a = \overline{1, n}$ характеризуют временные задержки различных переходов графовой модели сети Петри, описывающей динамику функционирования СЗИ от НСД. Вероятности переходов p_{ab} , $a = \overline{1, n}$, $b = \overline{1, n}$ определяются разрешающими процедурами [22, 23]. Для проведения дальнейших расчетов закон распределения для функций $F_a(\tau)$ полагается экспоненциальным согласно [21]. С учетом вероятностей перехода КМП в промежуточное состояние динамику СЗИ от НСД можно описать следующей системой уравнений [21]:

$$Q_a(\tau) = p_{an}F_a(\tau) + \sum_{b=1}^{n-1} p_{ab} \int_0^{\tau} F_a(t)Q_b(\tau-t)dt, a = \overline{1, n-1}, \quad (3)$$

где $Q_a(\tau)$ — вероятность достижения находящимся в состоянии a КМП своего конечного состояния n за промежуток времени, не превышающий τ .

В отличие от подхода, примененного в [20], используется более точная система уравнений, в которой учитываются не только вероятности непосредственного перехода системы из состояния a в конечное состояние n (первое слагаемое в формуле (3)), но и вероятности перехода из состояния a в состояние b за время t с последующим переходом из него в конечное состояние в течение оставшегося промежутка времени $(\tau - t)$.

Так как временная задержка перехода в промежуточное состояние может принимать любое значение в диапазоне от 0 до τ , то во втором слагаемом используется интеграл свертки [21]. В отличие от [20], где применяется система линейных уравнений, далее используется система интегральных уравнений (3), содержащая интегралы свертки для всех промежуточных состояний. В системе уравнений (3) объединены ВВХ состояний КМП, характеризующих отдельные состояния функционирования СЗИ от НСД, с ВВХ КМП, характеризующего общую динамику функционирования СЗИ от НСД. Построение системы линейных алгебраических уравнений из системы интегральных уравнений (3) производится с использованием преобразования Лапласа:

$$q_{lap a}(v) = p_{an}f_{lap a}(v) + \sum_{b=1}^{n-1} p_{ab}f_{lap a}(v)q_{lap b}(v), a = \overline{1, n-1}, \quad (4)$$

системного реестра.

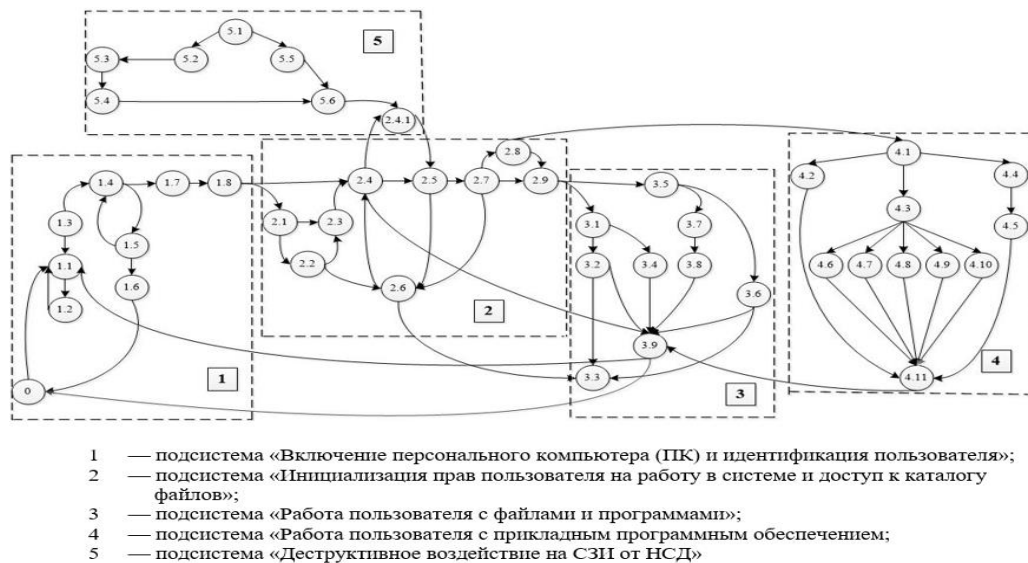


Рис.1. Графовая модель СЗИ от НСД в АС

Fig. 1. Graph model of a system for protecting information from unauthorized access to an automated system

1. Subsystem «Turning on the personal computer (PC) and user identification»;
2. Subsystem «Initialization of user rights to work in the system and access to the file directory»;
3. Subsystem «User work with files and programs»;
4. Subsystem «User work with application software»;
5. Subsystem «Destructive impact on the system of information protection from unauthorized access»

Для сбора информации проводилась фильтрация процессов и потоков с применением программы «Process Monitor», разработанной компанией «Sysinternals» для наблюдения за протеканием различных процессов в операционных системах семейства «Windows» в масштабе реального времени. Программа «Process Monitor» позволяет осуществить перехват системных функций, контролируемых монитором, и сбор подлежащих мониторингу данных. Наблюдение выполняется для следующих классов операций:

- File system (обращение к файловой системе);
- Registry (обращение к реестру);
- Network (работа с сетью);
- Process (активность процессов).

По окончании запуска исполняемого файла «rgstop.exe» начинается реализация процессов сбора и обработки данных об отслеживаемых событиях с их последующим выводом в основном окне программы. Для поиска необходимых событий СЗИ от НСД используется фильтр, встроенный в «Process Monitor». Одним из основных показателей динамики функционирования СЗИ от НСД в АС является вероятность достижения КМП конечного состояния за установленное время $\tau_{\max}$, то есть вероятность выполнения СЗИ от НСД своих функций (показатель временной эффективности СЗИ от НСД).

Данная вероятность $V_{\text{ВЭСЗИ}}$ выражается через вероятностно-временные характеристики отдельных состояний функционирования СЗИ от НСД с помощью обратного преобразования Лапласа следующим образом:

$$V_{\text{ВЭСЗИ}} = L^{-1}[q_1(v)](\tau) \Big|_{\tau=\tau_{\max}} = q_1(\tau) \Big|_{\tau=\tau_{\max}}. \quad (17)$$

Определение показателя $V_{\text{ВЭСЗИ}}$ СЗИ от НСД осуществляется по следующему алгоритму. Вначале с помощью формулы (7) для экспоненциального закона распределения вычисляются $f_a(v)$, после чего по формуле (5) определяются величины $k_{ab}(v)$. Затем система линейных

алгебраических уравнений решается аналитически согласно (10-16). Далее вычисляется обратное преобразование Лапласа $L^{-1}[q_i(v)](\tau)$ для вероятностей перехода подсистемы из i -го состояния в конечное.

Оценка эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС требует разработки соответствующего алгоритма ее расчета. Алгоритм расчета эффективности функционирования типовой СЗИ от НСД в АС, разработанный на основе использования численного метода Гивенса, представлен на рис. 2.

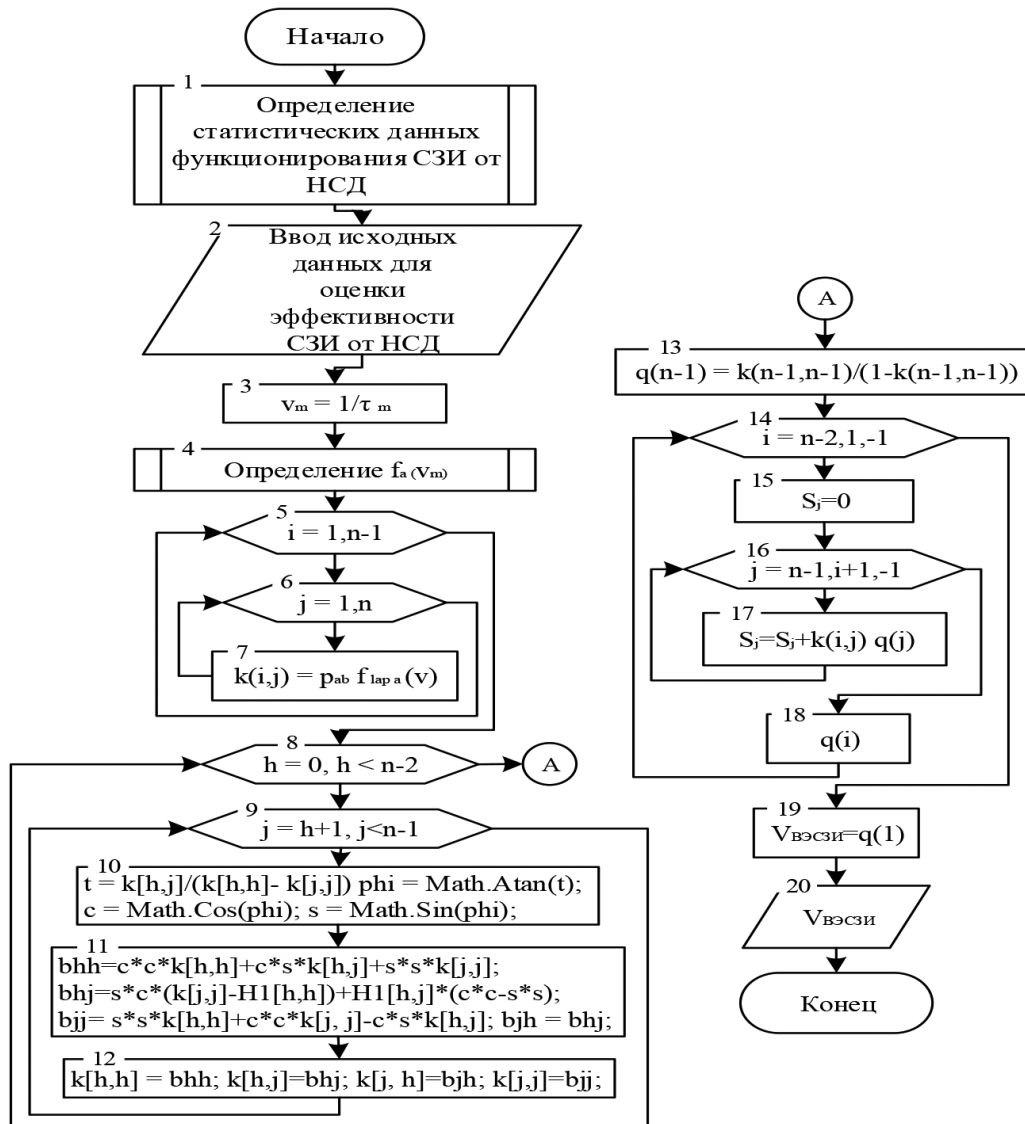


Рис. 2. Алгоритм расчета эффективности функционирования СЗИ от НСД
Fig. 2. The algorithm for calculating the effectiveness of the system for protecting information from unauthorized access

Блок 1. Определение статистических данных функционирования СЗИ от НСД:

1) τ_m – среднего значения случайной величины $\tau_{\max}$ (максимально допустимого времени выполнения СЗИ от НСД защитных функций), определяемого в соответствии с требованиями нормативной документации к защищенной АС;

2) (M, S_m, t_m) , $m = \overline{1, M}$ – вектора, сформированного на основе результатов данных подсистемы регистрации и учета, где M – количество зарегистрированных переходов между состояниями СЗИ от НСД, S_m – конечное состояние m -го перехода СЗИ от НСД, t_m –

момент времени завершения m -го перехода.

Блок 2. Определение и ввод статистических параметров перехода СЗИ от НСД между состояниями: p_{ab} — вероятности перехода СЗИ от НСД из состояния a в состояние b (независимо от закона распределения); l — среднего времени нахождения КМП в состоянии a (при использовании экспоненциального закона распределения).

Блок 3. Расчет параметра v_m по формуле $v_m = 1/\tau_m$.

Блок 4. Вычисление по формуле (8) преобразования Лапласа функции $F_i(\tau)$ для времени нахождения КМП в состоянии i , распределенного по экспоненциальному закону $f_i(v)$.

Блоки 5, 6. Организация вложенных циклов с параметрами i, j для расчета значений функции a_{ij} .

Блок 7. Расчет элементов полумарковской матрицы $K_{ij}(\tau)$ с использованием формулы (5).

Блок 8. Заполнение вспомогательных массивов переменных начальными нулевыми значениями.

Блок 9. Организация вложенных циклов с параметрами h, j для вычисления значений коэффициентов систем уравнений (13-16).

Блок 10. Определение коэффициентов вращения, необходимых для решения системы линейных алгебраических уравнений, с использованием вспомогательных переменных t и phi .

Блок 11. Организация цикла с параметром j и расчет значений коэффициентов системы уравнений (16) с учетом изменения параметров по формуле (14) для реализации метода Гивенса при решении системы линейных алгебраических уравнений.

Блок 12. Вычисление параметров d_i правой части уравнений системы (16).

Блок 13. Вычисление значения q_{n-1} для состояния $n-1$ КМП.

Блок 14. Организация цикла с параметром i для нахождения значений функции $q_i(v)$.

Блок 15. Заполнение вспомогательного массива нулевыми значениями.

Блок 16. Организация вложенных циклов с параметрами i, j для переприсвоения элементам матрицы коэффициентов и параметрам правой части уравнений значений, полученных в ходе выполнения блоков 11, 12.

Блоки 17, 18. Обратный ход метода Гивенса. Организация цикла с параметром j для расчета значений вспомогательного массива S_i . Определение значений функции $q_i(v)$ для различных значений параметра i .

Блок 19. Вычисление значения показателя временной эффективности СЗИ от НСД $V_{ВЭСЗИ}$, которое на основании формулы (17) равно значению функции $q_1(\tau_m)$.

Блок 20. Вывод найденного значения $V_{ВЭСЗИ}$ — результата работы алгоритма.

Разработанный метод построения численно-аналитической модели реализован в виде алгоритма в программной среде MATLAB на примере подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» в АС. Выбор данной программной среды обусловлен такими ее достоинствами, как: высокий уровень визуализации, возможность модификации моделей для анализа других систем данного типа, наличие средств интеграции с другими программными продуктами. Графовая модель подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя», обеспечивающей вход в СЗИ от НСД посредством аутентификации пользователя, представлена на рис. 3.

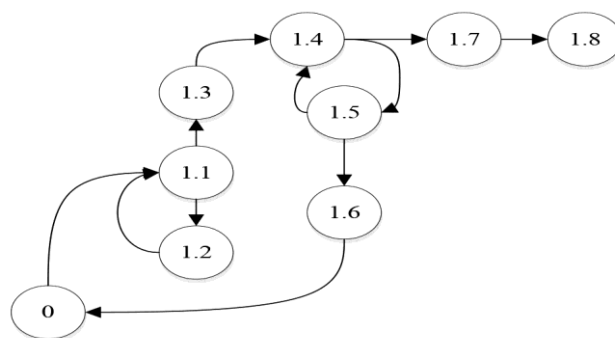


Рис.3. Графовая модель подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT»

Fig. 3. The graph model of the subsystem «Turning on the PC and user identification» of the information security system from unauthorized access «Guard NT»

А выполняемые ею функции, вероятности переходов КМП из различных состояний в конечное (поглощающее) состояние и среднее время нахождения рассматриваемой подсистемы в каждом из состояний — в табл. 1.

Таблица 1. Реакция подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» на деструктивное воздействие и время пребывания в заданных состояниях

Table 1. The response of the subsystem «Turning on the PC and user identification» of the information security system from unauthorized access «Guard NT» on the destructive effect and the time spent in the given states

№ состояния No. of state	Вероятность перехода КМП из различных состояний в конечное (поглощающее) состояние 1.8, q_n Probability of the transition of the ILC from various states to the final (absorbing) state 1.8, q_n	Функции, выполняемые подсистемой The functions performed by the subsystem	Время, с Time s
0	q_1	Включение ПК (прекращение выполнения функций автоматизированным рабочим местом) Turning on the PC (termination of functions by the workstation)	10
1.1	q_2	Предъявление идентификатора ID Presentation	1
1.2	q_3	Прекращение работы идентификатора (в случае новой попытки требуется заново ввести) Termination of the identifier (in the case of a new attempt, you must re-enter)	6
1.3	q_4	Допуск к вводу пароля Password Entry	1
1.4	q_5	Ввод пароля Password entry	5
1.5	q_6	Повтор Re-enter Password	5
1.6	q_7	Блокировка входа в систему при трехразовом неправильном вводе пароля Login blocking for three-time incorrect password entry	1
1.7	q_8	Аутентификация субъекта системы Authentication of the subject of the system	1
1.8	q_9	Вход в систему Login	5

Для проведения дальнейших расчетов использовались следующие значения вероятностей переходов между состояниями подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» P_{ab} :

$P_t[0, 1.1] = 1;$
 $P_t[1.1, 1.2] = 0.99; P_t[1.1, 1.3] = 0.01;$
 $P_t[1.2, 1.1] = 1;$
 $P_t[1.3, 1.4] = 1;$
 $P_t[1.4, 1.5] = 0.01; P_t[1.4, 1.7] = 0.99;$
 $P_t[1.5, 1.4] = 0.99; P_t[1.5, 1.6] = 0.01;$
 $P_t[1.7, 1.8] = 1.$

Результаты вычисления $q_i(\tau)$ для рассматриваемой подсистемы СЗИ от НСД в АС при ее переходе из начального состояния 0 и предпоследнего состояния 1.7 в конечное поглощающее состояние 1.8 представлены на рис. 4.

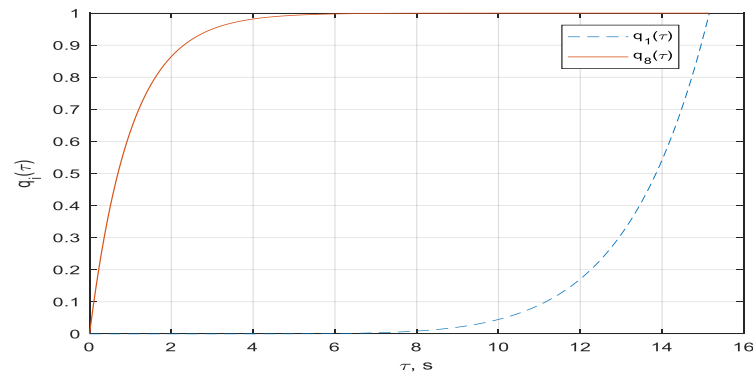


Рис.4. Вероятности перехода подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» из состояния 0 и состояния 1.7 в состояние 1.8.

Fig. 4. The probabilities of the transition of the «Turning on the PC and User Identification» subsystem of the information security system «Tamper NT» from unauthorized access from state 0 and state 1.7 to state 1.8.

В соответствии с графом (см. рис. 3) из состояния 1.7 возможен переход только в состояние 1.8, поэтому сумма по промежуточным состояниям в выражении (3) обращается в ноль, и для $q_8(\tau)$ с учётом конкретных значений вероятности перехода и времени пребывания рассматриваемой подсистемы в состоянии 1.7 (см. табл. 1) можно получить следующее простое выражение:

$$q_8(\tau) = p_{78}F_8(\tau) = Pt[1.7, 1.8] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{l_8}}\right) = 1 - e^{-\tau/1.0}. \quad (18)$$

График $q_8(\tau)$ (рис. 4), полученный путем аналитического решения системы уравнений (9) и выполнения обратного преобразования Лапласа для набора функций $q_i(\tau)$, полностью соответствует выражению (18), что подтверждает правильность разработанной численно-аналитической модели СЗИ от НСД и предложенного алгоритма расчета ВВХ.

Величина $q_1(\tau)$, выражающая вероятность перехода подсистемы «Включение ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» из начального состояния 0 в конечное состояние 1.8, является одним из основных показателей динамики функционирования рассматриваемой подсистемы СЗИ от НСД в АС и равна вероятности выполнения ею своих функций за промежуток времени, не превышающий τ . Как показывает график (рис. 4), вероятность выполнения функций подсистемой «Включение ПК и идентификация пользователя» возрастает с ростом максимально допустимого времени τ и достигает 1 при $\tau \sim 15$ сек. Пороговая величина времени 15 сек не превышает суммы времен нахождения рассматриваемой подсистемы в состояниях, образующих кратчайший путь из состояния «Включение ПК» в состояние «Вход в систему» 0 – 1.1 – 1.3 – 1.4 – 1.7 – 1.8 (см. граф на рис. 3). График, представленный на рисунке 4, позволяет также оценить вероятность выполнения функций подсистемой «Включение ПК и идентификация пользователя» за любое указанное время.

Выполнение аналогичных расчетов для других входных параметров позволяет выполнять оптимизацию СЗИ от НСД и проверять ее соответствие требованиям по вероятности выполнения функциональных задач за заданное время.

Вывод. Предложен метод построения численно-аналитической модели функционирования СЗИ от НСД в АС, позволяющей многократно снизить вычислительные затраты при расчете вероятностно-временных характеристик системы. Разработанный метод построения численно-аналитической модели реализован в виде алгоритма в пакете программ MATLAB. Представлены результаты расчетов вероятностно-временных характеристик подсистемы «Включе-

ние ПК и идентификация пользователя» СЗИ от НСД «Страж NT» в АС. Получение аналитических зависимостей вероятностей переходов между состояниями рассмотренной подсистемы позволяет провести оптимизацию времени выполнения ею функциональных задач. Предложенный метод построения численно-аналитической модели функционирования СЗИ от НСД в АС может быть использован для повышения эффективности эксплуатации данных систем.

Библиографический список:

1. Schneier B. We Have Root: Even More Advice from Schneier on Security / B. Schneier. Wiley, 2019. 304 p.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 2: Функциональные компоненты безопасности [Электронный ресурс]. — URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (дата обращения 18.10.2019).
3. ГОСТ Р 51583-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищённом исполнении [Электронный ресурс]. — URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (дата обращения: 11.10.2019).
4. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Электронный ресурс]. — URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (дата обращения 14.10.2019).
5. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. — URL:<http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (дата обращения: 18.10.2019).
6. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. URL:<http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (дата обращения: 11.10.2019).
7. Руководящий документ Государственной технической комиссии от 30 июня 1992 года. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения. [Электронный ресурс]. — URL:<https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (дата обращения: 10.11.2019).
8. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system / Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013. pp. 869-873.
9. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Электронный ресурс]. URL:https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (дата обращения: 24.10.2019).
10. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp. 100-112.
11. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et al.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp. 576-579.
12. Методы и средства оценки эффективности подсистемы защиты конфиденциального информационного ресурса при ее проектировании в системах электронного документооборота: монография / П.В. Зиновьев, И.И. Застрожных, Е.А. Рогозин. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2015. 106 с.
13. Питерсон Д.Ж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Д.Ж. Питерсон: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.
14. Котов В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 160 с.
15. Charaf H. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2017. pp. 277-282.
16. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2016. pp. 133-187.
17. Леонов Г.А. Современные методы символьных вычислений: ляпуновские величины и 16-я проблема Гильберта / Г.А. Леонов, Н.В. Кузнецов, Е.В. Кудряшова, О.А. Кузнецова // Труды СПИИРАН. — 2021. № 16 (1). С. 5-36.
18. Бубнов В.П. Особенности программной реализации численно-аналитического метода расчёта моделей нестационарных систем обслуживания / В.П. Бубнов, А.С. Еремин, С.А. Сергеев // Труды СПИИРАН. 2015. № 38 (1). С. 218-232.
19. Попов А.Д. Модель функционирования типовой системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных информационных системах ОВД / Е.А. Рогозин, А.Д. Попов // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. 2016. № 4. С. 122-132.
20. Дровникова И.Г. Численные методы расчёта показателя эффективности вспомогательной подсистемы в системе электронного документооборота / И.Г. Дровникова, П.В. Зиновьев, Е.А. Рогозин // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. 2016. № 4. С. 114-120.
21. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
22. О государственной тайне: закон Российской Федерации от 21.07.1993 № 5485-1 (в ред. от 08.03.2015) // СПС «Консультант Плюс» (дата обращения: 14.11.2019).
23. Попов А.Д. Численный метод оценки эффективности систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных информационных системах / А.Д. Попов // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. С. 53-62.
24. Амосов А.А. Вычислительные методы для инженеров / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский, Н.В. Копченкова. М.: Высшая школа, 1994. 544с.

25. Разработка имитационной модели системы защиты информации от несанкционированного доступа с использованием программной среды CPN Tools / Бокова О.И. [и др.] // Безопасность информационных технологий = IT Security. Том 26. 2019. № 3. С. 80-89.

References:

1. Schneier B. We Have Root: Even More Advice from Schneier on Security / B. Schneier. - Wiley, 2019. 304 p.
2. GOST R ISO/MEK 15408-2-2013. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespeche-niya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. CH. 2: Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti [Elektronnyy resurs]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (data obrashcheniya 18.10.2019). [GOST R ISO / IEC 15408-2-2013. Information technology. Methods and means of ensuring safety. Criteria for assessing the security of information technology. Part 2: Functional components of security [Electronic resource]. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (accessed October 18, 2019) (In Russ.)]
3. GOST R 51583-2014. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Zashchita informatsii. Po-ryadok sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchennom ispolnenii [Elektronnyy resurs]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (data obrashcheniya: 11.10.2019). [GOST R 51583-2014. National standard of the Russian Federation. Protection of information. The order of creating automated systems in a secure execution [Electronic resource]. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (accessed date: 10/11/2019) (In Russ.)]
4. FSTEC RF. Rukovodyashchiy dokument. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite in-formatsii [Elektronnyy resurs]. — URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchiy-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (data obrashcheniya 14.10.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for the protection of information [Electronic resource]. - URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchiy-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-artghartomhii> (circulation date 10/14/2019) (In Russ.)]
5. FSTEC RF. Rukovodyashchiy dokument. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noy tekhniki i av-tomatizirovannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyy resurs]. — URL: <http://fstec.ru/component/attachments/299> (data obrashcheniya: 18.10.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. The concept of protecting computer equipment and automated systems from unauthorized access to information [Electronic resource]. - URL: <http://fstec.ru/component/attachments/299> (accessed: 10/18/2019) (In Russ.)]
6. FSTEC RF. Rukovodyashchiy dokument. Sredstva vychislitel'noy tekhniki. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zashchishchennosti ot nesanktsionirovannogo dostupa k in-formatsii [Elektronnyy resurs]. URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchiy-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (data obrashcheniya: 11.10.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information [Electronic resource]. - URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchiy-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyu-giyuy> (Date of treatment: 10/11/2019) (In Russ.)]
7. Rukovodyashchiy dokument Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komisii ot 30 iyunya 1992 goda. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Terminy i opredeleniya. [Elektronnyy resurs]. — URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (data obrashcheniya: 10.11.2019). [Guidance document of the State Technical Commission of June 30, 1992. Protection against unauthorized access to information. Terms and Definitions. [Electronic resource]. - URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (accessed: 11/10/2019) (In Russ.)]
8. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system / Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. - 2013 pp. 869-873.
9. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Electronic resource]. - URL: https://download.schneider-electric.com/files?P_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (accessed: 10.24.2019).
10. Kresimir S., The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp. 100-112.
11. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et al.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). - 2015. pp. 576-579.
12. Metody i sredstva otsenki effektivnosti podsystemy zashchity konfidentsial'nogo informa-tsionnogo resursa pri yeye proyektirovani v sistemakh elektronnoy dokumentooborota: monografiya / P.V. Zinov'ev, I.I. Zastrozhnov, Ye.A. Rogozin. — Voronezh: Voronezh. gos. tekhn. un-t, 2015. — 106 s. [Methods and means of assessing the effectiveness of the protection subsystem of a confidential information resource during its design in electronic document management systems: monograph / P.V. Zinov'ev, I.I. Zastrozhnov, E.A. Rogozin. - Voronezh: Voronezh. state tech. Univ., 2015. 106 p. (In Russ.)]
13. Piterson D.ZH. Teoriya setey Petri i modelirovaniye sistem / D.ZH. Piterson: per. s angl. — M.: Mir, 1984. — 264 s. [Peterson D.J. The theory of Petri nets and system modeling / D.Zh. Peterson: Per. from English - M.: Mir, 1984. 264 p. (In Russ.)]
14. Kotov V.Ye. Seti Petri / V.Ye. Kotov. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984. 160 s. [Kotov V.E. Petri nets / V.E. Kotov. M.: Science. The main edition of the physical and mathematical literature, 1984. 160 p. (In Russ.)]
15. Charaf N. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2017 pp. 277-282.
16. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2016 pp. 133-187.
17. Leonov G.A. Sovremennyye metody simvol'nykh vychisleniy: lyapunovskiye velichiny i 16-ya pro-blema Gil'berta / G.A. Leonov, N.V. Kuznetsov, Ye.V. Kudryashova, O.A. Kuznetsova // Trudy SPIIRAN. 2021. № 16 (1). S. 5-36. [Leonov G.A. Modern methods of symbolic calculations: Lyapunov quantities and the 16th Hilbert problem / G.A. Leonov, N.V. Kuznetsov, E.V. Kudryashova, O.A. Kuznetsova // Transactions of SPIIRAS. 2021. No. 16 (1). pp. 5-36. (In Russ.)]
18. Bubnov V.P. Osobennosti programmnoy realizatsii chislennno-analiticheskogo metoda raschota modeley nestatsionarnykh sistem obsluzhivaniya / V.P. Bubnov, A.S. Yeremin, S.A. Sergeyev // Trudy SPI-IRAN. 2015. № 38 (1). S. 218-232. [Bubnov V.P.

Features of software implementation of a numerical-analytical method for calculating models of non-stationary service systems / V.P. Bubnov, A.S. Eremin, S.A. Sergeev // Transactions of SPI-IRAN. 2015. No. 38 (1). pp. 218-232. (In Russ.)]

19. Popov A.D. Model' funktsionirovaniya tipovoy sistemy zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh OVD / Ye.A. Rogozin, A.D. Popov // Vestnik Voronezh. in-ta MVD Rossii. 2016. № 4. S. 122-132. [Popov A.D. The model of functioning of a typical system for protecting information from unauthorized access in automated information systems ATS / E.A. Rogozin, A.D. Popov // Bulletin of Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2016. No. 4. pp. 122-132. (In Russ.)]

20. Drovnikova I.G. Chislennyye metody raschota pokazatelya effektivnosti vspomogatel'noy pod-sistemy v sisteme elektron-nogo dokumentooborota / I.G. Drovnikova, P.V. Zinov'yev, Ye.A. Rogozin // Vestnik Voronezh. in-ta MVD Rossii. 2016. № 4. S. 114-120. [Drovnikova I.G. Numerical methods for calculating the performance indicator of the auxiliary sub-system in the electronic document management system / I.G. Drovnikova, P.V. Zinov'yev, E.A. Rogozin // TBulletin of Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2016. No. 4. pp. 114-120. (In Russ.)]

21. Tikhonov V.I. Markovskie protsessy / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. M.: Sov. radio, 1977. [Tikhonov V.I. Markov processes / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. M.: Sov. radio, 1977. (In Russ.)]

22. O gosudarstvennoy tayne: zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21.07.1993 № 5485-1 (v red. ot 08.03.2015) // SPS «Konsul'tant Plyus» (data obrashcheniya: 14.11.2019). [On state secret: the law of the Russian Federation of July 21, 1993 No. 5485-1 (as amended on March 8, 2015) // ATP "Consultant Plus" (appeal date: November 14, 2019) (In Russ.)]

23. Popov A.D. Chislennyy metod otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh / A.D. Popov // Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr. Voronezh: FGBOU VO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet», 2018. S. 53-62. [Popov A.D. A numerical method for evaluating the effectiveness of information protection systems against unauthorized access in automated information systems / A.D. Popov // Problems of ensuring the reliability and quality of devices, devices and systems: interuniversity. Sat scientific tr Voronezh: Voronezh State Technical University, 2018. pp. 53-62 (In Russ.)]

24. Amosov A.A. Vychislitel'nyye metody dlya inzhenerov / A.A. Amosov, YU.A. Dubinskiy, N.V. Kopchenova. M.: Vysshaya shkola, 1994. 544s. [Amosov A.A. Computational methods for engineers / A.A. Amosov, Yu.A. Dubinsky, N.V. Kopchenova. M.: Higher School, 1994. 544 p. (In Russ.)]

25. Razrabotka imitatsionnoy modeli sistemy zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo do-stupa s ispol'zovaniyem programmnoy sredy CPN Tools / Bokova O.I. [i dr.] // Bezopasnost' in-formatsionnykh tekhnologiy = IT Security. Tom 26. 2019. № 3. S. 80-89. [Development of a simulation model of a system for protecting information from unauthorized access using the CPN Tools software environment / Bokova OI [et al.] // Security of information technology = IT Security. Volume 26. 2019. No. 3. pp. 80-89. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Алферов Владимир Павлович, соискатель кафедры конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры; e-mail: alferov_vladimir@mail.ru

Бацких Анна Вадимовна, адъюнкт; e-mail: svatikova96@mail.ru

Крислов Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 6 ОНИ НИЦ Образовательных и информационных технологий; e-mail: alexph@mail.ru

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

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

Information about the authors:

Vladimir P. Alferov, Applicant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Equipment; e-mail: alferov_vladimir@mail.ru

Anna V. Butskikh, Adjunct; e-mail: svatikova96@mail.ru

Aleksey V. Krisilov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher 6 THEIR SIC Educational and Information Technologies; e-mail: alexph@mail.ru

Anton D. Popov, Cand. Sci. (Technical), Department of Automated Information Systems of Internal Affairs; e-mail: anton.holmes@mail.ru

Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs; e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.12.2019.

Принята в печать 18.01.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.12.2019.

Accepted for publication 18.01.2020.

Для цитирования: И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, В.В. Конобеевских. Анализ типовых сетевых атак на автоматизированные системы органов внутренних дел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 72-85. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-72-85

For citation: I.G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, V.V. Konobeevsky. Analysis of typical network attacks on automated systems of internal affairs departments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1): 72-85. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-72-85

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-72-85

АНАЛИЗ ТИПОВЫХ СЕТЕВЫХ АТАК НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, В.В. Конобеевских

Воронежский институт Министерства внутренних дел России,
394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме: *Цель.* Важными тенденциями теории и практики функционирования современных защищенных автоматизированных систем на объектах информатизации органов внутренних дел являются возрастание числа угроз, реализуемых посредством удаленного несанкционированного доступа (сетевых атак) к конфиденциальному информационному ресурсу, а также усложнение реализации механизмов защиты от них. С целью повышения реальной защищенности существующих и перспективных (разрабатываемых) автоматизированных систем на объектах информатизации органов внутренних дел необходимо определить и проанализировать типовые сетевые атаки, направленные на компоненты и программное обеспечение этих систем. *Метод.* Методом решения данной задачи является всесторонний анализ процесса реализации сетевых атак на автоматизированные системы при их эксплуатации в защищенном исполнении на объектах информатизации органов внутренних дел. *Результат.* На основе анализа банка данных угроз безопасности информации, разработанного Федеральной службой по техническому и экспортному контролю России, особенностей эксплуатации современных защищенных автоматизированных систем на объектах информатизации органов внутренних дел, результатов опроса экспертов в области защиты информации выделены в соответствии с семью классификационными признаками и охарактеризованы восемь типов наиболее опасных и часто реализуемых в настоящее время сетевых атак на автоматизированные системы органов внутренних дел с учетом их источников, объектов воздействия и возможных последствий реализации. *Вывод.* Представленные результаты планируется использовать в дальнейших исследованиях для проведения количественной оценки опасности реализации типовых атак и разработки частной модели актуальных атак для конкретной автоматизированной системы с учетом особенностей ее функционирования в защищенном исполнении на объекте информатизации органа внутренних дел.

Ключевые слова: защита информации, информационная безопасность, автоматизированная система, информационная угроза, несанкционированный доступ, сетевая атака

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
ANALYSIS OF TYPICAL NETWORK ATTACKS ON AUTOMATED SYSTEMS OF INTERNAL
AFFAIRS DEPARTMENTS

I.G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, V.V. Konobeevsky
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
53 Patriotov St., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Aim Important contemporary trends in the theory and functional practice of secure automated systems at informatisation facilities of internal affairs bodies include an increase in the number of threats realised through remote unauthorised access (network attacks) on confidential information resources, as well as the increasing complexity of implementing mechanisms aimed at providing protection from such attacks. In order to increase the effectiveness of existing and prospective automated security systems at the informatisation facilities of internal affairs bodies, it is necessary to identify and analyse typical network attacks aimed at components and software comprising these systems. **Method.** The method for solving this problem consists in a comprehensive analysis of the process of implementing network attacks on automated systems when they are used in secure mode in the informatisation facilities of internal affairs bodies. **Results.** Based on the analysis of information held in the security threat database developed by the Russian Federal Service for Technical and Export Control (FSTEC), modern features and operations of secure automated systems on the informatisation facilities of bodies of internal affairs and the results of a survey of experts in the field of information protection of allocated in accordance with the classification typology, eight types of dangerous attacks on automated systems of the internal affairs bodies are described taking into account their sources, objects, effects and possible consequences of implementation. **Conclusion.** The presented results are of use in further studies to conduct a quantitative assessment of the danger of typical attacks and for developing a private model of actual attacks for a specific automated system, taking into account their functional features in secure mode operations at the informatisation facility of the internal affairs body.

Keywords: information protection, information security, automated system, information threat, unauthorised access, network attack

Введение. Основными тенденциями последних лет в сфере информатизации органов внутренних дел (ОВД) являются возрастание числа информационных угроз, реализуемых посредством удаленного несанкционированного доступа (НСД) (сетевых атак), направленных на компоненты и программное обеспечение (ПО) автоматизированных систем (АС), а также усложнение реализации механизмов защиты от них на объектах, эксплуатирующих защищенные АС ОВД [1-5]. Обуславливающие данные тенденции причины можно объединить в два блока [6, 7]:

- увеличение количества обрабатываемой конфиденциальной информации, расширение ее номенклатуры, усложнение технологического цикла обработки и др. влекут за собой усложнение и разнообразие программного и аппаратного обеспечения современных АС на объектах информатизации ОВД, необходимого для удовлетворения возрастающих потребностей правоохранительных органов, что, в свою очередь, приводит к росту числа потенциальных уязвимостей и, следовательно, требует решения задачи защиты информации (ЗИ);

- действующие руководящие документы, нормирующие требования к ЗИ современных АС ОВД, не учитывают некоторые появившиеся виды потенциально опасных сетевых атак и расширяющиеся возможности уже известных видов атак, а также увеличение ассортимента методов противодействия им, что приводит к необходимости доработки имеющихся нормативно-распорядительных документов по ЗИ на объектах информатизации ОВД с учетом требований современной международной и отечественной нормативной документации, регламентирующей разработку и эксплуатацию АС ОВД в защищенном исполнении, а также приказов МВД России.

Постановка задачи. Важной задачей является не только анализ, классификация и систематизация уязвимостей компонентов и ПО современных АС ОВД с точки зрения реализации типовых сетевых атак и создание на этой основе таксономии уязвимостей, но также определение и анализ основных типов сетевых атак с целью оценивания опасности их реализации. Результаты проведенной оценки послужат основой для разработки модели актуальных атак с учетом особенностей функционирования современных защищенных АС на объектах информатизации ОВД и формирования предложений в действующие нормативно-распорядительные документы в соответствии с требованиями современной международной, отечественной и ведомственной нормативной документации, регламентирующей разработку и эксплуатацию АС ОВД в защищенном исполнении [2, 8-16].

Методы исследования. При рассмотрении вопроса функционирования АС в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД из всего множества угроз, связанных с НСД к служебной информации, сетевые атаки имеют определяющее значение [7, 17, 18]. Единым понятием «сетевая атака» может быть объединено все многообразие условий и факторов, способных посредством удаленного взаимодействия с объектом воздействия оказывать негативное влияние на безопасность служебной информации в АС ОВД, в том числе на нарушение таких ее потребительских свойств, как конфиденциальность, целостность или доступность, а также на надежность (эффективность) функционирования как системы защиты информации, так и АС ОВД в целом [19-22].

В соответствии с [18] сетевую (удаленную) атаку на АС ОВД будем рассматривать как действие либо совокупность действий, направленных на реализацию угрозы удаленного доступа (с использованием протоколов сетевого взаимодействия) к технологической информации или информации пользователя в компьютерной сети.

Результаты проведенного в [23] анализа позволили определить процентное соотношение нарушений свойств служебной информации в защищенных АС в результате воздействия сетевых атак, применительно к объекту информатизации ОВД: нарушение конфиденциальности (33 %), нарушение целостности (31 %), нарушение доступности (36 %).

Описание способа реализации сетевой атаки сводят, как правило, к описанию виртуального канала ее реализации [7]. В связи с наличием значительного числа уязвимостей компонентов и ПО в практике эксплуатации современных АС ОВД в защищенном исполнении в большинстве случаев имеет место полноступенчатый пучок сингулярных каналов (множественный канал) реализации сетевых атак [24]. Имеющаяся статистическая неопределенность использования нарушителем какого-либо из сингулярных каналов, составляющих множественный канал, в значительной мере обуславливает вероятностный характер реализации сетевой атаки по множественному виртуальному каналу на объектах, эксплуатирующих защищенные АС ОВД. Процесс реализации типовой сетевой атаки на информационный ресурс АС, связанный с персональными данными, подробно описан в [13]. В общем случае он включает в себя последовательное прохождение четырех этапов: сбор информации об объекте атаки; вторжение; реализация деструктивных действий; ликвидация следов атаки.

На основе анализа возможных объектов воздействия угроз, широко представленных в [23], и их связи с банком данных угроз БИ (bdu.fstec.ru), разработанным Федеральной службой по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России, уязвимостей (с точки зрения реализации сетевых атак) компонентов и ПО АС на объектах информатизации ОВД, определенных по итогам опроса экспертов в области обеспечения информационной безопасности, выделены основные объекты воздействия сетевых атак на АС ОВД [25, 26]: ПО, аппаратно-техническое обеспечение, оператор, каналы передачи данных. Для классификации сетевых атак на защищенную АС ОВД используем систему классификационных признаков, предложенную в [13] для телекоммуникационной сети, подключенной к глобальной сети Internet, включающую семь признаков: характер воздействия; цель воздействия; условие начала атаки; наличие обратной связи с атакуемым объектом; расположение субъекта атаки относительно атакуемого объекта; соотношение количества атакуемых объектов и атакующих субъектов; уровень эталонной модели OSI, на котором реализуется атака.

Обсуждение результатов. Анализ 216 угроз, представленных в настоящее время в банке данных угроз БИ, разработанном ФСТЭК России (bdu.fstec.ru), особенностей эксплуатации современных защищенных АС на объектах информатизации ОВД, результатов опроса экспертов в области ЗИ позволил выделить в соответствии с проведенной классификацией восемь типов наиболее опасных и часто реализуемых в настоящее время сетевых атак на АС ОВД [7, 13, 17]. Сформированный перечень включает в себя следующие основные типы атак: анализ сетевого трафика, сканирование сети, «парольная» атака, подмена доверенного объекта сети, навязывание ложного маршрута, внедрение ложного объекта сети, отказ в обслуживании, удаленный запуск приложений.

Проанализируем сетевые атаки на компоненты и ПО защищенной АС ОВД, относящиеся к выделенным типам, с учетом их источников, объектов воздействия и возможных последствий реализации (причиненного ущерба). Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Анализ сетевого трафика», с указанием их шифров представлен на рис.1.

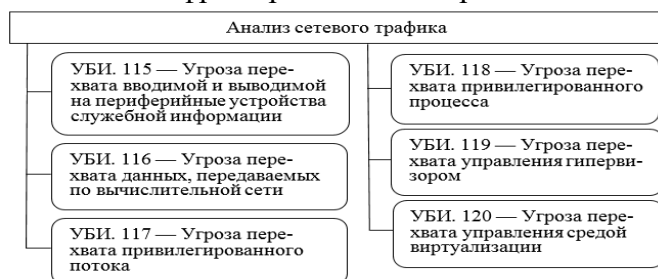


Рис.1. Атаки типа «Анализ сетевого трафика» на АС ОВД

Fig.1. Attacks of the «Network Traffic Analysis» type against automated systems of internal affairs bodies

Сетевая атака «Угроза перехвата вводимой и выводимой на периферийные устройства служебной информации» (УБИ. 115), заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к служебной информации, вводимой и выводимой на периферийные устройства, путем перехвата данных, обрабатываемых контроллерами периферийных устройств. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, прикладное ПО, аппаратное обеспечение АС ОВД. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата данных, передаваемых по вычислительной сети» (УБИ. 116) состоит в возможности осуществления нарушителем НСД к сетевому трафику дискредитируемой вычислительной сети в пассивном (иногда в активном) режиме для сбора и анализа сведений, которые могут быть использованы в дальнейшем для реализации других угроз, оставаясь при реализации данной угрозы невидимым (скрытным) получателем перехватываемых данных. Источник атаки — внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: сетевой узел, сетевой трафик. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата привилегированного потока» (УБИ. 117) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к потоку данных, созданного приложением с дополнительными привилегиями, путем синхронного или асинхронного деструктивного программного воздействия на него. Источники атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом, внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, прикладное ПО, сетевое ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата привилегированного процесса» (УБИ. 118) состоит в возможности для нарушителя приобретения права управления процессом, обладающим высокими привилегиями, с целью выполнения произвольного вредоносного кода с правами дискредитированного процесса. Источники атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом, внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, приклад-

ное ПО, сетевое ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата управления гипервизором» (УБИ. 119) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к информационным, программным и вычислительным ресурсам, зарезервированным и управляемым гипервизором, за счет получения нарушителем права управления гипервизором путем эксплуатации уязвимостей консоли управления гипервизором. Источники атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом, внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, гипервизор, консоль управления гипервизором. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата управления средой виртуализации» (УБИ. 120) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к информационным, программным и вычислительным ресурсам, зарезервированным и управляемым всеми гипервизорами, реализующими среду виртуализации, за счёт получения нарушителем права управления этими гипервизорами путём эксплуатации уязвимостей консоли средства управления виртуальной инфраструктурой. Источники атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом, внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: АС ОВД, системное ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

2. Сетевая атака на АС ОВД «Угроза сканирования веб-сервисов, разработанных на основе языка описания WSDL» (УБИ. 151), относящаяся к типу «Сканирование сети», заключается в возможности получения нарушителем сведений о текущей конфигурации веб-служб и наличии в ней уязвимостей путем исследования WSDL-интерфейса веб-сервера. Источник атаки — внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: сетевое ПО, сетевой узел. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

3. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Парольная» атака», с указанием их шифров представлен на рис. 2.

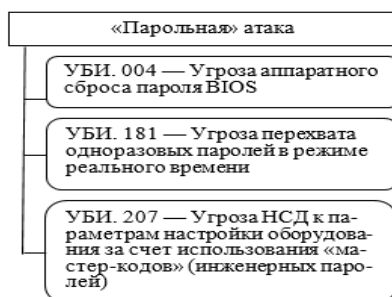


Рис. 2. Атаки типа «Парольная» атака» на АС ОВД

Fig. 2. Attacks of the «Password» attack type on automated systems of internal affairs bodies

Сетевая атака «Угроза аппаратного сброса пароля BIOS» (УБИ. 004) заключается в возможности сброса паролей, установленных в BIOS/UEFI без прохождения процедуры авторизации в системе путем обесточивания микросхемы BIOS (съемка аккумулятора) или установки перемычки в штатном месте на системной плате (переключение «джампера»). Источник атаки — внутренний нарушитель, обладающий низким потенциалом. Объекты воздействия: микропрограммное и аппаратное обеспечение BIOS/UEFI. Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза перехвата одноразовых паролей в режиме реального времени» (УБИ. 181) состоит в возможности для нарушителя получить управление критическими операциями пользователя посредством перехвата одноразовых паролей, которые высылаются системой автома-

тически, для дальнейшего использования их с целью выполнения неправомерных действий прежде, чем истечет их срок действия (обычно не более 5 минут). Источник атаки — внешний нарушитель, обладающий средним потенциалом. Объект воздействия — сетевое ПО. Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза НСД к параметрам настройки оборудования за счет использования «мастер-кодов» (инженерных паролей)» (УБИ. 207) состоит в получении несанкционированного доступа к параметрам настройки информации в оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) путем использования специальных инженерных паролей («мастер-кодов»), «жестко прописанных» в ПО данного оборудования. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: аппаратно-техническое обеспечение, ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

4. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Подмена доверенного объекта сети», с указанием их шифров представлен на рисунке 3.

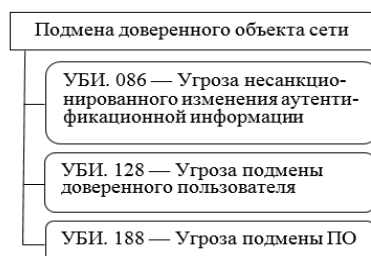


Рис. 3. Атаки типа «Подмена доверенного объекта сети» на АС ОВД

Fig. 3. Attacks of the type «Substitution of a trusted network object» with automated systems of internal affairs bodies

Сетевая атака «Угроза несанкционированного изменения аутентификационной информации» (УБИ. 086) заключается в возможности осуществления неправомерного доступа нарушителем к аутентификационной информации других пользователей с помощью штатных средств операционной системы или специальных программных средств. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, объекты файловой системы, учетные данные пользователя, реестр. Возможные последствия реализации атаки: нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены доверенного пользователя» (УБИ. 128) заключается в возможности нарушителя выдавать себя за легитимного пользователя и выполнять приём/передачу данных от его имени. Данную угрозу можно охарактеризовать как «имитация действий клиента». Источник атаки: внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: сетевой узел, сетевое ПО. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены ПО» (УБИ. 188) заключается в возможности осуществления нарушителем внедрения в систему вредоносного ПО за счет загрузки и установки вредоносного ПО, скрытого под видом легитимного свободно распространяемого ПО. Источник атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: прикладное ПО, сетевое ПО, системное ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

5. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Навязывание ложного маршрута», с указанием их шифров представлен на рис. 4.

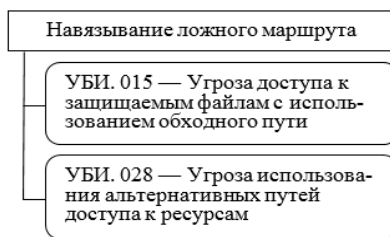


Рис. 4. Атаки типа «Навязывание ложного маршрута» на АС ОВД

Fig. 4. Attacks of the type «Imposing a False Route» on an automated system of internal affairs bodies

Сетевая атака «Угроза доступа к защищаемым файлам с использованием обходного пути» (УБИ. 015) заключается в возможности получения нарушителем доступа к скрытым/защищаемым каталогам или файлам посредством различных воздействий на файловую систему. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия — объекты файловой системы. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза использования альтернативных путей доступа к ресурсам» (УБИ. 028) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к защищаемой служебной информации в обход штатных механизмов с помощью нестандартных интерфейсов (в том числе доступа через командную строку в обход графического интерфейса). Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: сетевой узел, объекты файловой системы, прикладное ПО, системное ПО. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

6. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Внедрение ложного объекта сети», с указанием их шифров представлен на рис. 5.



Рис. 5. Атаки типа «Внедрение ложного объекта сети» на АС ОВД

Fig. 5. Attacks of the type “Implementation of a false network object” on an automated system of internal affairs bodies

Сетевая атака «Угроза загрузки нештатной операционной системы» (УБИ.018) заключается в возможности подмены нарушителем загружаемой операционной системы путем несанкционированного переконфигурирования в BIOS/UEFI пути доступа к загрузчику операционной системы. Источник атаки — внутренний нарушитель с низким потенциалом. Объект воздействия — микропрограммное обеспечение BIOS/UEFI. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза избыточного выделения оперативной памяти» (УБИ.022) заключается в возможности выделения значительных ресурсов оперативной памяти для обслуживания запросов вредоносных программ и соответственного снижения объема ресурсов оперативной памяти, доступных в АС ОВД для выделения в ответ на запросы программ легальных пользователей. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний наруши-

тель с низким потенциалом. Объекты воздействия: аппаратно-техническое обеспечение, системное ПО, сетевое ПО. Возможное последствие реализации атаки — нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза изменения компонентов АС ОВД» (УБИ.023) заключается в возможности получения нарушителем доступа к сети, файлам, внедрения закладок и т.д. путем несанкционированного изменения состава программных или аппаратных средств АС ОВД, что в дальнейшем позволит осуществлять данному нарушителю (или другому — внешнему) несанкционированные действия в данной системе. Источник атаки — внутренний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: АС ОВД, сервер, рабочая станция, виртуальная машина, системное ПО, прикладное ПО, аппаратно-техническое обеспечение. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза изменения режимов работы аппаратных элементов компьютер» (УБИ.024) состоит в возможности для нарушителя изменить режимы работы аппаратных элементов компьютера посредством несанкционированного переконфигурирования BIOS/UEFI. Источник угрозы — внутренний нарушитель с высоким потенциалом. Объекты воздействия: микропрограммное и аппаратное обеспечение BIOS/UEFI. Возможные последствия реализации атаки: нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза изменения системных и глобальных переменных» (УБИ.025) заключается в возможности осуществления нарушителем опосредованного деструктивного программного воздействия на некоторые программы или АС ОВД в целом путем изменения используемых дискредитируемыми программами единых системных и глобальных переменных. Источник атаки — внутренний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, прикладное ПО, сетевое ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза искажения XML-схемы» (УБИ.026) заключается в возможности изменения нарушителем алгоритма обработки информации приложениями, функционирующими на основе XML-схем, вплоть до приведения приложения в состояние «отказ в обслуживании», путем изменения XML-схемы, передаваемой между клиентом и сервером. Источники атаки: внутренний нарушитель со средним потенциалом, внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: сетевой узел, сетевое ПО, сетевой трафик. Возможные последствия реализации атаки: нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза искажения вводимой и выводимой на периферийные устройства информации» (УБИ.027) заключается в возможности дезинформирования пользователей или автоматических систем управления путем подмены или искажения исходных данных, поступающих от датчиков, клавиатуры или других устройств ввода информации, а также подмены или искажения служебной информации, выводимой на принтер, дисплей оператора или на другие периферийные устройства. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с высоким потенциалом. Объекты воздействия: системное ПО, прикладное ПО, сетевое ПО, аппаратно-техническое обеспечение. Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подделки записей журнала регистрации событий» (УБИ. 124) заключается в возможности внесения нарушителем изменений в журналы регистрации событий безопасности дискредитируемой системы для введения в заблуждение ее администраторов или сокрытия следов реализации других угроз. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объект воздействия — системное ПО. Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены беспроводного клиента или точки доступа» (УБИ. 126) заключается в возможности получения нарушителем аутентификационной или другой защищаемой информации, передаваемой в ходе автоматического подключения точек беспроводного

доступа или клиентского ПО к доверенным субъектам сетевого взаимодействия, подмененным нарушителем. Источник атаки — внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: сетевой узел, сетевое ПО, аппаратно-техническое обеспечение, точка беспроводного доступа. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены действия пользователя путем обмана» (УБИ. 127) заключается в возможности нарушителя выполнения неправомерных действий в АС ОВД от имени другого пользователя с помощью методов социальной инженерии или технических методов. Источник атаки — внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: прикладное ПО, сетевое ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены резервной копии программного обеспечения BIOS» (УБИ. 129) заключается в возможности опосредованного внедрения нарушителем в BIOS/UEFI дискредитируемого компьютера вредоносного кода, путем ожидания или создания необходимости выполнения процедуры восстановления предыдущей версии ПО BIOS/UEFI, предварительно подмененной нарушителем. Источник атаки — внутренний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: микропрограммное и аппаратное обеспечение BIOS/UEFI. Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены содержимого сетевых ресурсов» (УБИ. 130) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к защищаемым данным пользователей сети или проведения различных мошеннических действий путем скрытной подмены содержимого хранящихся (сайты, веб-страницы) или передаваемых (электронные письма, сетевые пакеты) по сети данных. Источник атаки — внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: прикладное ПО, сетевое ПО, сетевой трафик. Возможное последствие реализации атаки — нарушение конфиденциальности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза подмены субъекта сетевого доступа» (УБИ. 131) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к защищаемым данным пользователей сети или проведения различных мошеннических действий путем скрытной подмены в отправляемых дискредитируемым пользователем сетевых запросах сведений об отправителе сообщения. Данную угрозу можно охарактеризовать как «имитация действий сервера». Источник атаки — внешний нарушитель со средним потенциалом. Объекты воздействия: прикладное ПО, сетевое ПО, сетевой трафик. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности служебной информации.

7. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Отказ в обслуживании», с указанием их шифров представлен на рис. 6. Сетевая атака «Угроза отказа в загрузке входных данных неизвестного формата хранилищем больших данных» (УБИ. 105) заключается в возможности отказа хранилищем больших данных в приеме входных данных неизвестного формата от легального пользователя. Источник атаки — внутренний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: хранилище больших данных, метаданные.

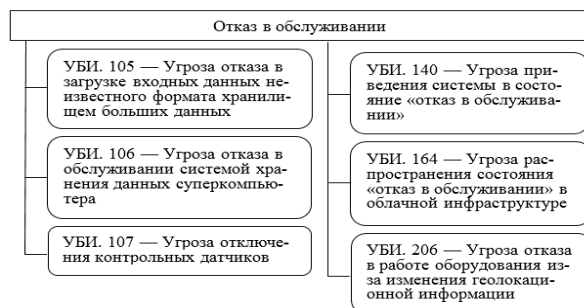


Рис. 6. Атаки типа «Отказ в обслуживании» на АС ОВД
Fig. 6. Denial of service attacks on an automated system of internal affairs bodies

Возможные последствия реализации атаки: нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза отказа в обслуживании системой хранения данных суперкомпьютера» (УБИ.106) заключается в возможности значительного замедления работы терминальных сессий всех пользователей суперкомпьютера, вплоть до достижения всем суперкомпьютером состояния «отказ в обслуживании» при превышении максимально достижимой нагрузки на параллельную файловую систему суперкомпьютера. Источник атаки - внутренний нарушитель с низким потенциалом. Объект воздействия — система хранения данных суперкомпьютера. Возможное последствие реализации атаки — нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза отключения контрольных датчиков» (УБИ.107) заключается в возможности обеспечения нарушителем информационной изоляции системы безопасности путем прерывания канала связи с контрольными датчиками, следящими за параметрами состояния системы, или нарушения работы самих датчиков. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с высоким потенциалом. Объект воздействия — системное ПО. Возможные последствия реализации атаки: нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза приведения системы в состояние «отказ в обслуживании»» (УБИ.140) состоит в возможности для дискредитированной АС ОВД отказать в доступе легальным пользователям при лавинообразном увеличении числа сетевых соединений с данной системой или при использовании недостатков реализации сетевых протоколов. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: АС ОВД, сетевой узел, системное ПО, сетевое ПО, сетевой трафик, телекоммуникационное устройство. Возможное последствие реализации атаки — нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза распространения состояния «отказ в обслуживании» в облачной инфраструктуре» (УБИ. 164) состоит в возможности распространять негативные последствия от реализации угроз на физическом или виртуальном уровне как на другие уровни (управления и оркестровки) облачной инфраструктуры, так и на все АС, которые развернуты на объектах информатизации ОВД на основе дискредитированной облачной инфраструктуры. Источники атаки: внутренний нарушитель с низким потенциалом, внешний нарушитель с низким потенциалом. Объекты воздействия: облачная инфраструктура, созданная с использованием технологий виртуализации. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Сетевая атака «Угроза отказа в работе оборудования из-за изменения геолокационной информации» (УБИ.206) состоит в прекращении работы оборудования с ЧПУ за счет изменения геолокационной информации о данном оборудовании. Источник атаки — внешний нарушитель с высоким потенциалом, Объект воздействия — аппаратно-техническое устройство. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение доступности служебной информации.

8. Перечень атак на АС ОВД, относящихся к типу «Удаленный запуск приложений», с указанием их шифров представлен на рис. 7. Сетевая атака «Угроза удаленного запуска вредоносного кода в обход механизмов защиты операционной системы» (УБИ.195) заключается в возможности удаленного запуска вредоносного кода за счет создания приложений, использующих обход встроенных в операционную систему механизмов защиты. Источник атаки — внешний нарушитель с высоким потенциалом. Объекты воздействия: стационарные и мобильные устройства (компьютеры и ноутбуки) (аппаратное устройство).

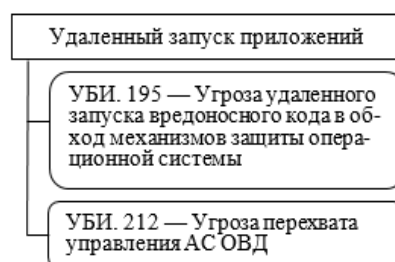


Рис. 7. Атаки типа «Удаленный запуск приложений» на АС ОВД
Fig. 7. Attacks of the «Remote Application Launch» type against an automated system of internal affairs bodies

Возможное последствие реализации атаки — нарушение целостности служебной информации. Сетевая атака «Угроза перехвата управления АС ОВД» (УБИ.212) заключается в возможности осуществления нарушителем НСД к информационным, программным и вычислительным ресурсам АС ОВД в результате подмены средств централизованного управления системой или ее компонентами. Источник атаки — внутренний нарушитель со средним потенциалом. Объект воздействия — инфраструктура АС ОВД. Возможные последствия реализации атаки: нарушение конфиденциальности, нарушение целостности, нарушение доступности служебной информации.

Вывод. В статье сформирован перечень основных сетевых атак на АС ОВД, включающий восемь типов наиболее опасных и часто реализуемых в настоящее время атак, классифицированных по семи признакам. Представлено описание выделенных типов атак с учетом их источников, объектов воздействия и возможных последствий реализации (причиненного ущерба).

Результаты анализа сетевых атак из сформированного перечня, позволят провести количественную оценку опасности их реализации, что послужит основой для разработки частной модели актуальных атак для конкретной АС с учетом особенностей ее функционирования в защищенном исполнении на объекте информатизации ОВД. Это позволит сформировать предложения в действующие нормативно-распорядительные документы по ЗИ в АС ОВД в соответствии с требованиями современной международной, отечественной и ведомственной нормативной документации, регламентирующей разработку и эксплуатацию АС ОВД в защищенном исполнении, с целью повышения реальной защищенности существующих и перспективных (разрабатываемых) АС на объектах информатизации ОВД.

Библиографический список:

1. Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 05.12.2016 № 646 [Электронный ресурс]. — URL:<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002> (дата обращения: 14.11.2019).
2. Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года: приказ МВД России от 14.03.2012 № 169 [Электронный ресурс]. RL:<http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (дата обращения: 27.11.2019).
3. Butusov I.V. Methodology of Security Assessment Automated Systems as Objects Critical Information Infrastructure / I.V. Butusov, A.A. Romanov [Электронный ресурс]. — URL:http://fcyberrus.com/wp-content/uploads/2018/05/02-10-125-18_1.-Butusov.pdf (дата обращения: 28.11.2019).
4. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Электронный ресурс]. — URL:https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (дата обращения: 04.12.2019).
5. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system / Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013. pp. 869-873.
6. Методы и средства эволюционного и структурного моделирования при обосновании требований к программным системам защиты информации: монография / Змеев А.А. [и др.]; под ред. Е.А. Рогозина. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. — 92 с.
7. Язов Ю.К. Защита информации в информационных системах от несанкционированного доступа / Ю.К. Язов, С.В. Соловьев. — Воронеж: Кварта, 2015. — 440 с.
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 2: Функциональные компоненты безопасности [Электронный ресурс]. — URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (дата обращения 18.11.2019).
9. ГОСТ Р 51583-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении [Электронный ресурс]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (дата обращения: 21.11.2019).
10. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Электронный ресурс]. —

- URL:<https://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (дата обращения 24.11.2019).
11. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации. [Электронный ресурс]. URL:<http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (дата обращения: 18.11.2019).
 12. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. — URL: <http://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (дата обращения: 24.11.2019).
 13. ФСТЭК России. Методический документ. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка), 2008 год [Электронный ресурс]. URL:<https://fstec.ru/component/attachments/download/289> (дата обращения: 24.11.2019).
 14. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200058320> (дата обращения: 27.11.2019).
 15. Руководящий документ Государственной технической комиссии от 30 июня 1992 года. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения. [Электронный ресурс]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (дата обращения: 13.12.2019).
 16. Руководящий документ Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации от 30 марта 1992 года. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Электронный ресурс]. — URL:<http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293809/4293809157.htm> (дата обращения: 24.11.2019).
 17. Радько Н.М. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа / Н.М. Радько, Ю.К. Язов, Н.Н. Корнеева. Воронеж: Воронеж. госуд. технич. ун-т, 2013. 265 с.
 18. Язов Ю.К. Организация защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа: монография / Ю.К. Язов, С.В. Соловьев. Воронеж: Кварта, 2018. 588 с.
 19. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp. 100-112.
 20. Klaic A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaic, M. Golub // Journal of Economics / Business and Management. 2013. Vol. 1. Issue 4. pp. 371-376.
 21. Method to Evaluate Software Protection Based on Attack Modeling / H. Wang [et al.] // 2013 IEEE 10th International Conference on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing Year. 2013. pp. 837-844.
 22. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et al.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp. 576-579.
 23. Применение новых информационных технологий при разработке тренажерных комплексов в интересах Вооруженных сил Российской федерации: монография / Махинов Д.В. [и др.] — Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА» им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2016. 200 с.
 24. Методы и средства оценки защищенности автоматизированных систем органов внутренних дел: монография [Электронный ресурс] / Дровникова И.Г. [и др.]. Воронеж: Воронеж. ин-т МВД России, 2017. 88 с.
 25. Попов А.Д. Модели и алгоритмы оценки эффективности систем защиты информации от несанкционированного доступа с учетом их временных характеристик в автоматизированных системах органов внутренних дел: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / Попов Антон Дмитриевич. Воронеж, 2018. 163 с.
 26. Попов А.Д. Классификация угроз информационной безопасности в автоматизированных информационных системах / Е.А. Rogozin, А.Д. Попов, Д.И. Коробкин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2017. № 7. С. 22-26.

References:

1. Ob utverzhdenii Doktriny informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF ot 05.12.2016 № 646 [Elektronnyy resurs]. — URL:<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002> (data obrashcheniya: 14.11.2019). [On approval of the Doctrine of Information Security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated December 05, 2016 No. 646 [Electronic resource]. - URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002> (accessed: 11/14/2019). (In Russ.)]
2. Ob utverzhdenii Kontseptsii obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti organov vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii do 2020 goda: prikaz MVD Rossii ot 14.03.2012 № 169 [Elektronnyy resurs]. RL:<http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (data obrashcheniya: 27.11.2019) [On approval of the Concept of ensuring information security of the internal affairs bodies of the Russian Federation until 2020: Order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated 14.03.2012 No. 169 [Electronic resource]. RL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (accessed: 11/27/2019) (In Russ.)]
3. Butusov I.V. Methodology of Security Assessment Automated Systems as Objects Critical Information Infrastructure / I.V. Butusov, A.A. Romanov [Electronic resource]. - URL: fcyberus.com/wp-content/uploads/2018/05/02-10-125-18_1.Butusov.pdf (accessed: 11.28.2019).
4. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Electronic resource]. - URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (Date accessed: 12/04/2019).
5. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system / Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013. pp. 869-873 (In Russ.)]
6. Metody i sredstva evolyutsionnogo i strukturnogo modelirovaniya pri obosnovanii trebovaniy k programmnyim sistemam zashchity informatsii: monografiya / Zmeyev A.A. [i dr.]; pod red. Ye.A. Rogozina. — Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2015. 92 s. [Methods and tools of evolutionary and structural modeling when substantiating requirements for software information protection systems: monograph / Zmeyev A.A. [and etc.]; under the editorship of E.A. Rogozin. - Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2015. 92 p. (In Russ.)]

7. YAzov YU.K. Zashchita informatsii v informatsionnykh sistemakh ot nesanktsionirovannogo dostupa / YU.K. YAzov, S.V. Solov'yev. Voronezh: Kvarta, 2015. 440 s [Yazov Yu.K. Information security in information systems from unauthorized access / Yu.K. Yazov, S.V. Soloviev. - Voronezh: Quarta, 2015. 440 p. (In Russ.)]
8. GOSTR ISO/MEK 15408-2-2013. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. CH. 2: Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti [Elektronnyy resurs]. — URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (data obrashcheniya 18.11.2019). [GOSTR ISO / IEC 15408-2-2013. Information technology. Security methods and tools. Criteria for assessing the security of information technology. Part 2: Functional components of security [Electronic resource]. - URL: <http://docs.cntd.com/document/1200105710> (accessed 11/18/2019) (In Russ.)]
9. . GOST R 51583-2014. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Zashchita informatsii. Poryadok sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchennom ispolnenii [Elektronnyy resurs]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (data obrashcheniya: 21.11.2019). [GOST R 51583-2014. National standard of the Russian Federation. Protection of information. The procedure for creating automated systems in a protected version [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858> (accessed date: 11/21/2019) (In Russ.)]
10. . FSTEK RF. Rukovodyashchiy dokument. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii [Elektronnyy resurs]. — URL:<https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (data obrashcheniya 24.11.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information protection requirements [Electronic resource]. - URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-mart> (date of treatment 11.24.2019) (In Russ.)]
11. FSTEK RF. Rukovodyashchiy dokument. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noy tekhniki i avtomatizirovannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii.[Elektronnyy resurs]. URL:<http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (data obrashcheniya: 18.11.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. The concept of protecting computer equipment and automated systems from unauthorized access to information. [Electronic resource]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (accessed: 11/18/2019) (In Russ.)]
12. FSTEK RF. Rukovodyashchiy dokument. Sredstva vychislitel'noy tekhniki. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zashchishchennosti ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyy resurs]. — URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (data obrashcheniya: 24.11.2019). [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information [Electronic resource]. - URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya> (Date of treatment: 11.24.2019) (In Russ.)]
13. FSTEK Rossii. Metodicheskiy dokument. Bazovaya model' ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh (vypiska), 2008 god [Elektronnyy resurs]. URL:<https://fstec.ru/component/attachments/download/289> (data obrashcheniya: 24.11.2019). [FSTEC of Russia. Methodical document. The basic model of personal data security threats during their processing in personal data information systems (extract), 2008 [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/289> (accessed: 11.24.2019) (In Russ.)]
14. GOST R 50922-2006. Zashchita informatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya [Elektronnyy resurs]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200058320> (data obrashcheniya: 27.11.2019). [GOST R 50922-2006. Protection of information. Basic terms and definitions [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200058320> (accessed: 11/27/2019) (In Russ.)]
15. Rukovodyashchiy dokument Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komisii ot 30 iyunya 1992 goda. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Terminy i opredeleniya. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (data obrashcheniya: 13.12.2019). [Guidance document of the State Technical Commission of June 30, 1992. Protection against unauthorized access to information. Terms and Definitions. [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/298> (accessed: 12/13/2019) (In Russ.)]
16. Rukovodyashchiy dokument Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komisii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii ot 30 marta 1992 goda. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii [Elektronnyy resurs]. — URL:<http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293809/4293809157.htm> (data obrashcheniya: 24.11.2019). [The governing document of the State Technical Commission under the President of the Russian Federation of March 30, 1992. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information protection requirements [Electronic resource]. - URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293809/4293809157.htm> (accessed: 11.24.2019) (In Russ.)]
17. Rad'ko N.M. Proniknoveniya v operatsionnuyu sredu komp'yutera: modeli zloumyshlennogo udalennogo dostupa / N.M. Rad'ko, YU.K. YAzov, N.N. Korneyeva. — Voronezh: Voronezh. gosud. tekhnich. un-t, 2013. — 265 s. [Radko N.M. Penetration into the computer's operating environment: malicious remote access models / N.M. Radko, Yu.K. Yazov, N.N. Korneeva. - Voronezh: Voronezh. gos. tech. Univ., 2013. 265 p. (In Russ.)]
18. YAzov YU.K. Organizatsiya zashchity informatsii v informatsionnykh sistemakh ot nesanktsionirovannogo dostupa: monografiya / YU.K. YAzov, S.V. Solov'yev. — Voronezh: Kvarta, 2018. — 588 s. [Yazov Yu.K. Organization of information protection in information systems from unauthorized access: monograph / Yu.K. Yazov, S.V. Soloviev. Voronezh: Quart, 2018. 588 p. (In Russ.)]
19. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. — 2015. — P. 100-112.
20. Klaic A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaic, M. Golub // Journal of Economics / Business and Management. — 2013. — vol. 1. — Issue 4. — pp. 371–376.
21. Method to Evaluate Software Protection Based on Attack Modeling / H. Wang [et al.] // 2013 IEEE 10th International Conference on

- High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing Year. 2013. pp. 837-844.
22. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et al.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp. 576-579. 23.
23. Primeneniye novykh informatsionnykh tekhnologiy pri razrabotke trenazhernykh kompleksov v interesakh Vooruzhen-nykh sil Rossiyskoy Federatsii: monografiya / Makhinov D.V. [i dr.] — Voronezh: VUNTS VVS «VVA» im. professora N.Ye. Zhukovskogo i YU.A. Gagarina, 2016. 200 s. [The use of new information technologies in the development of training complexes in the interests of the Armed forces of the Russian Federation: monograph / Makhinov DV [and others] - Voronezh: VUNC Air Force "VVA" them. professors N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, 2016.200 s. (In Russ.)]
24. Metody i sredstva otsenki zashchishchennosti avtomatizirovannykh sistem organov vnutrennikh del: monografiya [Elektronnyy resurs] / Drovnikova I.G. [i dr.]. Voronezh: Voronezh. in-t MVD Rossii, 2017. 88 s. [Methods and means of assessing the security of automated systems of internal affairs bodies: monograph [Electronic resource] / Drovnikova I.G. [and etc.]. Voronezh: Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2017. 88 p. (In Russ.)]
25. Popov A.D. Modeli i algoritmy otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii ot nesanksionirovannogo dostupa s uchetom ikh vremennykh kharakteristik v avtomatizirovannykh sistemakh organov vnutrennikh del: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.19 / Popov Anton Dmitriyevich. Voronezh, 2018. 163 s. [Popov A.D. Models and algorithms for evaluating the effectiveness of information protection systems against unauthorized access, taking into account their time characteristics in automated systems of internal affairs bodies: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.13.19 / Popov Anton Dmitriyevich. Voronezh, 2018.163 p. (In Russ.)]
26. Popov A.D. Klassifikatsiya ugroz informatsionnoy bezopasnosti v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh / Ye.A. Rogozin, A.D. Popov, D.I. Korobkin // Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. — 2017. № 7. S. 22–26. [Popov A.D. Classification of threats to information security in automated information systems / E.A. Rogozin, A.D. Popov, D.I. Korobkin // Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2017. No. 7. pp. 22–26. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

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

Конобеевских Владимир Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; e-mail.ru: vkonobeevskikh@mail.ru

Овчинникова Елена Сергеевна, адъюнкт кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; e-mail.ru:yelena_ovchinnikova1@mail.ru

Information about authors:

Irina G. Drovnikova, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of the Internal Affairs Bodies; e-mail.ru: idrovnikova@mail.ru

Vladimir V.Konobeevskikh, Cand. Dr. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Automated Information Systems of the Internal Affairs Bodies; e-mail.ru: vkonobeevskikh@mail.ru

Elena S. Ovchinnikova, Adjunct, Department of Automated Information Systems of the Internal Affairs Bodies; e-mail.ru:yelena_ovchinnikova1@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.01.2020.

Принята в печать 19.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.01. 2020.

Accepted for publication 19.02.2020.

Для цитирования: Ю.Г. Жеглова, Б.П. Титаренко. Методика оценки проектных решений ограждений котлованов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 86-92 DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-86-92

For citation: Yu.G. Zheglova, B.P. Titarenko. Method for evaluating excavation shoring design concepts. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 86-92. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-86-92

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-86-92

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ

Ю.Г. Жеглова, Б.П. Титаренко

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет,
1129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Россия

Резюме. Цель. При проведении инженерно-геологических изысканий на концептуальном этапе технико-экономического обоснования необходимо создание автоматизированной системы, позволяющей проектировщику учесть все возможные факторы и выбрать наиболее оптимальное проектное решение ограждения котлована. **Метод.** Исследование основано на методах динамического программирования, базирующихся на принципе оптимальности Беллмана. Применены матрицы логической свертки и метод дихотомии. **Результат.** В результате логической свертки агрегированных критериев параметров среды K12 с параметрами окружающей застройки K34, получается комплексная оценка проектного решения ограждения котлована, которая обеспечивает технические характеристики и безопасность зоны застройки. Однако очень большое влияние на выбор проектного решения ограждающей конструкции влияет стоимость ее возведения. Поэтому показатель комплексной оценки ограждения котлована с учетом экономической эффективности КОЭ получается в результате объединения показателя комплексной оценки ограждения котлована КО с критерием экономической эффективности проектного решения K5. **Вывод.** В работе проведен анализ методов решения задач оптимизации, который показывает, что для задачи оценки проектных решений ограждений котлованов лучше всего применять метод комплексных оценок на основе теории активных систем.

Ключевые слова: методы решения задач оптимизации, проектные решения ограждений котлованов, метод комплексных оценок, матрица логической свертки, теория активных систем

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
METHOD FOR EVALUATING EXCAVATION SHORING DESIGN CONCEPTS

Yu.G. Zheglova, B.P. Titarenko

National Research Moscow State University of Civil Engineering,
26 Yaroslavl Highway, Moscow 129337, Russia

Abstract. Aim. When conducting engineering and geological surveys at the conceptual stage of the feasibility study, it is necessary to create an automated system that allows the designer to take all possible factors into account and choose the most optimal design solution for the shoring of excavations. **Method.** The study is based on dynamic programming methods based on the principle of Bellman optimality. Logical convolution matrices are applied according to the dichotomy method. **Results.** As a result of the logical convolution of the aggregated criteria of the environmental parameters K12 along with the parameters of the surrounding buildings K34, a comprehensive assessment of the design solution for a foundation shoring fence is obtained such as to ensure the technical characteristics and safety of the development zone. However, a considerable influence on the choice of the design solution for the building envelope is exerted by the cost of its construction. Therefore, the indicator of a comprehensive assessment of the shoring fence considering the economic efficiency of the KOE is obtained by combining the indicator of a comprehensive assessment of the foundation shoring fence KO with the criterion of economic efficiency of the design decision K5. **Conclusion.** The analysis of methods for solving optimisation problems demonstrates that the method of complex estimates based on the theory of active systems is optimal for the task of evaluating design solutions for foundation shoring fences.

Keywords: methods for solving optimisation problems, design solutions for foundation shoring fences, complex estimates method, logical convolution matrix, theory of active systems

Введение. В современных условиях в качестве одного из наиболее значимых и активно развивающихся направлений строительства - промышленного, гражданского - выступает освоение подземного пространства. Существенное значение деятельность, связанная с освоением указанного пространства, имеет и в Российской Федерации. Интенсивное строительство сооружений, являющихся заглубленными, подземными, осуществляется в мегаполисах, крупных городах.

Потребность в использовании подземного пространства урбанизированных территорий обуславливается, в первую очередь, ограниченностью свободных площадей, на которых возможно возведение новых объектов, с учетом наличия застройки, сформировавшейся исторически, а также требованиями развития инфраструктуры. В городах в подземном пространстве размещаются объекты транспортной инфраструктуры, инженерные коммуникации, заглубленные части зданий (офисного, жилого назначения), общественно-бытовые комплексы, торговые площади, многоэтажные стоянки и гаражи.

Временные и финансовые ограничения на проектирование и устройство котлованов в большинстве случаев являются весьма строгими. В этой связи основные средства в процессе разработки проектной документации отводятся на возведение наземной части зданий, тогда как финансирование подземной производится по остаточному принципу. Следствием недостаточно детальной проработки подземного строительства в условиях цейтнота и финансовых ограничений является причинение ущерба строениям, находящимся рядом с местом проведения строительных работ. Согласно результатам статистического анализа страховых случаев, в пятидесяти процентах подобных ситуаций причины причинения ущерба связаны с просчетами в процессе проектирования, и в двадцати пяти процентах - с просчетами в процессе выполнения строительных работ.

Постановка задачи. Проектирование котлованов без учета инженерно-геологических

условий и состояния территории застройки может послужить причиной аварийных ситуаций, связанных как непосредственно с ограждениями котлованов, так и с окружающей застройкой. Поэтому при проведении инженерно-геологических изысканий на концептуальном этапе технико-экономического обоснования необходимо создание автоматизированной системы, позволяющей проектировщику учесть все возможные факторы и выбрать наиболее оптимальное проектное решение ограждения котлована.

Методы исследования. Анализ существующих методов решения задач оптимизации. Существует сравнительно широкий арсенал методов, применяемых для того, чтобы решать задачи, связанные с получением оптимальных решений в строительстве.

Задачи дискретного программирования решаются посредством: приближенных методов; комбинаторных методов; метода отсечения, применяемого в задачах целочисленного линейного программирования.

Метод отсечения основывается на предложенном Гомори [1] подходе, предполагающем необходимость сводить нерегулярную задачу к решению последовательности задач, являющихся регулярными. При этом последовательность данных задач является конечной.

Практическая реализация указанного подхода предполагает необходимость:

- противодействия избыточному увеличению размерности задач, обусловленному добавлением ограничений;
- доказывания конечности процедуры отсечений;
- выявления универсального правила, согласно которому следует формировать отсечения.

Следует отметить ряд причин, обусловивших ограниченность использования методов отсечения в процессе решения задач прикладного характера:

- отсутствие возможности использовать данные методы для того, чтобы решать задачи при наличии слабо заполненной матрицы;
- применимость данных методов преимущественно для того, чтобы решать задачи, являющиеся целочисленными;
- существенные вычислительные сложности при определении наиболее сильного отсечения.

Комбинаторные методы основываются на следующих положениях - множество допустимых решений конечно, полный перебор следует заменять на сокращенный.

Данные методы представлены:

- аппроксимационно-комбинаторными методами;
- методом динамического программирования;
- методом ветвей и границ.

Применительно к решению таких задач математического программирования, как аддитивные, используется метод динамического программирования, базирующийся на принципе оптимальности Беллмана.

Указанный принцип подразумевает следующее: стратегия, являющаяся оптимальной, в условиях любого первоначального состояния и любого первоначального решения предусматривает необходимость оптимальности последующих решений в отношении состояния, которое получено по результатам предыдущего решения.

Полный перебор вариантов обеспечивается посредством метода ветвей и границ. Особенность данного метода в следующем - исключение из рассмотрения определенных вариантов до вычисления для соответствующих вариантов критерия оценки проекта осуществляется за счет определения границ критерия оценки.

Вследствие этого возможности применения указанного метода для выявления оптимальных решений являются весьма ограниченными. Указанный метод достаточно детально отражен в [2, 9].

Формирование моделей программирования (целочисленного, динамического) и их анализ предусматривают методы математического программирования. Ограничение данных методов состоит в значительной размерности задач, и, соответственно, затруднительности получения точного решения в течение приемлемого времени. Для того, чтобы выявлять приближенное решение, в [3] предложено не использовать условие целочисленности переменных с дальнейшим округлением решения.

Для того, чтобы находить приближенное решение в задачах дискретной оптимизации применяется метод Удзавы [5, 6]. В качестве одного из ключевых ограничений указанного метода выступает значительный (и увеличивающийся по мере увеличения размерности задачи) объем вычислений на каждой из итераций. Данный метод не во всех случаях обеспечивает возможность получить за приемлемое время решение, являющееся оптимальным (монотонная сходимость отсутствует).

Для того, чтобы автоматизировать выбор типа ограничений котлованов, необходимо описать территорию застройки, выявить гидрогеологические и геологические факторы, являющиеся существенными, произвести их оценку, сформировать механизмы оценки проектных решений и эффективности соответствующих решений в экономическом отношении.

Присущие объекту особенности обуславливают затруднения при решении подобных задач. К числу ключевых затруднений относятся следующие:

1. Для проектируемого здания с учетом конкретных инженерно-геологических условий существует значительное число проектных решений ограждений котлована, которые удовлетворяют расчетам по предельным состояниям.

2. Показатели, определяющие уровень принятого решения, могут иметь не только количественное, но и качественное выражение (конструктивные, функциональные, архитектурные и иные показатели).

Оценка возможности использования конкретной ограждающей конструкции может производиться посредством рейтинговой либо интегральной оценки.

Обсуждение результатов. Модель построения комплексных оценок ограждений котлованов на основе матриц логической свертки.

Существует множество сфер хозяйственной деятельности, в которых имеется необходимость решения задач, связанных с комплексным оцениванием, переходом к агрегированной характеристике сложных систем. Подобные задачи возникают в случаях, когда требуется оценивать экологическую безопасность [7, 11], приоритетные научные и технические направления (формировать иерархию приоритетов) [14], оценивать функционирование трудовых коллективов (определять лучший) [10].

Методология формирования комплексной оценки разработана в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Она интегрирует различные подходы к комплексному оцениванию, представленные в значительном числе сфер хозяйственной деятельности [4, 8, 12, 13].

Данный подход основывается на следующей идее - применительно к оцениваемому объекту следует определить комплекс параметров. Используя матрицы свертки, параметры следует попарно сопоставлять друг с другом. Далее, также посредством матриц свертки, для следующего уровня необходимо осуществлять попарное сравнение полученных характеристик. Следует повторять указанную процедуру до момента, когда останется единственная характеристика. Полученная характеристика будет являться комплексной оценкой объекта.

Решение задачи выбора проектного решения ограждения котлована предполагает реализацию противоречивых целей в рамках существующих ресурсных ограничений.

Для определения комплексной оценки ограждения котлована построим бинарное дерево свертки (рис. 1).

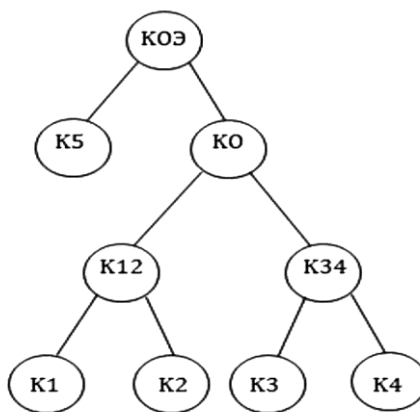


Рис. 1. Бинарная структура для пяти групп критериев
Fig. 1. Binary structure for five groups of criteria

Для оценки влияния отдельных параметров и характеристик, влияющих на выбор проектного решения ограждения котлована, определяют частные критерии, которые объединяют в укрупненные группы:

- К1 – геологические условия;
- К2 – гидрогеологические условия;
- К3 – расстояние от существующих зданий до котлована;
- К4 – категория существующих зданий по техническому состоянию;
- К5 – экономическая эффективность проектного решения.

Тип ограждающей конструкции следует рассматривать в качестве системы, сложной в техническом отношении. Необходимо выделять комплекс факторов (критериев), определяющих состояние указанной системы.

В этом случае систему можно описать исходя из определенного комплекса критериев в виде вектора $K=(K_1, \dots, K_i, \dots, K_n)$, где K_i является значением i -ого критерия.

Необходимо сформировать комплексный критерий, на основе которого будет выбираться проектное решение ограждения котлована $F(K)$.

Применяется метод дихотомии - каждая из вершин дерева, в т.ч. итоговая, может быть дезагрегирована с выделением двух подэлементов. Логические матрицы свертки обеспечивают возможность агрегировать каждую пару элементов с получением элемента верхнего (следующего) уровня.

Опишем математическую модель для комплексной оценки проектных решений ограждений котлованов.

Из рис.1 следует, что критерий «геологические условия» К1 и критерий «гидрогеологические условия» К2 объединяются в один агрегированный критерий параметры среды К12. То есть формируется матрица логической свертки в результате чего получается итоговая оценка параметров среды.

Аналогичным образом объединяются критерий «расстояние от существующих зданий до котлована» К3 с критерием категории «существующих зданий по техническому состоянию» К4 в один агрегированный критерий «параметры окружающей застройки» К34 и на основании их логической свертки формируется оценка параметров окружающей застройки.

В результате логической свертки агрегированных критериев параметров среды К12 с параметрами окружающей застройки К34, получается комплексная оценка проектного решения ограждения котлована, которая обеспечивает технические характеристики и безопасность зоны застройки.

Однако очень большое влияние на выбор проектного решения ограждающей конструкции влияет стоимость ее возведения.

Поэтому показатель комплексной оценки ограждения котлована с учетом экономиче-

ской эффективности КОЭ получается в результате объединения показателя комплексной оценки ограждения котлована КО с критерием экономической эффективности проектного решения К5. Подробно данная методика применительно к управлению проектами в дорожном строительстве описана в [2].

Вывод. Проектировщики, строители в современных условиях имеют возможность за счет новейших технологий обустраивать ограждающие конструкции котлованов с использованием многообразных способов, каждому из которых присущи собственные достоинства и ограничения.

Факторы, обуславливающие эффективность применения конкретного типа ограждения, следующие - наличие окружающих коммуникаций, сооружений, зданий, размеры и глубина котлована, гидрогеологические, грунтовые условия.

Поэтому реальная задача выбора проектного решения ограждения котлована является сложной, так как помимо экономичности применяемое проектное решение должно обеспечивать безопасность зоны застройки, надежность и долговечность проектируемого объекта.

Для этого предлагается разработать методику оценки проектных решений ограждений котлованов при проведении инженерно-геологических изысканий.

Библиографический список:

1. Авдеев Ю.А. Оперативное планирование в целевых программах // Одесса: Маяк. 1990. – 132 с.
2. Ануфриев И.К., Бурков В.Н., Вилкова Н.И., Рапакская С.Т. Модели и механизмы внутрифирменного управления // М.: ИПУ РАН. 1994. – 72 с.
3. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М., Семенов П.И. Минимизация упущенной выгоды в задачах управления проектами // М.: научное издание / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2001
4. Баркалов С.А. Модель комплексной оценки уровня безопасности / С.А. Баркалов, А.М. Котенко, А.И. Половинкина, А.В. Щепкин // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2005. - №7. – Т.1. – С. 28-34
5. Баскаков А.С., Глагольев А.В., Матвеев И.К. Моделирование конкурсных механизмов в корпоративных структурах управления // Современные сложные системы управления: Сб. науч. тр. междунар. конф. Т. 1/Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж. - 2005. – С. 104-109
6. Бир С. Мозг фирмы // М.: Радио и связь. 1993. – 416 с.
7. Бурков В.Н. Модели и механизмы управления безопасностью / В.Н. Бурков, Е.В. Грацианский, С.И. Дзюбо, А.В. Щепкин. – М.: СИНТЕГ - ГЕО, 2001. – 160 с.
8. Бурков В.Н. Задачи оптимального управления промышленной безопасностью / В.Н. Бурков, А.Ф. Грищенко, О.С. Кулик. – М.: ИПУ РАН. 2000. – 70 с.
9. Бурков В.Н., Еналеев А.К., Новиков Д.А. Механизмы стимулирования в вероятностных моделях социально-экономических систем // Автоматика и Телемеханика. - 1993. - №11. – С. 3-30
10. Бурков В.Н. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, В.В. Цыганков, А.М. Черкашин. – М. Наука. 1984. – 272 с.
11. Бурков В.Н. Экологическая безопасность / В.Н. Бурков, А.В. Щепкин. – М.: ИПУ РАН. 2003. – 92 с.
12. Кондратьев В.Д. Комплексная оценка уровня риска опасного объекта / В.Д. Кондратьев, А.В. Толстых, Б.К. Уандыков, А.В. Щепкин // Системы управления и информационные технологии. – 2004. - №3(15). – С. 53-57
13. Котенко А.М. Процедура построения комплексных оценок достижимости целей / А.М. Котенко, А.И. Половинкина // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж: ВГТУ. 2002. – С. 41-47
14. Кузьмицкий А.А. Организационные механизмы управления развитием приоритетных направлений науки и техники / А.А. Кузьмицкий, Д.А. Новиков. – М.: ИПУ РАН. 1993. – 67 с.

References:

1. Avdeyev YU.A. Operativnoye planirovaniye v tselevykh programmakh//Odessa: Mayak.1990. 132 s. [AvdeevYu.A. Operational planning in targeted programs // Odessa: Lighthouse. 1990. 132 p. (In Russ.)]
2. Anufriyev I.K., Burkov V.N., Vilkova N.I., Rapatskaya S.T. Modeli i mekhanizmy vnutfirmen-nogo upravleniya // M.: IPU RAN. 1994. – 72 s. [Anufriyev I.K., Burkov V.N., Vilkova N.I., Rapatskaya S.T. Models and mechanisms of internal control // M.: IPU RAS. 1994. 72 p. (In Russ.)]
3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gilyazov N.M., Semenov P.I. Minimizatsiya upushchennoy vygody v za-dachakh upravleniya proyektami // M.: nauchnoye izdaniye / Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2001 [Barkalov S. A., Burkov V. N., Gilyazov N. M., Semenov P. I. Minimization of lost profits in the tasks of project management // M.: Scientific publication / Institute of Management Problems. V.A. Trapeznikov RAS. 2001. (In Russ.)]
4. Barkalov S.A. Model' kompleksnoy otsenki urovnya bezopasnosti / S.A. Barkalov, A.M. Kotenko, A.I. Polovinkina, A.V. Shchepkin // Vestnik Voronezh.gos. tekhn. un-ta. – 2005. - №7. – Т.1. – С. 28-34 [Barkalov S.A. Model for a comprehensive assessment of the level of security / S.A. Barkalov, A.M. Kotenko, A.I. Polovinkina, A.V. Schepkin // Bul-

letin of Voronezh. State Tech. Un-that. 2005. No. 7. Vol.1. pp. 28-34(In Russ.)]

5. Baskakov A.S., Glagol'yev A.V., Matveyev I.K. Modelirovaniye konkursnykh mekhanizmov v korpora-tivnykh strukturakh upravleniya // Sovremennyye slozhnyye sistemy upravleniya: Sb. nauch. tr. mezhdunar. konf. T. 1/Voronezh. gos. arkh.-stroit. un-t. – Voronezh. - 2005. – S. 104-109 [Baskakov A.S., Glagoliev A.V., Matveev I.K. Modeling of competitive mechanisms in corporate governance structures // Modern complex management systems: Sat. scientific tr Int. conf. T. 1 / Voronezh. State arch. Un-t - Voronezh. 2005. pp. 104-109 (In Russ.)]

6. Bir S. Mozg firmy // M.: Radio i svyaz'. 1993. – 416 s. [Bir S. The brain of the company // M. : Radio and communications. 1993. 416 p. (In Russ.)]

7. Burkov V.N. Modeli i mekhanizmy upravleniya bezopasnost'yu / V.N. Burkov, Ye.V. Gratsianskiy, S.I. Dzyubko, A.V. Shchepkin. – M.: SINTEG - GEO, 2001. – 160 s. [Burkov V.N. Models and mechanisms of security management / V.N. Burkov, E.V. Graziansky, S.I. Dzyubko, A.V. Schepkin. M. : SINTEG - GEO, 2001. 160 p. (In Russ.)]

8. Burkov V.N. Zadachi optimal'nogo upravleniya promyshlennoy bezopasnost'yu / V.N. Burkov, A.F. Grishchenko, O.S. Kulik. – M.: IPU RAN. 2000. – 70 s. [Burkov V.N. Tasks of optimal management of industrial safety / V.N. Burkov, A.F. Grishchenko, O.S. Sandpiper. - M.: IPU RAS. 2000. 70 p. (In Russ.)]

9. Burkov V.N., Yenaleyev A.K., Novikov D.A. Mekhanizmy stimulirovaniya v veroyatnostnykh modelyakh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem // Avtomatika i Telemekhanika. - 1993. - №11. – S. 3-30 [Burkov V.N., Enaleev A.K., Novikov D.A. Incentive mechanisms in probabilistic models of socio-economic systems // Automation and Telemechanics. 1993. No. 11. pp. 3-30]

10. Burkov V.N. Teoriya aktivnykh sistem i sovershenstvovaniye khozyaystvennogo mekhanizma / V.N. Burkov, V.V. Kondrat'yev, V.V. Tsygankov, A.M. Cherkashin. – M. Nauka. 1984. – 272 s. [Burkov V.N. The theory of active systems and the improvement of the economic mechanism / V.N. Burkov, V.V. Kondratiev, V.V. Tsygankov, A.M. Cherkashin. M. Science. 1984. 272 p. (In Russ.)]

11. Burkov V.N. Ekologicheskaya bezopasnost' / V.N. Burkov, A.V. Shchepkin. – M.: IPU RAN. 2003. – 92 s. [Burkov V.N. Ecological safety / V.N. Burkov, A.V. Schepkin. M.: IPU RAS. 2003. 92 p. (In Russ.)]

12. Kondrat'yev V.D. Kompleksnaya otsenka urovnya riska opasnogo ob'yekta / V.D. Kondrat'yev, A.V. Tolstykh, B.K. Uandykov, A.V. Shchepkin // Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii. – 2004. - №3(15). – S. 53-57 [Kondratiev V.D. Comprehensive assessment of the risk level of a hazardous facility / V.D. Kondratiev, A.V. Tolstoy, B.K. Uandykov, A.V. Shchepkin // Control systems and information technology. 2004. No. 3 (15). - pp. 53-57 (In Russ.)]

13. Kotenko A.M. Protsedura postroyeniya kompleksnykh otsenok dostizhimosti tseley / A.M. Kotenko, A.I. Polovinkina // Vestnik Voronezh.gos. tekhn. un-ta. – Voronezh: VGTU. 2002. – S. 41-47 [Kotenko A.M. The procedure for constructing comprehensive assessments of the attainability of goals / A.M. Kotenko, A.I. Polovinkina // Bulletin of Voronezh. State Tech. Un-that. Voronezh: VSTU. 2002. pp. 41-47 (In Russ.)]

14. Kuz'mitskiy A.A. Organizatsionnyye mekhanizmy upravleniya razvitiyem prioritetnykh napravleniy nauki i tekhniki / A.A. Kuz'mitskiy, D.A. Novikov. – M.: IPU RAN. 1993. – 67 s. [Kuzmitsky A.A. Organizational mechanisms for managing the development of priority areas of science and technology / A.A. Kuzmitsky, D.A. Novikov. M.: IPU RAS. 1993. 67 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Жеглова Юлия Германовна, преподаватель кафедры прикладной математики; e-mail: uliagermanovna@yandex.ru

Титаренко Борис Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики; e-mail: boristitarenko@mail.ru

Information about the authors:

Julia G. Zheglova, Lecturer, Department of Applied Mathematics; e-mail: uliagermanovna@yandex.ru

Boris P. Titarenko, Dr. Sci. (Technical), Prof., Prof., Department of Applied Mathematics; e-mail: boristitarenko@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 25.02.2020.

Принята в печать 10.03.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.02.2020.

Accepted for publication 10.03.2020.

Для цитирования: Д.Ф. Мамедов, К.С. Абдуллаев, З.М. Мурадлы, Е.М. Гасанова, С.Б. Алиева. Разработка фрейм модели для выбора и проектирования гибкой производственной системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1):93-101. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-93-101.

For citation: J.F. Mamedov, K.S. Abdullaev, Z.M. Muradli, E.M. Hasanova, S.B. Alieva. Development of frame models for the selection and design of a flexible production system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 93-101. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-93-101

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-93-101

РАЗРАБОТКА ФРЕЙМ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫБОРА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Д.Ф. Мамедов, К.С. Абдуллаев, З.М. Мурадлы, Е.М. Гасанова, С.Б. Алиева.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка алгоритмического обеспечения на основе фрейм модели для информационного поиска и выбора гибкой производственной системы (ГПС), ее технических единиц и системы управления в соответствии со схемой технологического процесса. **Метод.** Для создания алгоритма поиска и выбора применяется интеллектуальный метод на основе фрейм моделирования. Для программирования фрейм модели используется программный язык представления знаний FRL. **Результат.** В соответствии с темой материала для обеспечения управления и эксплуатации архивами проектных работ, был проведен сравнительный анализ алгоритмов информационного обеспечения, позволяющие выбирать гибкие производственные системы (ГПС), их стандартные элементы, производственные модули, компоновочные схемы и набор сведений об их параметрах или местоположению документов. была поставлена задача и реализована модель создания алгоритмического обеспечения на основе фрейм моделирования для эффективного поиска и выбора ГПС, ее производственных модулей и активных элементов в соответствии с областью применения производства и назначениями каждой технической единицы. **Вывод.** Для обеспечения надежного функционирования АСУ ГПС в целом предложен алгоритм поиска датчиков на основе фреймовых слотов и значений достижимой погрешности позиционирования промышленных роботов и технологического оборудования. Предложен алгоритм поиска датчиков и управления активными элементами производственного модуля гибкой производственной системы.

Ключевые слова: фрейм моделирование, гибкая производственная система, алгоритм поиска и выбора, слот фрейма, граф-схема

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

DEVELOPMENT OF FRAME MODELS FOR THE SELECTION AND DESIGN OF A FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEM

J.F. Mamedov, K.S. Abdullaev, Z.M. Muradli, E.M. Hasanova, S.B. Alieva
Sumgait State University,
43 quarter, Sumgait AZ5008, Azerbaijan

Abstract. Aim. The aim of the study is to develop algorithmic support based on a frame model for information retrieval and selection of a flexible manufacturing system (FMS), as well as its technical units and control system in accordance with a process flow diagram. **Method.** An intelligent method based on a frame model is used in order to create a search and selection algorithm. The FRL programming language was used for programming the frame model. **Results.** In accordance with the published guidelines for ensuring the management and operation of archival design work, a comparative analysis of information support algorithms was carried out in order to select flexible production systems (FPS) comprising standard elements, production modules, layout schemes and a set of information about their parameters or the location of documents. The model for creating algorithmic support was based on the modelling frame for the effective search and selection of the FMS, while its production modules and active elements were implemented in accordance with the scope of production and the purposes of each technical unit. **Conclusion.** To ensure the reliable functioning of the FMS automatic control system, an algorithm is proposed for searching sensors based on frame slots and achievable positioning errors of industrial robots and technological equipment. An algorithm for locating sensors and controlling the active elements of an FMS production module is presented.

Keywords: modeling frame, flexible production system, search and selection algorithm, frame slot, graph diagram

Введение. Экономический рост развивающихся стран во многом зависит от внедрения в свою индустрию производств с наиболее прогрессивными технологиями по автоматизации и управлению. Одними из таких инновационных систем является гибкие производственные системы (ГПС), которые обеспечивают качественный выпуск продукции различного назначения с использованием гибких автоматизированных технологий управления. Применение достаточно большого количества предприятий в различных областях промышленности, взаимосвязанных корпораций и технологических парков из-за отсутствия их глобального информационного обеспечения в определенной мере усложняет процесс поиска и выбора подобных проектов ГПС, особенно на начальных этапах их разработки.

Сравнительный анализ существующих методов поиска документов по проектам ГПС [1; 2, стр. 156-195; 3] показал, что из-за многофункциональности и сложности подобных технических систем, возникают трудности с правильным выбором ее технологического оборудования, промышленных роботов, манипуляторов, автоматизированной системы управления (АСУ) и их компоновки.

В этих работах процесс поиска и выбора активных элементов ГПС осуществляется пользователем интуитивно за счет накопленного опыта в этой области. Для информационного поиска применяются отдельные алгоритмы с использованием продукционных моделей [4], которые недостаточно обеспечивают точный поиск и выбор технических единиц для разных областей применения из-за невозможности детального описания объекта проектирования и использования большого количества продукции и, соответственно, использования системной памяти. В этой связи, рассмотрение вопроса по созданию алгоритма автоматизированного поиска и выбора активных элементов ГПС с помощью фрейм модели, обеспечивающей поэтапное структурное моделирование в зависимости от области применения, является научно-актуальной проблемой.

Постановка задачи. Целью данной статьи является разработка алгоритмического обеспечения на основе фрейм модели для информационного поиска и выбора ГПС, ее технических единиц и системы управления в соответствии со схемой технологического процесса. Для реализации цели были определены нижеследующие вопросы:

1. Разработка алгоритма фрейм моделирования для поиска и логического выбора подобного ГПС для дальнейшего ее проектирования.
2. Создание схемы поиска ГПС, ее оборудования, компоновки и АСУ на основе граф - схемы фрейм модели.
3. Построение компоновочной схемы ГПС в соответствии с результатами алгоритма информационного поиска.
4. Создание алгоритма для достоверного поиска датчиков АСУ ГПС на основе фрейм модели.
5. Создание алгоритма управления на примере производственного модуля ГПС с использованием логических условий-переходов.

Методы исследования. Для создания алгоритма поиска и выбора применяется интеллектуальный метод на основе фрейм моделирования.

Фрейм-модель представляется в виде следующей конструкции [4, стр. 340-365]:

$$f = [< r_1, v_1 >, < r_2, v_2 >, \dots, < r_n, v_n >], \quad (1)$$

где f — имя фрейма; r_i — имя слота; v_i — значение слота.

В качестве значений слотов выступают имена других фреймов, что обеспечивает связь между фреймами. За ключевое слово поиска выбирается имя фрейма (протофрейм), который записывается в виде:

$$f_{kc} \rightarrow \text{«Гибкая производственная система»}. \quad (2)$$

Чтобы осуществить достоверный поиск и точный выбор объекта проектирования (ГПС) необходимо ввести соответственно имя и значение слота $< r_j, v_j >$ в виде:

$$\begin{aligned} f_{kc} = [< r_1 \rightarrow \text{Область применения}, v_{1j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \\ < r_2 \rightarrow \text{Производство}, v_{2i} \in \{v_{21}, v_{22}, v_{23}\} > \\ < r_3 \rightarrow \text{Оборудование}, v_{3k} \in \{v_{31}, v_{32}, \dots, v_{37}\} > \\ < r_4 \rightarrow \text{Компоновка ГПС}, v_{4i} \in \{v_{41}, v_{42}, v_{43}\} > \\ < r_5 \rightarrow \text{Система управления ГПС}, v_{5i} \in \{v_{51}, v_{52}, v_{53}\} >], \end{aligned} \quad (3)$$

где v_{11} - автомобилестроение; v_{12} - машиностроение; v_{13} - приборостроение; v_{14} — металлургия; v_{21} - легковой автомобиль; v_{22} - грузовой автомобиль; v_{23} — электромобиль; v_{31} — токарный станок (ТС); v_{32} - фрезеровочный станок (ФС); v_{33} — сверлильный станок (СС); v_{34} - шлифовальный станок (ШС); v_{35} - гибочный станок (ГС); v_{36} — промышленный робот (ПР) сварочный; v_{37} - промышленный робот погрузочный; v_{41} - последовательная компоновка; v_{42} - круглая компоновка; v_{43} — параллельная компоновка; v_{51} - АСУ на базе SCADA TRACE MODE; v_{52} - АСУ на базе микропроцессорной системы управления (PLC Network); v_{53} — АСУ на базе PLC Simatic.

На основе предлагаемого протофрейма, из установленных значений слотов r_i составляется схема поиска ГПС и ее модулей для выпуска легковых автомобилей различных моделей с дальнейшим выбором компоновки гибких производственных модулей, технологических оборудования, промышленных роботов и АСУ (рис. 1).

Как видно из рис. 1, поиск и выбор ГПС, ее системы управления осуществляется поэтапно, начиная вводом ключевого слова как в выражении (2).

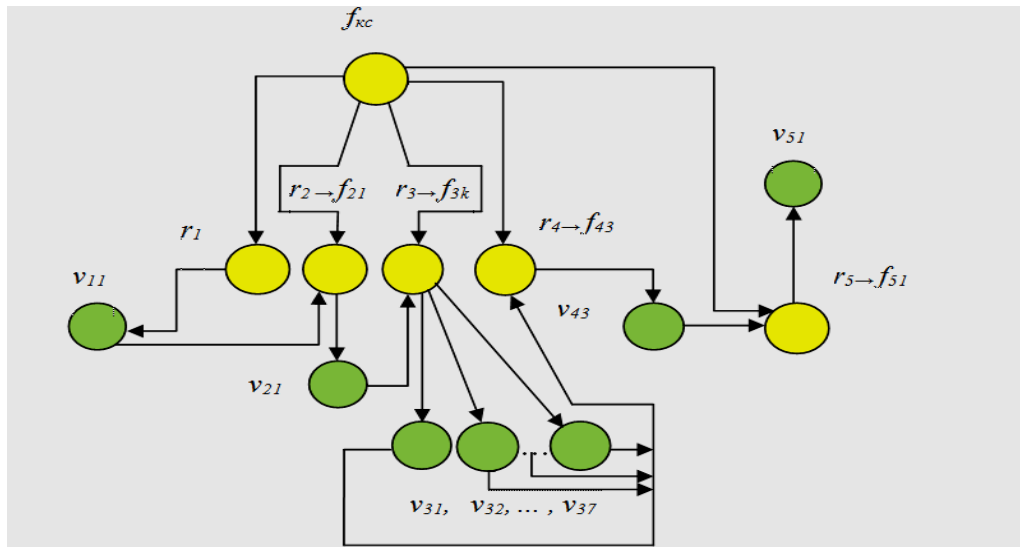


Рис. 1. Схема поиска и выбора ГПС, ее оборудования и АСУ
Fig. 1. The scheme of search and selection of GPS, its equipment and ACS

Далее из выражения (3) выбираются наименования слотов r_i , которые преобразуются в имена фреймов (f_{21} , f_{3k} , f_{43} , f_{51}). На основе фреймов f_{21} , f_{3k} , f_{43} , f_{51} реализуются поиск и выбор ГПС, ее системы управления по производству легковых автомобилей, со всем оборудованием, с параллельной их компоновкой и автоматизированной системой управления на базе SCADA TRACE MODE.

Фрейм модель с выводами поэтапного выбора области применения производства, вида выпускаемой продукции, типов технологического оборудования, промышленных роботов, компоновочной схемы ГПС и автоматизированной системы управления записывается в виде логических выражений следующим образом:

Если $\langle r_1, v_{11} \rangle$ тогда $\langle r_2, v_{21} \rangle$, где $r_2 \rightarrow f_{21}$;
 Если $\langle r_2, v_{21} \rangle$ тогда $\langle r_3, v_{3i} \rangle$, где $r_3 \rightarrow f_{3k}$;
 $\exists v_{3k} \in \{v_{31}, v_{32}, \dots, v_{37}\}$,
 Если $\langle r_3, v_{3k} \rangle$ тогда $\langle r_4, v_{43} \rangle$, где $r_4 \rightarrow f_{43}$;
 Если $\langle r_4, v_{43} \rangle$ тогда $\langle r_5, v_{51} \rangle$, где $r_5 \rightarrow f_{51}$.

На основе выше представленного алгоритма формируется ГПМ с параллельной компоновочной схемой, стандартными оборудованиями и автоматизированной системой управления на базе SCADA TRACE MODE (рис. 2).

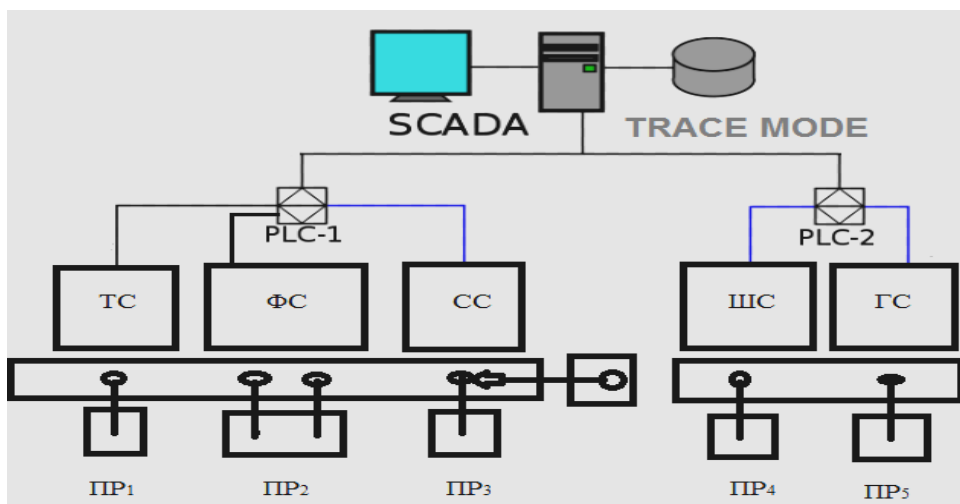


Рис. 2. Компоновочная схема ГПС с АСУ на базе SCADA TRACE MODE
Fig. 2. The layout of the GPS with ACS based on SCADA TRACE MODE

После определения значений всех слотов и подфреймов осуществляется конструкторское построение компоновочной схемы ГПС с размещением промышленных роботов и технологического оборудования [5], а также автоматизированной системы управления на базе SCADA TRACE MODE [6].

Вопрос выбора технического решения автоматизированного управления ГПС на базе TRACE MODE реализуются в четыре этапа: выбор аппаратных средств периферийного уровня системы и сетевого оборудования; организация структуры информационных потоков в системе; определение регламента информационного трафика, настройка серверов TRACE MODE.

Структура информационных потоков в АСУ ГПС должна обеспечивать необходимый уровень надежности и производительности.

Процесс выбора элементов системы управления и контроля ГПС формируется на основе предложенной компоновочной схемы производственных участков ГПС и их схемы автоматизации. На основе требований к точности позиционирования манипуляционного объекта на рабочих зонах производственной линии ГПС определяется суммарная погрешность позиционирования. При этом погрешность установки объекта в приспособление оборудования складывается из двух составляющих: погрешности несовпадения центра формы детали с определенным центром в оборудовании и погрешности ориентации по углу относительно некоторой оси.

Создание алгоритма выбора датчиков и алгоритма управления производственного модуля ГПС. Характеристики объектов манипулирования в технологическом маршруте ГПС оказывает влияние на выбор типа и структуры систем очувствления, конструкцию исполнительного устройства и функции промышленных роботов в производственном модуле. Характеристики объекта манипулирования определяют тип рабочей зоны активных элементов ГПС.

Исходя из оценки достижимой погрешности позиционирования, выбираются датчики для АСУ ГПС [7]:

$$\frac{S_i k_{\Delta}}{D_n} \leq \Delta_i \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где S_i – перемещение степени подвижности; $k_{\Delta} = 1,5 \div 3$ – коэффициент, учитывающий качество измерительных цепей системы управления; Δ_i – погрешность позиционирования робота, с тремя степенями подвижности, функционирующего в гибком производственном модуле.

Значение погрешности позиционирования выбирается из справочника; D_n – число дискрет индуктивного датчика измерения и углового перемещения промышленного робота.

В соответствии с выражениями (1) и (4) определяются значения слотов фреймовой модели для поиска и выбора элементов системы управления ГПС в нижеследующем виде:

$F_{АСУ ГПС} = [< r_6 \rightarrow \text{объект применения, } v_{6j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \{v_{6j}, v_{6j}, \dots, v_{611}\} >,]$
где $j=11$ - количество технологического оборудования и промышленных роботов в ГПС.

$< r_7 \rightarrow S_i, v_{7j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \{v_{7j}, v_{7j}, \dots, v_{711}\} >$, где учитывается степень подвижности для каждого активного элемента ГПС.

$< r_8 \rightarrow k_{\Delta}, v_{8j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \{v_{8j}, v_{8j}, \dots, v_{811}\} >$, где коэффициент качества измерительных цепей системы управления учитывается для всех активных элементов ГПС.

$< r_9 \rightarrow \Delta_i, v_{9j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \{v_{9j}, v_{9j}, \dots, v_{96}\} >$, где погрешность позиционирования учитывается для промышленных роботов ГПС. $j=6$ - количество роботов в ГПС.

$< r_{10} \rightarrow D_n, v_{10j} \in \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{14}\} >, \{v_{10j}, v_{10j}, \dots, v_{106}\} >$, где число дискрет индуктивного датчика измерения и углового перемещения учитывается для каждого промышленного робота ГПС.

На основе алгоритма поиска типов датчиков ГПС выбирается соответствующий датчик для того или иного оборудования и промышленного робота, обеспечивающий надежное функционирование АСУ ГПС в целом.

База данных датчиков системы управления для активных элементов ГПС представляется в виде фактов рекурсивной процедуры, где основу составляют активные элементы ГПС, их технологически - функциональные характеристики и параметры (табл.1) [8, 9]:

Таблица 1. Технологически - функциональные характеристики и параметры активных элементов ГПС

Table 1. Technologically - functional characteristics and parameters of active GPS elements

%	Место установки Installation location	Символ Symbol	Фиксирование Fixation	Параметр Parameter
датчик sensor	захват <i>PP capture</i>	$D_{з_i}$	наличие заготовки stock availability	-
датчик sensor	захват <i>PP capture</i>	$\neg D_{з_i}$	отсутствие заготовки lack of workpiece	-
датчик sensor	рука <i>PP arm</i>	$D_{нв_i}$	перемещение вперед moving forward	Δl
датчик sensor	рука <i>PP arm</i>	$\neg D_{нн_i}$	перемещение назад moving back	Δl
датчик sensor	рука <i>PP arm</i>	$D_{нов_i}$	перемещение вверх moving up	Δh
датчик sensor	рука <i>PP arm</i>	$\neg D_{пнн_i}$	перемещения вниз moving down	Δh
датчик sensor	рука <i>PP arm</i>	D_{φ_i}	вращательное перемещение rotational movement	$\Delta \varphi$
датчик sensor	основание TO_i base	$D_{мо_i}$	наличие заготовки stock availability	-
датчик sensor	основание TO_i base	$\neg D_{мо_i}$	отсутствие заготовки lack of workpiece	-
датчик sensor	основание TO_i base	$D_{мо_2}$	начало выполнения операции start of operation	-
датчик sensor	основание TO_i base	$\neg D_{мо_3}$	конец выполнения операции end of operation	-

где Δl – перемещение руки PP_i вперед или назад вдоль оси X или Y трехмерной координатной оси; Δh -перемещение руки PP_i вверх или вниз вдоль оси Z трехмерной координатной оси; $\Delta \varphi$ - угловое перемещение руки PP_i вокруг оси Z трехмерной координатной оси.

Для выбора значений параметров из базы данных осуществляется запрос по обозначенным символам датчиков в следующей форме [10]:

| ? – датчик ($D_{нв}$, Параметр). Параметр = Δl .

Для определения других параметров из базы данных аналогичным образом осуществляются подобные запросы.

Следующим этапом создания автоматизированной системы управления ГПС является разработка алгоритма управления, характеризующая логическими условиями-переходами в зависимости от производственного цикла.

Для разработки алгоритма управления поэтапно анализируется схема автоматизации ГПС; задаются исходные параметры, характеризующие перемещения кинематических звеньев PP_i и оборудования, номера заготовки, имена сенсорных и исполнительных элементов в соответствии с функциональными назначениями; на основе рекурсивной процедуры [11] составляется модель управления производственного модуля [12].

Обсуждение результатов. Система управления ГПС функционирует следующим образом: осуществляется прием информации управляющей микропроцессорной системой о фиксировании наличия заготовки на исходной позиции автоматизированной транспортной системы (АТС_i); срабатывают сенсорные и исполнительных органы ПМ_i; начинается выполнение технологических функций обслуживающего промышленного робота ПР_i, который обеспечивает безопасное перемещение по установленным обобщенным координатам, загрузку (усилие зажима заготовки не должно превышать установленной нормы для предотвращения брака на ее поверхности) и разгрузку заготовки на оборудования; далее информация о завершении технологических операций передается в управляющую систему подсистемы производства (ГПС), которая в свою очередь после обработки текущей информации от устройства по определению дефектов изделий, передает команду исполнительному органу промышленного робота на установку готового изделия либо на АТС для готовой продукции, либо на стол для бракованных изделий [13].

При этом координаты активных элементов задаются по ранее определенным параметрам из табл. 1.

Как исходные данные для разработки алгоритма управления задаются типы датчиков, исполнительных механизмов и заготовок. Обобщенная форма алгоритма управления ГПС представляется в виде продукций с истинными выражениями и логическим следствием следующим образом [14]:

$$\begin{array}{l}
 \% \text{ имена переменных:} \\
 \% \text{ } AZ_i - \text{заготовка} \\
 \% \text{ } D_i - \text{датчики с функциональными назначениями} \\
 \% \text{ } ИМ_i - \text{исполнительные механизмы с функциональными назначениями} \\
 \\
 \% \quad \text{истинное выражение (} A_i^j \text{)} \quad \text{логическое следствие (} B^j \text{)} \quad Z_i \\
 \text{если_тогда (} D_{1i}^1 \wedge D_{2i}^1 \wedge \dots \wedge D_{ni}^1 \text{)} \Rightarrow ИМ_{1i}^1 \wedge ИМ_{2i}^1 \wedge \dots \wedge ИМ_{ni}^1 \quad 3_i) \\
 \text{если_тогда (} D_{1i}^2 \wedge D_{2i}^2 \wedge \dots \wedge D_{ki}^2 \text{)} \Rightarrow ИМ_{1i}^2 \wedge ИМ_{2i}^2 \wedge \dots \wedge ИМ_{ni}^2 \quad 3_i) \\
 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\
 \text{если_тогда (} D_{1i}^m \wedge D_{2i}^m \wedge \dots \wedge D_{ki}^m \text{)} \Rightarrow ИМ_{1i}^m \wedge ИМ_{2i}^m \wedge \dots \wedge ИМ_{ni}^m \quad 3_i).
 \end{array}$$

Разработанный алгоритм управления участков ГПС позволяет анализировать и описывать условия функционирования исполнительного механизма каждого активного элемента; производить синтез управляющих воздействий, программным путем автоматически осуществлять анализ текущей информации о состоянии объекта, обеспечивать максимальное быстродействие в управлении [15].

Вывод. Разработанный алгоритм по поиску проекта ГПС на основе фрейм моделирования, позволяет из достоверных источников в глобальной компьютерной сети точно выбрать оборудование, промышленных роботов, их компоновочную схему и автоматизированную систему управления, а также предложить окончательную достоверную компоновочную и автоматизированную схему.

Для обеспечения надежного функционирования АСУ ГПС предложен алгоритм поиска датчиков и управления активными элементами производственного модуля ГПС. Для программирования фрейм модели используется программный язык представления знаний FRL.

Библиографический список:

1. Алексейчук А.Е. и др. Управление знаниями и системы автоматизированного проектирования. Материалы конференции и выставки "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. CAD/CAM/PDM-2001".
2. Вороненко, В.П. Проектирование производственных систем в машиностроении: Учеб. пособие / В.П.Вороненко, Ю.М.Соломенцев, А.Г.Схиртладзе, А.И.Пульбере. – Тирасполь: РИО ПГУ, 2001. – 349 с.

3. Зинченко Ю.В., Голобородько А.А. Обзор современных систем автоматизированного проектирования. Омский государственный технический университет, № 4(21), 2016, стр. 68-71.
4. Джордж Ф.Л. Искусственный интеллект, стратегии и методы решения сложных проблем // Нью-Мексиканский университет, «Вильямс». – М: СПб – Киев, 2005. – 863 с.
5. Мельников Г.Н., Вороненко В.П. Проектирование механосборочных цехов. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
6. Анзимиров Л.В. Интегрированная SCADA и Softlogic система TRACE MODE5 2002 году, №1, 2002, стр. 15- 22.
7. Мамедов Дж.Ф., Алиев Р.А., Ахмедов М.А. Разработка инструментария автоматизированного проектирования системы управления ГПС. -М.: Мехатроника, Автоматизация, Управление, №9, 2005, стр. 27-35.
8. Мамедов Дж.Ф., Талыбов Н.Г., Гусейнова А.С. Вопросы применения программного пакета для выбора стандартных деталей оборудования ГПС. Ученые записки АзТУ, Баку, XIII том, №2, 2004, с. 36-40.
9. Mamedov J.F., Huseynov A.H. Application of the intelligence and mathematical models for computing design of the flexible manufacturing module. Applied and computational mathematics, An International Journal, Volume 2, №1, 2003, p. 42-47.
10. Gero J.S.. Expert systems in computer-aided design. – Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland, Amsterdam, 2007, p. 230-243.
11. Джордж Ф.Л. Искусственный интеллект, стратегии и методы решения сложных проблем // Нью-Мексиканский университет, «Вильямс». – М: СПб – Киев, 2005. – 863 с.
12. Akhmadov M.A., Mamedov J.F. The option of flexible machining cell composes structure by means of minimization of branching time of industrial robot movement. The news of Azerbaijan Scientific Academy. Physic-technical and mathematical scientist, v. XXI, №3, Baku - 2001, p. 104-108.
12. Bruccoleri M., Sergio N. and Perrone G., “An object-oriented approach for flexible manufacturing controls systems analysis and design using the unified modeling language”. Int. J. Flexible Manuf. Syst. 2003, № 15 (3), pp. 195–216.
13. Кирюхин В. М., Зайцев К. С. Операционное управление в гибких производственных системах. М.: МИФИ, 2006. — 92 с.
14. El-Tamimi A. M., Abidi M.H., HammadMian S. and Aalam J. “Analysis of performance measures of flexible manufacturing system” Journal of King Saud University – Engineering Sciences 24, 2012, pp.115–129.
15. Mamedov J.F., Huseynov A.H. Algorithmic and programmatic providing of the automated design of the flexible productive system // design Information technologies in planning and production. Scientific and technical magazine, Moscow. №1, 2011, pp 49-52.

References:

1. Alekseychuk A.Ye. i dr. Upravleniye znaniyami i sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya. Materialy konferentsii i vystavki "Sistemy proyektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta. CAD/CAM/PDM-2001". [Alekseychuk A.E. et al. Knowledge management and computer-aided design systems. Materials of the conference and exhibition "Design systems, technological preparation of production and life-cycle management of the industrial product. CAD / CAM / PDM-2001" (In Russ)]
2. Voronenko, V.P. Proyektirovaniye proizvodstvennykh sistem v mashinostroyenii: Ucheb. posobiye / V.P.Voronenko, YU.M.Solomentsev, A.G.Skhirtladze, A.I.Pul'bere. Tiraspol': RIO PGU, 2001. 349 s. [Voronenko, V.P. Design of production systems in mechanical engineering: Textbook. allowance / V.P. Voronenko, Yu.M. Solomentsev, A.G. Skhirtladze, A.I. Pulbere. Tiraspol': RIO PSU, 200. 349 p. (In Russ)]
3. [Zinchenko Yu.V., Goloborodko A.A. Overview of modern computer aided design systems. Omsk State Technical University, No. 4 (21), 2016, pp. 68-71. (In Russ)]
4. George F.L. Artificial Intelligence, Strategies, and Methods for Solving Complex Problems //New Mexico University, Williams. - M: St. Petersburg - Kiev, 2005 . 863 p.
5. Mel'nikov G.N., Voronenko V.P. Proyektirovaniye mekhanosbornochnykh tsekhov. – М.: Mashinostroyeniye, 2010. – 352 s. [Melnikov G.N., Voronenko V.P. Design of mechanical assembly shops. М.: Mechanical Engineering, 2010. 352 p. (In Russ)]
6. Anzimirov L.V. Integrirovannaya SCADA i Softlogic sistema TRACE MODE5 2002 godu, №1, 2002, str. 15- 22. [Anzimirov L.V. Integrated SCADA and Softlogic System TRACE MODE5 2002, No. 1, 2002, pp. 15-22. (In Russ)]
7. Mamedov Dzh.F, Aliyev R.A., Akhmedov M.A. Razrabotka instrumentariya avtomatizirovannogo proyektirovaniya sistemy upravleniya GPS. -М.: Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye, №9, 2005, str. 27-35. [Mamedov J.F., Aliyev R.A., Akhmedov M.A. Development of tools for computer-aided design of a GPS control system. -М.: Mechatronics, Automation, Management, No. 9, 2005, pp. 27-35. (In Russ)]
8. Mamedov J.F., Talybov N.G., Huseynova A.S. Issues of using a software package for choosing standard GPS equipment parts. Scientific notes of AzTU, Baku, XIII volume, No. 2, 2004, pp. 36-40.
9. Mamedov J.F., Huseynov A.H. Application of the intelligence and mathematical models for computing design of the flexible manufacturing module. Applied and computational mathematics, An International Journal, Volume 2, No. 1, 2003, p. 42-47.
10. Gero J.S. Expert systems in computer-aided design. - Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland, Amsterdam, 2007, p. 230-243.

11. George F.L. Artificial Intelligence, Strategies, and Methods for Solving Complex Problems // New Mexico University, Williams. - M: St. Petersburg - Kiev, 2005. 863 p.
12. Akhmadov M.A., Mamedov J.F. The option of flexible machining cell composes structure by means of minimization-branching time of industrial robot movement. The news of Azerbaijan Scientific Academy. Physic-technical and mathematical scientist, v. XXI, No.3, Baku - 2001, pp. 104-108.
12. Bruccoleri M., Sergio N. and Perrone G., "An object-oriented approach for flexible manufacturing controls systems analysis and design using the unified modeling language". Int. J. Flexible Manuf. Syst. 2003, No. 15 (3), pp. 195-216.
13. Kiryukhin V. M., Zaytsev K. S. Operatsionnoye upravleniye v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh. M.: MIFI, 2006. — 92 s. [Kiryukhin V. M., Zaitsev K. S. Operational management in flexible production systems. M.: MEPhI, 2006. 92 p. (In Russ)]
14. El-Tamimi A. M., Abidi M.H., HammadMian S. and Aalam J. "Analysis of performance measures of flexible manufacturing system" Journal of King Saud University - Engineering Sciences 24, 2012, pp. 115-129.
15. Mamedov J.F., Huseynov A.H. Algorithmic and programmatic providing of the automated design of the flexible productive system // design Information technologies in planning and production. Scientific and technical magazine, Moscow. No. 1, 2011, pp. 49-52.

Сведения об авторах:

Мамедов Джаваншир Фирудин оглу, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации процессов; e-mail: cavan62@mail.ru

Абдуллаев Курбан Садых оглу, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой метрологии и стандартизации; e-mail: cavan62@mail.ru

Мурадлы Зияда Махал гызы, аспирант, кафедра автоматизация процессов; e-mail: cavan62@mail.ru

Гасанова Егана аспирант, аспирант, кафедра автоматизации процессов; e-mail: cavan62@mail.ru

Алиева Сабина Балакиши, аспирант, кафедра автоматизации процессов; e-mail: cavan62@mail.ru

Information about authors:

J.F. Mamedov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of Process Automation; e-mail: cavan62@mail.ru

Kurban S. Abdullaev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Metrology and Standardization; e-mail: cavan62@mail.ru

Ziyad M. Muradli, Graduate student, Department of Process Automation; e-mail: cavan62@mail.ru

Egan M. Hasanova, Graduate student, Department of Process Automation; e-mail: cavan62@mail.ru

Sabina B. Alieva, Graduate student, Head of the Department of Process Automation; e-mail: cavan62@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.01.2020.

Принята в печать 20.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.01. 2020.

Accepted for publication 20.02.2020.

Для цитирования: А. Молнар. Трёхмерное детектирование гамма-излучения и загрязняющих газов при помощи квадрокоптеров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 102-116. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116.

For citation: A. Molnár. Three-dimensional detection of gamma radiation and polluting gases using quadrocopters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 102-116. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116

ТРЕХМЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ГАЗОВ ПРИ ПОМОЩИ КВАДРОКОПТЕРОВ

А. Молнар

Университет в Старой Буде,
H-1034, Bécsi út 96/b, г. Будапешт, Венгрия

Резюме. Цель. Точное знание степени и локального распространения загрязнения играет ключевую роль во многих сферах жизни. **Метод.** Существует множество известных и общепринятых методов измерения намеченных данных, однако эти методы не дают удовлетворительного результата в тех случаях, когда быстро и на сравнительно небольшой площади (промышленная зона в несколько квадратных километров, жилой район и т.п.) требуется определить точные параметры загрязнения или установить изменения этих параметров, выраженные в цифрах. Небольшие БЛА (мультикоптеры с неподвижным или вращающимся крылом) оснащены чувствительными гамма-детекторами или детекторами по обнаружению загрязняющих газов; координаты полётных данных могут быть присвоены измеряемым данным. Такие информационные группы обеспечивают возможность в ходе зондирования территории определять распределение на ней излучения или загрязняющих воздух газов. С помощью данного метода можно выявить и локализовать незаконно хранящиеся или нелегально поставленные материалы, испускающие гамма-лучи, непрерывно мониторить вызванные химическими катастрофами загрязнения, определять пространственное распределение загрязнения. **Результат.** В статье представлены системы, основанные на практических экспериментах, позволяющие в случае использования гамма-детектора локализовать объекты с малыми дозами излучения, а также подготовить качественную карту гамма-излучения конкретной области, а в случае газовых датчиков визуализировать пространственное распространение газа-загрязнителя. Метод применяют, в первую очередь в полевых условиях для обнаружения гамма-излучателей с низкой активностью или с целью анализа эмиссии производственных объектов с выбросом загрязняющих веществ. **Вывод.** Комбинация пространственных координат с данными дистанционного зондирования является эффективным методом измерения. Разработанная система в целом применима для мобильных платформ, оснащённых датчиками. Системы предназначены для обеспечения быстрых, эффективных и надёжных измерений, которые можно использовать как для обнаружения, так и для контроля. Вид загрязняющих веществ, подлежащих измерению, зависит от используемых датчиков. Эксперименты указывают также и на то, что при замене применённых датчиков может возникнуть необходимость изменить обработку измеряемых данных в соответствии с характеристиками этого датчика, однако в целом обработку данных и визуализацию результатов можно практиковать.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, гамма-излучатели, гамма-детектор, детектирование

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

THREE-DIMENSIONAL DETECTION OF GAMMA RADIATION
AND POLLUTING GASES USING QUADROCOPTERS

A. Molnar

Óbuda University,

H-1034, Bécsi út 96/b, Budapest, Magyarország, (Hungary)

Abstract. Aim. Accurate knowledge of the extent and local distribution of pollution plays a key role in many areas of life. **Method.** Although there are many well-known and generally-accepted methods for obtaining the intended data, these methods do not give a satisfactory result in cases when it is necessary to determine the exact parameters of pollution quickly and in a relatively small area (e.g. an industrial zone of several square kilometers, a residential area, etc.) and to determine changes in these parameters as expressed numerically. Small UAVs (multicopter with fixed or rotating wing) were equipped with sensitive detectors for gamma rays and polluting gases, including the assignation of flight data coordinates to the measured data. Such informational groupings provide the opportunity to determine the distribution of radiation or air polluting gases. Using this method, it is possible to identify and localise illegally-stored or illegally-released gamma ray emitting materials, continuously monitor pollution caused by chemical disasters and determine the spatial distribution of pollution. **Results.** The article presents systems based on practical experiments, which, in the case of using a gamma detector, allow the localisation of objects using low radiation doses along with a high-quality map of gamma radiation in a specific area; and, in the case of gas sensors, the visualisation of the spatial distribution of a polluting gas. The method is used primarily in the field to detect gamma emitters with low activity or to analyse the emission of industrial facilities with the emission of pollutants. **Conclusion.** The combination of spatial coordinates with remote sensing data comprises an effective measurement method. The developed system is generally applicable for mobile platforms equipped with sensors. The systems are designed to provide fast, efficient and reliable measurements that can be used for both detection and control. The type of pollutants to be measured depends on the sensors used. The experiments also indicate that, when replacing the used sensors, it may be necessary to change the processing of the measured data in accordance with the characteristics of the particular sensor; however, in general, data processing and visualisation of the results can be carried out in practice.

Keywords: unmanned aerial vehicle, gamma emitters, gamma detector, detection

Введение. Присвоив координату платформы (т.е. точки измерения) измеренным значениям данных измерительного комплекса, установленного на мобильной платформе, мы обеспечим возможности для множества новых методов анализа и отображения данных [1]. С помощью динамических данных измерения (измерения, периодически повторяющиеся в процессе движения) с присвоенными им координатами могут быть изображены в плоскости или пространстве количество анализируемого вещества или степень излучения, что позволит определить не только моментальное значение исследуемой характеристики, но и её пространственное распределение.

Постановка задачи. Цель разработки – показать такой общеприменимый метод, который базируется на обусловленной роботизированными летательными аппаратами возможности свободного передвижения в пространстве и возможности применять небольшие, высокочувствительные датчики, устанавливаемые на борту БЛА, вместе с глобальными системами позиционирования [2]. Эти аппараты измерений и обнаружения в зависимости от типа бортовых датчиков способны автоматически обнаруживать различные газы, пыль или излучение в заданной области.

Хотя эксперименты, представленные в данной работе, охватывают результаты измерения конкретных материалов и источников излучения, данный метод обычно применяют в том

случае, когда масса и диапазон действия измерительных аппаратов позволяют практиковать его на роботизированном летательном аппарате.

Методы исследования. Измерение распределения газов в пространстве. Для определения пространственного распределения газов важно как можно точнее соотнести данные, измеряемые датчиками, с пространственной координатой [3, 4].

В отличие от простого метода измерения по отношению к высоте, в настоящем случае, требуются медленные полеты, предопределённые, прежде всего, парящими летательными аппаратами типа вертолёта или мультикоптера [5].

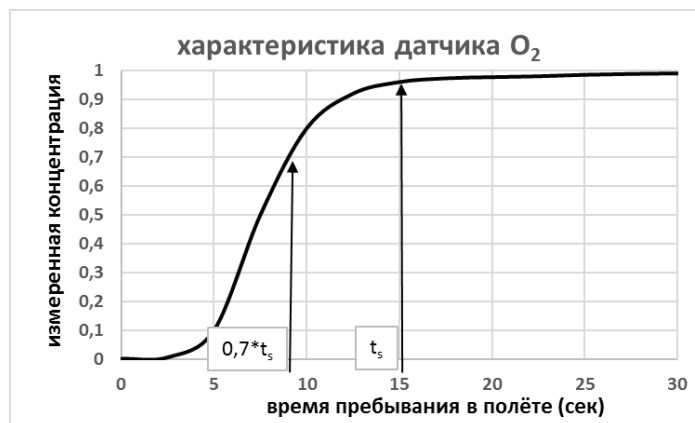


Рис. 1. Характеристика настройки датчика O₂
Fig. 1. Adjustent characteristic of the O₂ sensor

Для точности измерения следует выждать определенное время задержки датчика (t_s). Характерно, что электрохимические датчики, по сравнению с другими способами измерения (например, абсорбционные датчики), имеют большое время калибровки (время задержки), однако их размеры и вес достаточно малы, таким образом, они особенно подходят для использования в небольших летательных аппаратах.

При небольшом времени задержки путём экстраполяции можно определить фактическую концентрацию загрязнения.

Принцип такого метода заключается в следующем. Общеизвестно, что характеристика применяемого датчика (корреляция времени задержки и измеренного значения) обычно является нелинейной. К сожалению, эта корреляция зависит также от измеренной концентрации, таким образом, по сути дела ряд кривых более точно описывает характеристику датчика, но для практического применения производители предоставляют одну наиболее специфическую характеристику.

Отличным примером в применении газовых датчиков является характеристика используемого на экспериментальной установке датчика O₂ (кислорода), которую можно хорошо аппроксимировать с помощью следующей корреляции:

$$f(x) = \frac{x_2}{1 + x_1 e^{-x}} + c \quad (1)$$

где в конкретном случае

x_2 : 0,9552; x_1 : 3249; c : 0,008519

Необходимое время задержки этого датчика - 14 сек.

В зависимости от скорости летающей конструкции в таблице 1 ниже показана та часть пространства минимального диаметра, проходя через которое можно измерить концентрацию O₂, при условии, что концентрация на этом участке остается неизменной.

Таблица 1. Соотнесённый к необходимому времени задержки пройденный путь некоторых типовых датчиков с позиций разноразностных носителей

Table 1. Necessary residence time for carriers with different speeds for some typical sensors

	Время задержки датчика NO [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика NO ₂ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика CO [сек.] Sensor Delay Time	
	25	17,5	60	42	40	28
Скорость [м/сек] Speed...	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled
20	500	350	1200	840	800	560
10	250	175	600	420	400	280
5	125	87,5	300	210	200	140
2	50	35	120	84	80	56
1	25	17,5	60	42	40	28
0,5	12,5	8,75	30	21	20	14

Таблица 2. Соотнесённый к необходимому времени задержки пройденный путь некоторых типовых датчиков с позиций разноразностных носителей

Table 2. Travel distance for necessary residence time for carriers with different speeds for some typical sensors

	Время задержки датчика O ₃ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика O ₂ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика CO ₂ [сек.] Sensor Delay Time	
	60	42	14	9,8	90	63
Скорость [м/с] Speed...	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled
20	500	350	1200	840	800	560
10	250	175	600	420	400	280
5	125	87,5	300	210	200	140
2	50	35	120	84	80	56
1	25	17,5	60	42	40	28
0,5	12,5	8,75	30	21	20	14

Из таблицы видно, что в зависимости от скорости изменяется и замеренный граничный уровень загрязнения (возрастает при больших скоростях).

Точность измерения и обусловленную этим точность определения границы зоны загрязнения достигают за счет снижения скорости перемещения устройства.

При известном, но по продолжительности меньшим, чем следует временем пребывания в полёте, зная характеристики датчика, можно посредством следующего ниже метода оценить фактическую концентрацию ($y_{\text{газ}}$): вычисленный

$$y_{\text{газ}} = \frac{y_{\text{сзámított}}}{y_{\text{измеренный}}} f(t_s) \quad (2)$$

где

$y_{измеренный}$: $0,7t_s$ концентрация, рассчитанная за время пребывания в полёте,

т.е. $y_{számított} = f(0,7t_s)$;

$y_{газ}$: измеренная концентрация;

$f(x)$: функция аппроксимации характеристик датчика.

Очевидно, что при большой разнице во времени (разница между необходимым и фактическим временем пребывания в полёте) неточность измерения даёт значительный разброс в оценке концентрации.

Соответствующую точность можно обеспечить в том случае, если время пребывания в полете придется на участок снижения крутизны характеристической функции. Как правило, это 70% времени пребывания в полёте.

На основании выше изложенного лётная скорость в заданном пространстве определяется следующим образом: зная минимальную пространственную точность, которую вы хотите определить (для обычных навигаторов GPS - 6 м), время, необходимое для калибровки датчика, должно составлять не менее 70% от полного времени.

Например, если при использовании датчика NO концентрация NO должна быть определена с точностью ± 3 метра, модуль должен пройти 6 м за 17,5 секунды с учетом времени пребывания датчика в полёте (25 секунд). Это соответствует скорости приблизительно 0,34 м/сек., что составляет 1,23 км/час.

Гамма-детекторы. При выборе гамма-детектора, устанавливаемого на небольшом БЛА и способного выполнять отдельные задачи полёта, следует основываться на двух аспектах [6-9].

Решающим фактором является масса детектора, поскольку полезная грузоподъемность малых дронов строго ограничена. Обычно здесь подходят детекторы с массой 500 грамм и менее. Важно отметить, что недостаточно поднять детектор в воздух, но и необходимо обеспечить для него как можно более длительный полёт. Минимальное время предполагаемого полёта составляет 15 минут. Газовые ионизационные детекторы (счетчик Гейгера-Мюллера) отвечают указанным выше условиям.

По причине измерений с относительно большого расстояния приоритетного внимания заслуживают также чувствительность и эффективность детектора. В этом отношении некоторые сцинтилляционные детекторы могут обеспечивать значительно лучшую эффективность демодуляции [10], чем газовые ионизационные детекторы.

Другим предпочтительным типом детектора может быть полупроводниковый детектор [11], но его стоимость, по сравнению со счётчиком Гейгера-Мюллера такой же чувствительности, очень высока.

При рассмотрении возможных типов детекторов и учитывая ожидаемую стоимость устройства, был выбран счетчик Гейгера-Мюллера с трубкой большого диаметра. Большой диаметр - для обеспечения достаточной чувствительности, а газоразрядная ионизионная трубка - из-за малой массы. Средние значения, измеренные прототипом детектора на тестовой площадке -80 сгс (число импульсов в минуту).

К детектору был подключен микроконтроллер, фиксирующий измеряемые значения в таком формате, чтобы запись данных содержала количество импульсов в минуту, присовокупленное к измерению времени (временная метка) и GPS-координате измерения. Поскольку система беспилотника каждую секунду показывала точные координаты GPS, число импульсов, собираемых в специальном окне времени, записывалось усреднённо. В используемом окне времени всегда было зарегистрировано число импульсов за последние 15 секунд; данные за время, превышающее 15 секунд, удалялись из окна времени, а новые импульсы записывались.

Такой метод гарантировал, чтобы число записываемых каждую секунду импульсов складывалось из статистически интерпретируемого объема данных. В то же время, 15-секундное по времени окно сбора информации при перемещающемся БЛА вызывает также

необходимость коррекции координат импульсов, присвоенных координатам, что следует учитывать при дальнейшей обработке данных.

Относительные технические характеристики встроенной трубки Гейгера-Мюллера[12]:

- эффективная длина: 298.5 мм
- эффективный диаметр: 20.0 мм
- гамма-чувствительность по изотопу ^{60}Co : 180 сгс/мР/ч.
- масса: 150г.

Детекторная система создает следующую структуру данных:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Расшифровка отдельных полей:

A: Идентификатор строки(в данном случае всегда: \$CGPS)

B: Дата GPS(день xx, месяц yy, год zz)

C: Время GPS (час. xx, мин. yy, сек. zz.zz)

D: Статус GPS (в данном случае GPSEN)

E: Широта (град. xx, мин. yy.yyy)

F: Полушарие (северное N или южное S)

G: Долгота (град. xxx, мин. yy.yyy)

H: Запад/Восток (E или W)

I:Высота над уровнем моря по атмосферному давлению (метров xxx.xx)

J: Высота над уровнем моря по показаниям GPS (метров xxx.xx)

K: Расчётное излучение (мР/ч.)

L: Число обнаруженных импульсов за единицу времени (единицу времени можно изменить, её значение считывают с поля M)

M: Единица времени отсчета импульсов (сек. xx.xxxxxx)

N: Контрольная сумма

Пример строки:

\$CGPS,170712,023259.746,GPSEN,4732.0185,N,01902.0008,E,175.40,175.40,0.0074,19,14.244000,*77

Система газонаполненных детекторов. Измерительный модуль фиксирует следующие атмосферные компоненты и загрязнители:

- Кислород (O_2)
- Озон (O_3)
- Углекислоту (CO_2)
- Окись углерода (CO)
- Двоокись азота (NO_2)
- Окись азота (NO)
- Температуру
- Влажность
- Взвешенную пыль

Измерительный модуль может включать в себя дополнительно 10 датчиков, а в случае замены газовых сенсоров становится пригодными для измерения других газов. Такой диапазон свободы обеспечивает широкое использование модуля.

Конструкция модуля основывалась на аспектах, сформулированных для гамма-детектора. Основные характеристики выбранных датчиков (табл. 3.)

Данные датчиков заложены в структуре, описанной для гамма-детектора.

Таблица 3. Параметры датчиков, используемых на сенсорной панели
Table 3. Parameters of the used sensors in the sensor panel

Тип датчика Sensor type	Газ Gas	Метод измерения Method of measurement	Диапазон обнаружения Detection range	Разрешение Resolution	Время пребывания Time stay	Рабочий диапазон Working range
NO/C-25	NO	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-25 ppm	0,15 ppm	T90 :<25сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
NO2/C-20	NO ₂	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-20 ppm	0,1 ppm	T90 :<60сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
CO/CFA-200	CO	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-200 ppm	0,1 ppm	T90 :<40сек	-20-40 °C RH:15-90% 90-110KPa
O3/C-5	O ₃	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-5 ppm	0,02 ppm	T80 :<60сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
KE-25	O ₂	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-100% O ₂ -re	+ - 1%	T90 :<14сек	5-40 °C RH:10-90% 80-120KPa
tgs4161	CO ₂	Полупроводниковый датчик Semiconductor sensor	350 - 10,000 ppm CO ₂ -re	+ - 20%, 1000 ppm у CO ₂	T90 :<1,5мин	-10-50 °C RH:5-95%

Простые измерения в зависимости от высоты. Готовый измерительный блок в экспериментальных целях был интегрирован в роботизированный летательный аппарат (рис. 2) собственной конструкции. РБЛА смог самостоятельно выполнить заранее запрограммированное лётное задание [13]. Полёты были нацелены на выполнение нескольких экспериментов, включая исследование возможности измерения фонового излучения в полёте.



Рис. 2. Измерительный модуль, установленный на БЛА Chelidon собственной конструкции
Fig. 2. The measuring module mounted on a self made robotic aircraft called Chelidon

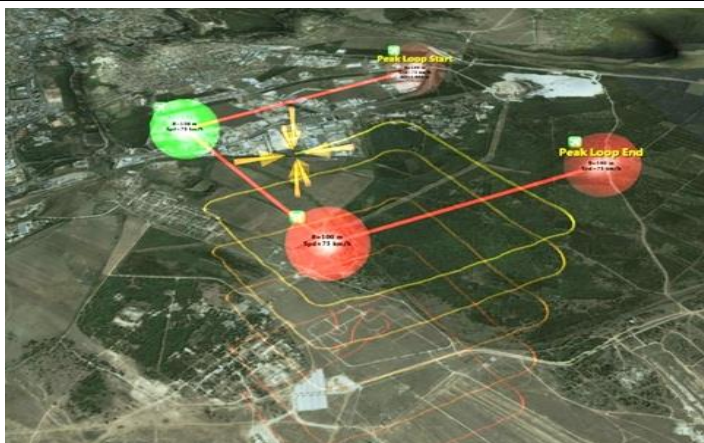


Рис. 3. Траектория полёта при измерениях, осуществленных в воздушном пространстве населённого пункта Варпалота (Венгрия) в процессе подъёма на 500 метров
Fig. 3. Flight track of a 500 meter ascent in Várpalota (Hungary) airspace

На рис. 3 представлена траектория полёта на высоте 500 метров. Лётная цель - на чётко обозначенной территории поднять самолёт с установленными на его борту приборами на высоту 500 м, а затем посадить над той же территорией [14].

Таким образом, в нашем распоряжении были данные и варианты, измеренные во время набора высоты, которые мы могли сравнить с данными, зафиксированными в процессе снижения. Результаты измерений в полете отражены на графиках рис. 4.

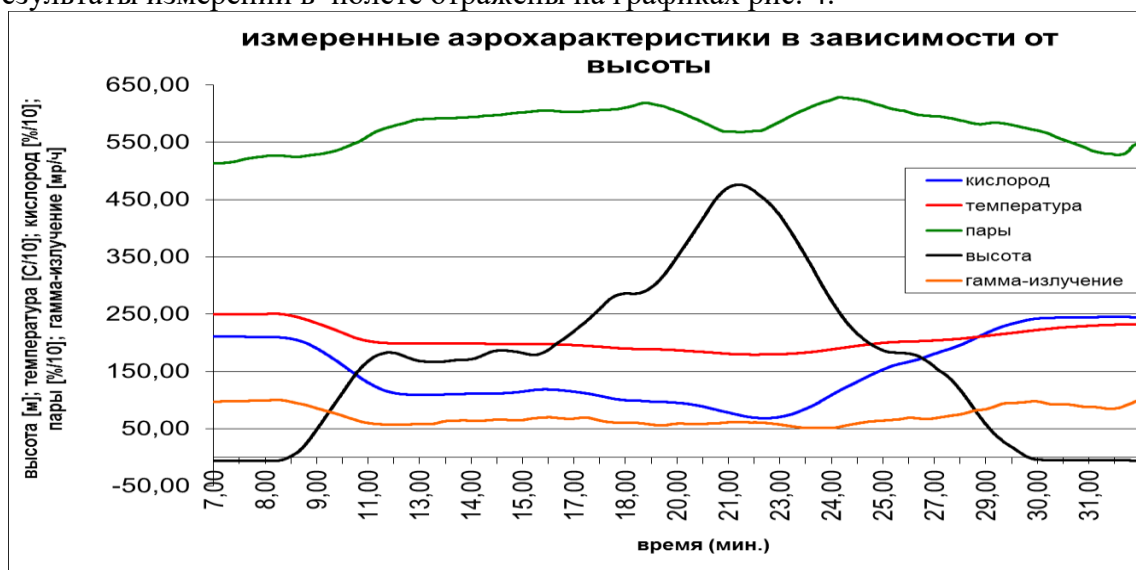


Рис. 4. Диаграммы компонент при наборе высоты 500 метров
Fig. 4. Components charts during a 500 meter climb

Изображенная на графике оранжевая кривая показывает формирование фонового излучения в зависимости от высоты. Детектор оказался достаточно чувствительным на обнаружение фонового излучения Земли. Видно, что вблизи земли были получены измеримо более высокие показатели излучения, чем в воздухе (излучение, измеренное как до подъема, так и после посадки, интенсивнее, чем во время полета).

Измерение трехмерного газового облака на практике. В ходе практических измерений были обнаружены источники выбросов CO и NO₂. Измерения проводились с помощью сенсорного блока, установленного на мультикоптере, перемещающемся со скоростью 0,27 м / с (1 км/ч). Полет охватывал зону измерения на нескольких отдельных высотах с ровными плоскостями сканирования на каждой высоте. На основе обработанных данных мы создали трехмерное облако, которое было построено с использованием программного обеспечения Google Earth в соответствии с реальным местоположением измерения (рис. 5, 6).

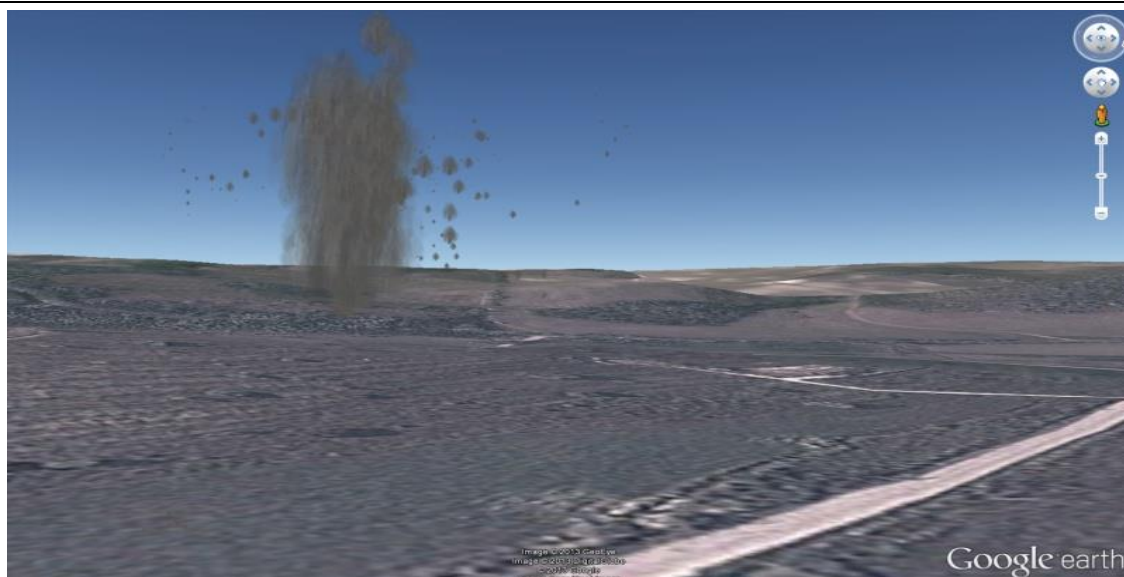


Рис. 5. Трехмерная визуализация экспериментального измерения CO
Fig. 5. 3D display of experimental CO measurement

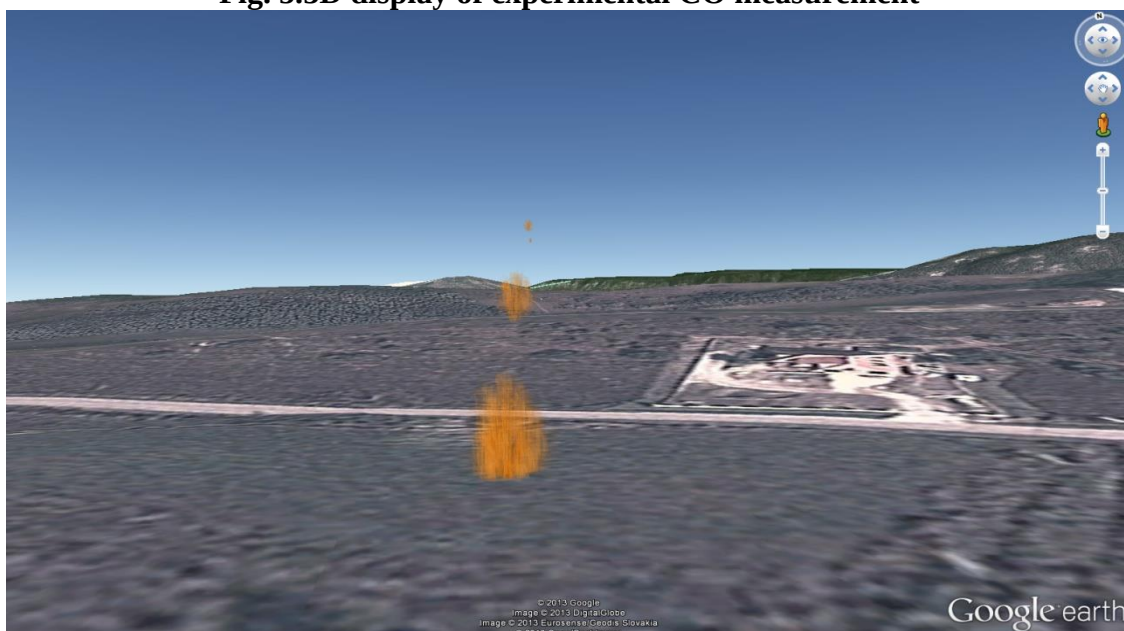


Рис. 6. Трехмерная визуализация экспериментального измерения NO₂
Fig. 6. 3D display of experimental NO₂ measurement

Измерение распределения гамма-излучения на практике. Разработка измерений в большинстве случаев основывалась на классической аэрофотосъемке, включая метод взаимоперекрывающего фотопанорамирования крупных площадей [15].

Сущность этого метода заключается в том, что беспилотник перемещается по охватывающей исследуемую область лётной траектории таким образом, чтобы сделанные за это время приближённо вертикальные снимки зондировали всю площадь, во всех направлениях перекрывая друг друга. Самый простой способ осуществления – перемещение по т. н. меандрирующей траектории, чтобы во время полёта делать снимки с регулярными интервалами. Конечно, высота орбиты, расстояние между параллельными участками и частота съемки должны соответствовать оптическим возможностям и скорости камеры [16].

Для определения распределения излучения нужно непрерывно измерять излучение в данной точке полета, или эквивалентное излучению число импульсов. Для последующей оценки измерений важно, чтобы полет выполнялся с постоянной скоростью и на постоянной высо-

те. Это гарантирует, что данные, измеренные детектором, могут быть сопоставимы для каждой точки полета.

Устройством-носителем был дрон DJI Inspire (рис. 7). Поскольку встроенная камера Inspire фиксирует данные GPS в момент каждой записи, составленное из снимков ортофото, имеет географическую привязку и является калиброванным [17]. Разрешение поля ортофото - 3 см/pxel, согласно нашему опыту геопривязка здесь точнее 3-х метров. Хотя эта точность может быть повышена за счет полевых опорных точек, в этом эксперименте было достаточно иметь фактор надежности в 3 метра.



Рис.7. Дрон Inspire с гамма-детекторами
Fig.7. The Inspire drone with gamma detectors

Учитывая, что данные GPS привязаны также и к измеряемым значениям гамма-детектора, полученная на их базе карта интенсивности может быть интегрирована в ортофото. Два слоя изображения посредством простой математической операции накладываются друг на друга, отображая таким образом местоположение источника излучения на карте.

Детекторный модуль рассчитывает показатели излучения по числу импульсов за единицу времени, определяемых счетчиком ГМ [18]. Это означает, что в определенной точке на время измерения нужно было бы остановить полёт устройства, однако такие остановки (парение над территорией) требуют больших энергозатрат, а это резко сократило бы дистанцию полёта и, в конечном счёте, привело к радикальному уменьшению площади исследуемой области.

Именно поэтому в то время, когда детекторный модуль подсчитывает значения, несущая конструкция перемещается с постоянной скоростью 2 м/с. Отсюда следует: значение в каждой точке измерения относится не к фиксированной метке GPS, а к одному сегменту. Следовательно, координаты результатов измерений тоже должны быть скорректированы с учетом вектора скорости устройства-носителя. На данном этапе эксперимента поправка рассчитывается на половину значения окна усреднённого времени, т.е. в координаты точки измерения вносятся поправка на путь, проделанный за 7,5 секунд. На практике это означает коррекцию на 15 м по отношению к направлению движения.

Отдельные измерения осуществляют над площадью в дискретных точках. При изображении распределения интенсивности (распределения излучения), накрывающей площадь, предполагается, что аналогичные значения могут быть измерены также и вблизи каждой точки измерения. Следовательно, значения соседних точек измерения вдоль соединяющих точки района вычисляем путем интерполяции измеренных значений.

Интерполяция также дает дискретные значения, однако расстояние между точками полученной таким образом геодезической сетки составляет одну десятую от точек измерения. Данные излучения (облако точек), сжатые интерполяцией, сглаживаем конволюционными фильтрами свертки. Это можно сделать, предполагая, что значение излучения вокруг заданной точки резко не изменится. Учитывая, что в при нефiltroванном облаке точек значение излучения в непосредственной близости от измеряемой или интерполированной точки сразу же переходит от измеренного значения к нулю, а затем снова к измеренному значению следующей точки, конволюционный фильтр (например, простое усреднение $n \times m$ -территории) обеспечит приближенный к реальному результат.

При помощи последующей коррекции следуют удалить значения фонового излучения. Метод относительно прост: предполагая, что на время измерения на большую часть террито-

рии приходится только фоновое излучение, из каждой точки измерения нужно вычесть средние измеренные значения излучения. Это либо приведет к получению изображения со значительно более низкими значениями, чем уровень чувствительности детектора (в этом случае в исследуемой области не было источника излучения), либо останется несколько пиковых значений, которые означают, что на исследуемой территории обнаружен источник излучения.

Обсуждение результатов. Практические эксперименты были начаты с источника излучения низкой интенсивности. Активность источника составляла 14 $\mu\text{Звч}$ при фоновом излучении 0,8 $\mu\text{Звч}$. Пробу с низкой активностью можно было обнаружить только во время низкого полета. Примененный в эксперименте дрон Inspire при поддержке программного обеспечения Pix4D Capture [19] мог летать в автономном режиме на минимальной высоте 10 метров, однако для обнаружения пробы высота полета не должна превышать 1,5 м, поэтому полет дрона осуществлялся в ручном режиме.

На рис. 8 представлено распределение доз излучения, полученное на базе траектории экспериментального полета и обработанных результатов.

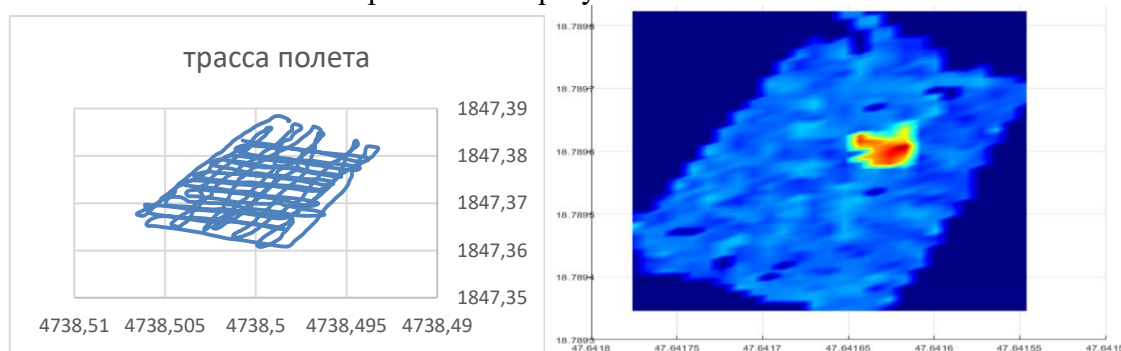


Рис. 8. Траектория экспериментального полета и изображение источника излучения

Fig. 8. Experimental flight track and radiation source

Для тестирования автоматического процесса мы использовали изотоп Тс-99m. Преимущество этого изотопа состоит в том, что благодаря 6-часовому периоду полураспада после отбора пробы остается достаточно времени, чтобы доставить пробу на место измерения и провести эксперимент, в то же время изотоп достаточно быстро распадается [20]. Активность проб во время каждого эксперимента была ниже так называемой «воспринимаемой» активности, т.е. не подлежала специальному лицензированию (не подпадает под действие Закона об атомной энергии 2005 года).

Обнаружение малоактивной пробы с довольно безопасного, но большего расстояния возможно только при наличии чувствительных детекторов. На начало измерения активность пробы составляла 221 $\mu\text{Звч}$ (рис. 9).



Рис. 9. Измерение активности пробы Тс-99m перед экспериментом

Fig. 9. Measuring the activity of the Tc-99m sample prior to the experiment

Рис. 10 иллюстрирует траекторию полета во время эксперимента. Полет проходил на высоте 9 метров ($\pm 0,1$ м) над пробой. Скорость полета - 2 м/с ($\pm 0,1$ м/с). Параметры исследуемой территории - ок. 80 x 80 м. или 6400 м². Представленная на рис.10 концентрация точек

указывает на место взлета и посадки, где дрон уже не перемещается с равномерной скоростью. Данные измерений, собранные в этой точке, при обработке во внимание приняты не были.

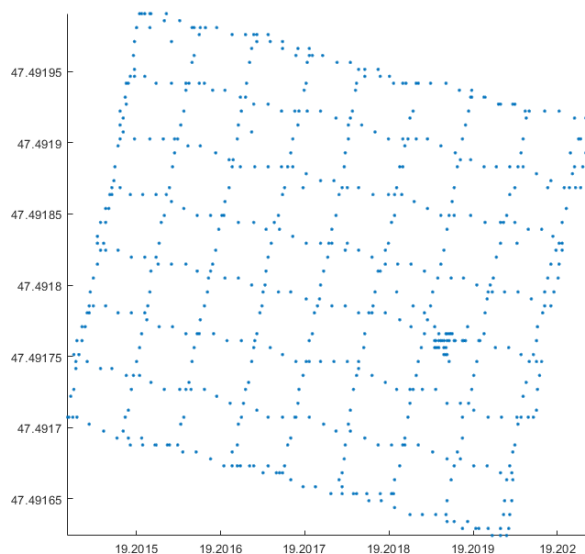


Рис. 10. Траектория автономного полёта с целью проведения измерения

Fig. 10. Autonomous flight track of a measurement

Для увеличения объема данных, устройство зондировало территорию дважды, чтобы траектории во второй фазе полета оказались перпендикулярными траекториям первой фазы. Таким образом, сложившаяся траектория полета привела к квадратной сетке. Траектория, изображенная на рис. 10, впоследствии была реконструирована по данным GPS, зафиксированным во время фактического полёта.

На рис. 11 показано скорректированное изображение излучения, спроецированное на ортофото с географической привязкой. Ортофотоснимок с географической привязкой был смодулирован на базе кадров бортовой камеры дрона.

Поскольку камера была позиционирована не по вертикали (80° вместо 90°), поступившая в наше распоряжение визуальная информация охватывала большую площадь, чем площадь зондирования, что облегчает калибровку ортофото.



Рис. 11. Ортофото с географической привязкой с изображением источника излучения

Fig. 11. Georeferenced orthophoto combined with radiation image

Проба была размещена в верхней части автомобиля, показанного на рис.11. Как можно заметить, согласно измерениям источник излучения располагается чуть-чуть дальше от автомобиля.

При оценке нескольких измерений мы установили, что отклонение от фактического местоположения пробы по разным направлениям составляло максимально 1,5 метра. Эта погрешность обусловлена частично погрешностью примененного GPS [21], частично неточностью в коррекции движения.

Вывод. Опыт, приобретённый в ходе осуществления представленных экспериментов, свидетельствует о том, что комбинация пространственных координат с данными дистанционного зондирования является эффективным методом измерения.

Начальные цели были достигнуты. Разработанная система в целом применима для мобильных платформ, оснащённых датчиками. Системы предназначены для обеспечения быстрых, эффективных и надежных измерений, которые можно использовать как для обнаружения, так и для контроля.

Вид загрязняющих веществ, подлежащих измерению, зависит от используемых датчиков.

Эксперименты указывают также и на то, что при замене применённых датчиков может возникнуть необходимость изменить обработку измеряемых данных в соответствии с характеристиками этого датчика, однако в целом обработку данных и визуализацию результатов можно практиковать.

Библиографический список:

1. Lazna, T., Gabrlik, P., Jilek, T., Zalud, L.: Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots (2018) International Journal of Advanced Robotic Systems, 15 (1).
2. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_5694700729.200.10.235-2016.pdf (дата обращения: 17.01.18).
3. Joseph G. Shanks, Andrey Dudkin, Mitigation of Atmospheric Uncertainty For Improved Trace-Gas Remote Sensing, in: Proc. of SPIE Proc. 5655: Multispectral And Hyperspectral Remote Sensing Instruments And Applications II: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment and Space, Volume: 5655 DOI: 10.1117/12.578952
4. Neumann, P. (2013). Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Ph. D. dissertation, Ferien Universität Berlin.
5. Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L.: Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry (2018) Journal of Environmental Radioactivity, 182, pp. 101-107.
6. Mochizuki, S. et al.: First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima (2017) Journal of Instrumentation, 12 (11), art. no. P11014, .
7. Aleotti, J. et al.: Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface (2017) Sensors (Switzerland), 17 (10), art. no. 2234, .
8. Hinterhofer, T., Pfennigbauer, M., Schraml, S., Hofstätter, M.: UAVbased multi-sensor system with real-time data processing and downlink for survey of nuclear disaster locations for first-responder support (2017) AUVSI XPO-NENTIAL 2017, .
9. Mousa Hussein, et al., Development of Autonomous Drone for Gas Sensing Application, 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 978-1-5386-0872-2/17/\$31.00 ©2017 IEEE
10. K. Torigoe, et al., Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A (2018), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.039>.
11. Nagy Gábor - Bäumlér Ede - Csurgai József - Molnár László - Pintér István - Vincze Árpád - Zelenák János - Solymosi József, PIN DIÓDA ALKALMAZHATÓSÁGA PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI SUGÁRFELDERÍTÉSBEN, Repüléstudományi Közlemények XXI. évf. 2. szám 2009.
12. 7808 Gamma Detector Specification, LND INC., p. 5.
13. Stojcsics D., Molnár A.: AirGuardian - UAV Hardware and Software System for Small Size UAVs INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS 9: pp. 1-8. (2012)
14. Somlyai L., Turóczy A., Molnár A.: Atmospheric Analyser for Mobile Robots, Proceedings of The 13th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics: CINTI 2012. Budapest, 2012. pp. 181-185.

15. Дейвис Динков: Триизмерно (3D) моделиране на обекти на културно-историческото наследство с използване на безпилотни летателни системи, ISSN 0204-7209 ISSN 2367-6671 (Online) ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА Книга 3-4 София 2018
16. Мельников А.В. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска / А.В. Мельников, В.А. Гайдай, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52–62.
17. Sato, Y., et al.: Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone (2018) *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55 (1), pp. 90-96.
18. G. Prasanna and J. Jayapandian, "An embedded read-out for GM counter" in *Int. J. Instrum. Technol.*, vol. 1, no. 3, p. 228 (2014).]
19. Röder, M.; Hill, S.; Latifi, H. (2017). Best Practice Tutorial: Technical handling of the UAV DJI Phantom 3 Professional and processing of the acquired data. Würzburg, University of Würzburg.
20. M. E. Bunker and R., Radiations from Mo" and Tc99m, Canada, *Phys. Rev.* 80, 961 (1950).
21. Anandrao Shesherao Biradar. Wind Estimation and Effects of Wind on Waypoint Navigation of UAVs. / A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona State University. May 2014.12. Martin Sele. Wind Corrections in Flight Path Planning / *International Journal of Advanced Robotic Systems* // Martin Sele, Petr Van, Milan Rollo, Tomas Meiser. Received 13 Jun 2012; Accepted 27 Jan 2013.

References:

1. Lazna, T., Gabrlík, P., Jilek, T., Zalud, L.: Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots (2018) *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (1).
2. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdukhnykh liniy elektropredachii energeticheskikh ob"ektov. Standart organizatsii PAO "FSK EES". [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the inspection of overhead power transmission lines and power facilities. The standard of organization of PAO "FSK EES". [Electronic resource]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_5694700729.200.10.235-2016.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
3. Joseph G. Shanks, Andrey Dudkin, Mitigation of Atmospheric Uncertainty For Improved Trace-Gas Remote Sensing, in: *Proc. of SPIE Proc.* 5655: Multispectral And Hyperspectral Remote Sensing Instruments And Applications II: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment and Space, Volume: 5655 DOI: 10.1117/12.578952
4. Neumann, P. (2013). Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Ph. D. dissertation, Ferien Universität Berlin.
5. Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L.: Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry (2018) *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, pp. 101-107.
6. Mochizuki, S. et al.: First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima (2017) *Journal of Instrumentation*, 12 (11), art. no. P11014, .
7. Aleotti, J. et al.: Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface (2017) *Sensors (Switzerland)*, 17 (10), art. no. 2234, .
8. Hinterhofer, T., Pfennigbauer, M., Schraml, S., Hofstätter, M.: UAVbased multi-sensor system with real-time data processing and downlink for survey of nuclear disaster locations for first-responder support (2017) *AUVSI XPO-NENTIAL 2017*, .
9. Mousa Hussein, et all., Development of Autonomous Drone for Gas Sensing Application, 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 978-1-5386-0872-2/17/\$31.00 ©2017 IEEE
10. K. Torigoe, et al., Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.039>.
11. Nagy Gábor - Bäumlér Ede - Csurgai József - Molnár László - Pintér István - Vincze Árpád - Zelenák János - Solymosi József PIN DIÓDA ALKALMAZHATÓSÁGA PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI SUGÁRFELDERÍTÉSBEN, Repüléstudományi Közlemények XXI. évf. 2. szám 2009.
12. 7808 Gamma Detector Specification, LND INC., p. 5.
13. Stojcsics D., Molnár A.: AirGuardian - UAV Hardware and Software System for Small Size UAVs *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS* 9: pp. 1-8. (2012)
14. Somlyai L., Turóczy A., Molnár A.: Atmospheric Analyser for Mobile Robots, *Proceedings of The 13th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics: CINTI 2012. Budapest, 2012. pp. 181-185.*

15. Davis Dinkov: 3D MODELING OF CULTURAL HISTORICAL HERITAGE SITES USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS, ISSN 0204-7209 ISSN 2367-6671 (Online) PROBLEMS OF GEOGRAPHY Volume 3-4 Sofia 2018
16. Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. Postroenie optimal'noi traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo aparata pri vypolnenii zadachi poiska. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2017;1:52–62. [Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. The construction of the optimal flight path of an unmanned aerial vehicle when performing a search task. The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2017;1:52–62. (in Russ.)]
17. Sato, Y., et al.: Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone (2018) Journal of Nuclear Science and Technology, 55 (1), pp. 90-96.
18. G. Prasanna and J. Jayapandian, "An embedded read-out for GM counter" in Int. J. Instrum. Technol., vol. 1, no. 3, p. 228 (2014).]
19. Röder, M.; Hill, S.; Latifi, H. (2017). Best Practice Tutorial: Technical handling of the UAV DJI Phantom 3 Professional and processing of the acquired data. Würzburg, University of Würzburg.
20. M. E. Bunker and R., Radiations from Mo⁹⁹ and Tc^{99m}, Canada, Phys. Rev. 80, 961 (1950).
21. Biradar A. S. Wind estimation and effects of wind on waypoint navigation of UAVs. A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree. Arizona State University. May 2014. 12. Selecký M., Váňa P., Rollo M., Meiser T. Wind corrections in flight path planning. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013;10:1-9.

Сведения об авторе:

Андраш Молнар, доктор технических наук, доцент, факультет информатики им. Яноша Нейманн; проректор университета Обуда; e-mail: molnar@uni-obuda.hu

Information about the author:

Andras Molnar, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., John von Neumann Faculty of Informatics; Vice rektor for General affairs of Obuda University; e-mail: molnar@uni-obuda.hu

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.03.2020.

Принята в печать 18.03.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 08.03.2020.

Accepted for publication 18.03.2020

Для цитирования: О.И. Степанов, Е.Е. Зайцева, С.А. Худякова. Моделирование расчетов параметров работы звеньев газодымозащитной службы на основе эксперимента. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 117-125. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-117-125

For citation: O.I. Stepanov, E.E. Zaitseva, S.A. Khudyakova. Model of calculations for experimentally-obtained gas and waterproof service line operational parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 117-125. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-117-125

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.932.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-117-125

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЗВЕНЬЕВ ГАЗОДЫМОЗАЩИТНОЙ СЛУЖБЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

О.И. Степанов¹, Е.Е. Зайцева², С.А. Худякова³

¹Казенное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Центр обработки вызовов и мониторинга систем обеспечения безопасности жизнедеятельности»

¹628007, г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, д.108, Россия,

²Главное управление МЧС России по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре

²628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 5а, Россия,

³Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,

³620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22, Россия

Резюме. Целью исследования является моделирование и расчетное обоснование тактических возможностей звеньев газодымозащитной службы пожарно-спасательных подразделений, как первичных единиц, осуществляющих разведку пожара и спасание пострадавших; анализ методики оценки действий личного состава пожарных подразделений по спасанию пострадавших. **Метод.** Экспериментальное обоснование необходимости корректировки расчетных методов определения параметров работы звеньев газодымозащитной службы при организации массового спасания пострадавших на объекте пожара. Моделирование действий звеньев газодымозащитной службы на основе теории графов. Рассмотрены различные подходы к прогнозированию параметров работы звеньев газодымозащитной службы в противопожарных службах. **Результат.** Приведены факторы, определяющие предельные параметры работы звеньев газодымозащитной службы. Приведены примеры расчета параметров работы звеньев газодымозащитной службы при массовом спасании пострадавших на объекте пожара. **Вывод.** Сформулировано заключение относительно целесообразности учета осложняющих факторов работы личного состава газодымозащитной службы в коэффициенте, учитывающем необходимый запас воздуха на обратный путь с учетом непредвиденных обстоятельств и значении среднего расхода воздуха.

Ключевые слова: разведка, звено, эксперимент, спасание, расход воздуха, путь

MODEL OF CALCULATIONS FOR EXPERIMENTALLY-OBTAINED GAS AND WATERPROOF SERVICE LINE OPERATIONAL PARAMETERS

O.I. Stepanov¹, E.E. Zaitseva², S.A. Khudyakova³

¹Government agency of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra «Centre for Call Processing and Monitoring of Health and Safety Systems»

¹108 St. Mira, Khanty-Mansiysk 1628007, Russia,

²General Directorate of the Ministry of Emergencies of Russia for the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Ugra,

²5a Studencheskaya Str., Khanty-Mansiysk 1628011, Russia,

³Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia,

³22 Mira Str., Ekaterinburg 2620062, Russia

Abstract. Aim. Modelling and calculations were carried out to justify the tactical capabilities of gas and smoke protection units of the fire and rescue units as primary units carrying out fire reconnaissance and rescue of victims of fires. A methodology for assessing actions of personnel of fire departments when rescuing victims was analysed. **Method.** An experimental justification is given for the need to adjust the calculation methods for determining the working parameters of gas and smoke protection units when organising mass rescue of victims of a fire. A model is proposed for considering the actions of the fireteam of a gas and smoke protection service based on graph theory. Various approaches to forecasting operational parameters of gas and smoke protection units in fire services are considered. **Results.** Factors determining the limiting parameters of the gas and smoke protection units are presented along with examples for calculating operational parameters during mass rescue of victims of a fire. **Conclusion.** A conclusion is formulated regarding complicating factors of the work of the personnel of the gas and smoke protection service in the coefficient, considering the necessary air supply for the return trip, unforeseen circumstances and average air flow.

Keywords: reconnaissance, fireteam, experiment, rescue, air consumption, path

Введение. Одной из основных функций системы обеспечения пожарной безопасности является тушение пожаров и проведение аварийно-спасательных работ, осуществляемое совокупностью сил и средств (личного состава, техники пожарно-спасательных подразделений, огнетушащих веществ) [1, 2].

Силы и средства пожарно-спасательных подразделений на месте пожара действуют в виде позиций, представляющих из себя организационные системы или человеко-машинные (эргатические) системы [3, 4].

Постановка задачи. Наиболее функциональными позициями, с точки зрения разновидности выполняемых задач, являются звенья газодымозащитной службы (ГДЗС) [5], а также позиции, осуществляющие действия при помощи робототехнических средств (РТС) [6].

Методы исследования. В учебной и методической литературе приводятся различные методики оценки действий личного состава при выполнении задач по тушению пожаров [7, 8]. Большинство методов основаны на микро нормировании действий личного состава и расчете времени выполнения действий при различной нагрузке с учетом многообразных факторов [9, 10]. В [11] предложены зависимости времени спасания пострадавших способами переноски, с помощью спасательной веревки, способом сопровождения и по автолестнице. В зависимости от способа транспортировки, приводятся следующие значения времени спасания [11] (табл. 1).

Табл. 1. Зависимость времени спасания (мин.) по лестничному маршруту от веса спасаемого
Table 1. The dependence of the time of rescue (min) by flight of stairs on the weight of the saved

Этаж Floor	Масса, кг Weight, kg					
	60	65	70	75	80	90
2	0,6	0,62	0,65	0,66	0,75	0,78
4	1,23	1,27	1,38	1,43	1,47	1,5
6	1,75	1,78	1,83	1,98	2,03	2,15

В [12] приведены результаты практических экспериментов по проведению спасательных работ в среде, непригодной для дыхания, в части определения зависимостей времени проведения спасательных работ и расхода воздуха в баллонах ДАСВ при поиске и спасании пострадавших методом транспортировки в положении лёжа на спине (табл. 2).

Табл. 2. Результаты проведённых экспериментов по поиску, нахождению и спасанию пострадавших (взрослого человека и ребенка)

Table 2. The results of experiments to search, find and rescue the injured (adult and child)

Спасательные работы Rescue Work	Время спасательных работ, мин. Rescue Time, min.	Расход воздуха по давлению в баллоне, кгс/см ² Air consumption by pressure in a cylinder, kgf / cm ²	Расход воздуха по времени работы в ДАСВ, (кгс/см ²)/мин Air consumption by operating time in DASV, (kgf / cm ²) / min.	Средний расход воздуха, л/мин. Average air consumption l/min
Поиск и нахождение взрослого пострадавшего, упаковка и транспортировка Search and finding an adult victim, packaging and transportation	транспортировка: 13 всего: 22,5 Total:transportation	до 255	до 11,33	до 70,06
Поиск и нахождение пострадавшего ребенка, упаковка и транспортировка Search and find the injured child, packaging and transportation	транспортировка: 7 всего: 20,5 Total:transportation	до 195	до 9,51	до 58,80

В [13] приведен способ распределения запаса воздуха в ДАСВ по правилу «трех третей», согласно которому звено распределяет запас на 3 части.

Одна треть на продвижение вглубь объекта пожара, по израсходованию которой звено ГДЗС должно направляться к выходу из НДС. Для обратного пути предназначена вторая треть, а третья резервируется для непредвиденных задержек во время возврата.

Обсуждение результатов. Эксперименты, проведенные в подразделениях федеральной противопожарной службы по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре, показали существенное влияние на тактические возможности звеньев ГДЗС следующих факторов:

- уровень (этаж) нахождения пострадавших;
- тип применяемого дыхательного аппарата на сжатом воздухе (ДАСВ) и его характеристики (в основном по запасу воздуха и эргономике);
- состояние и масса пострадавших;
- наличие технических средств (решений), облегчающих транспортировку пострадавших.

Эксперименты проводились в 2 блока:

- 1) без пострадавших на свежем воздухе;

2) с пострадавшими на уровне второго этажа зданий (торгово-развлекательных центров).

В целом процесс работы звеньев ГДЗС от момента включения в ДАСВ можно представить в виде графа (рис. 1).

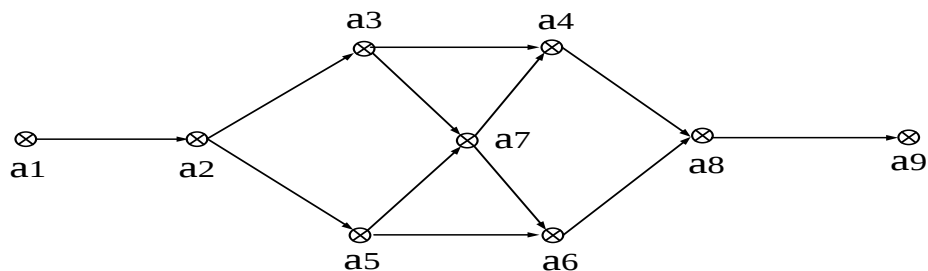


Рис. 1. Граф работы звена ГДЗС

где: a1 – включение звена ГДЗС в ДАСВ, a2 – разведка объекта пожара, a3 – поиск пострадавших, a4 – эвакуация пострадавших, a5 – поиск очага пожара, a6 – тушение очага (зоны горения), a7 – выполнение других аварийно-спасательных работ, a8 – выход звена ГДЗС на свежий воздух, a9 – выключение звена ГДЗС из ДАСВ.

Fig. 1. Schedule of work of the gas and smoke protection service

where: a1 - inclusion of a firefighter unit's in breathing apparatus, a2 - reconnaissance of a fire object, a3 - search for victims, a4 - evacuation of victims, a5 - search for a fire source, a6 - extinguishing a fire (combustion zone), a7 - other emergency rescue operations, a8 - firefighter unit's exit to fresh air, a9 - firefighter unit's shutdown from breathing apparatus.

Экспериментальные данные, полученные при проведении пожарно-тактических учений в г. Ханты-Мансийске, а также в ходе опытов в подразделениях федеральной противопожарной службы в городах Нижневартовск, Югорск, Ханты-Мансийск, показали необходимость поиска путей расширения тактических возможностей звеньев ГДЗС для проведения операций по спасанию пострадавших. Расстояние от места включения звена ГДЗС до места расположения пострадавших составляло не менее 70 м с учетом лестничных маршей.

Зависимость времени спасания 2 пострадавших звеньями ГДЗС в составе 3 человек (рис. 2) показывает необходимость внедрения технических средств (решений), облегчающих транспортировку пострадавших, находящихся в бессознательном состоянии [13, 14].

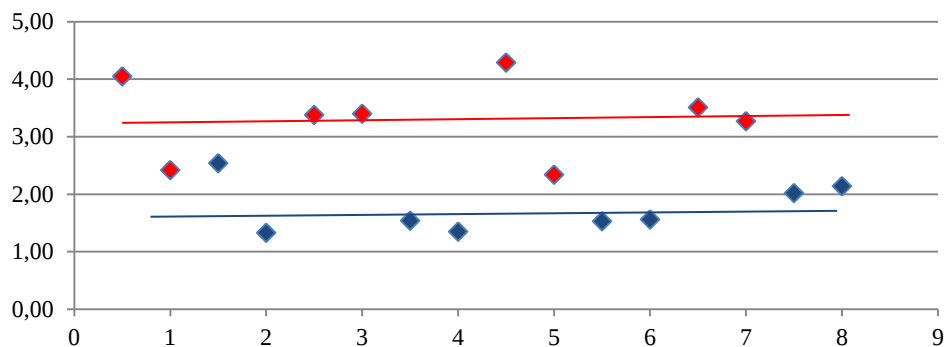


Рис. 2. Результаты экспериментов по проведению спасания 2 пострадавших звеньями ГДЗС в составе 3 человек, мин.

где: ♦ – время работы звеньев ГДЗС без технических средств (решений), облегчающих транспортировку пострадавших, ♦ – время работы звеньев ГДЗС с применением технических средств (решений), облегчающих транспортировку пострадавших

Fig. 2. The results of experiments on the rescue of 2 injured by gas and smoke protection service, consisting of 3 units, min

where: ♦ – operating time of firefighter units without technical means (solutions) that facilitate the transportation of victims, ♦ – operating time of firefighter units with technical means (solutions) that facilitate the transportation of victims

Среднее значение по проведенным опытам составило для звеньев с техническими средствами (решениями), облегчающими транспортировку пострадавших – 1,75 мин., без технических средств (решений) – 3,33 мин.

При опытах с 5 пострадавшими на 1 звено ГДЗС получены следующие зависимости (табл. 3) [15].

Табл. 3. Результаты проведённых экспериментов по поиску, нахождению и спасанию пострадавших в торговых центрах [15]

Table 3. The results of experiments to search, locate and rescue victims in shopping centers [15]

Состав звеньев The composition of the links	Среднее давление включения, кгс/см ² Average pressure of inclusion, kgf / cm ²	Среднее время проведения действий, мин. сек. Average time of action, min. sec	Количество спасенных пострадавших The number of survivors	Среднее давление при завершении действий, кгс/см ² Average pressure at the completion of actions, kgf / cm ²	Наличие средств спасения Availability of rescue equipment
2	289	12,11	5	60	Есть There is
2	282	13,32	3	53	Нет Not
3	291	14,13	3	63	Нет Not
4	288	07,22	5	160	Нет Not

Итоговое время фиксировалось по выносу на свежий воздух последнего спасенного из расположенных пострадавших или по выключению звена ГДЗС из-за первого срабатывания звукового сигнала ДАСВ [15].

Согласно расчетным формулам [16], примененным для условий проведения опытов с различными составами звеньев ГДЗС, получены значения $P_{\text{max. пад.}}$ – максимальное падение давления при движении от поста безопасности (ПБ) до конечного места работы, кгс/см²; $P_{\text{к. вых.}}$ – давление, при котором звену ГДЗС необходимо выходить из НДС, если очаг пожара не будет найден, кгс/см²; ΔT – время с момента включения в ДАСВ до начала выхода из непригодной для дыхания среды (НДС):

$$P_{\text{max. пад.}} = \frac{P_{\text{min.вкл.}} - P_{\text{уст.раб.}}}{2,5} \quad (1)$$

где $P_{\text{min.вкл.}}$ – наименьшее в составе звена ГДЗС значение давления в баллоне при включении, кгс/см²; 2,5 – коэффициент, учитывающий необходимый запас воздуха на обратный путь с учетом непредвиденных обстоятельств.

$$P_{\text{max. пад.}} = \frac{282 - 10}{2,5} = 108 \text{ кгс/см}^2$$

$$P_{\text{к. вых.}} = P_{\text{min.вкл.}} - P_{\text{max. пад.}} \quad (2)$$

$$P_{\text{к. вых.}} = 282 - 108 = 174 \text{ кгс/см}^2$$

Время с момента включения в ДАСВ до начала выхода из НДС составило:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{max. пад.}} \times V_6}{40 \times K_{\text{сж}}} \quad (3)$$

где V_6 – объем баллона со сжатым воздухом, установленный на ДАСВ, л; 40 – средний расход воздуха, л/мин.; $K_{\text{сж}}$ – коэффициент сжимаемости воздуха.

$$\Delta T = \frac{108 \times 6,8}{40 \times 1,1} = 16,6 \text{ мин.}$$

При расчете с коэффициентом, учитывающим необходимый запас воздуха на обратный путь с учетом непредвиденных обстоятельств, принятым для сложных условий работы равный «3», ΔT составит 14 минут.

Расчетные данные показывают, что звенья ГДЗС, задействованные при проведении опытов в экипировке, соответствующей требованиям [5], могли выполнить задачу по спасению 5

пострадавших только в составе 4 и более газодымозащитников при условии повторного возвращения в локацию нахождения пострадавших.

Звенья в сокращенном до 2 человек составе способны выполнить аналогичную задачу на пределе параметра ΔT , при этом расчетный параметр превышает фактически установленный в опытах в среднем на 2 минуты, что означает необходимость уточнения порядка расчета для случаев массового спасения с возвращением в локацию нахождения пострадавших.

Таким образом расширить тактические возможности звеньев ГДЗС возможно, «разгрузив» членов звена, путем совершенствования методов эвакуации пострадавших. Применение средств (решений), облегчающих транспортировку пострадавших, повышает тактические возможности звеньев в 1,5 – 2 раза, как по количественному составу звена, так и по времени проведения спасания.

Также опытами установлено, что наиболее трудозатратным и затратным по времени проведения всей операции по спасанию этапом работы с пострадавшим, находящимся без сознания, является участок а4 – а8 (рис. 1). Именно на этот этап, согласно [12, 15] приходится максимальный расход запаса воздуха ДАСВ 60-85 л/мин (в зависимости от применения спасательного устройства).

Ориентируясь на данные [15, 17]: средняя предельная дистанция передвижения по объекту пожара (при проведении спасательной операции) не более 200 м; среднее предельное время работы газодымозащитников 12-13 минут; средняя площадь разведки 1 звеном ГДЗС до 460 м² – предлагается представить путь а2, а3, а4, а8, в случае массового спасания, в составе следующих этапов (рис. 3):

- 1) путь от ПБ к месту нахождения пострадавших;
- 2) упаковка пострадавшего (пострадавших);
- 3) транспортировка пострадавшего (пострадавших);
- 4) оценка возможности повторного возвращения в случае оставшихся пострадавших;
- 5) путь к месту нахождения пострадавших;
- 6) упаковка пострадавшего (пострадавших);
- 7) транспортировка пострадавшего (пострадавших);
- 8) выход звена ГДЗС из НДС.

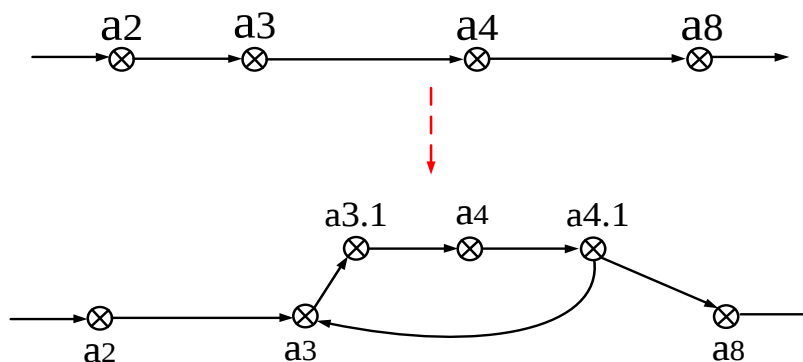


Рис. 3. Эволюция подграфа работы звена ГДЗС (а2 – а8)

где: а2 – разведка объекта пожара, а3 – поиск пострадавших, а3.1 – упаковка пострадавшего, а4 – транспортировка пострадавших, а4.1 – оценка возможности повторного возвращения, а8 – выход звена ГДЗС на свежий воздух.

Fig. 3. The evolution of the subgraph of the work of the gas and smoke protection service (a2 - a8)

where: a2 - reconnaissance of a fire object, a3 - search for the injured, a3.1 - packing the victim, a4 - transporting the victims, a4.1 - assessing the possibility of re-returning, a8 - firefighter unit's exit to fresh air.

Предлагается внести в расчеты оценку расхода воздуха, полученную эмпирическим путем. Так, безопасная и возможная эвакуация пострадавшего звеном ГДЗС возможна на расстоянии 80-90 м от места включения звена.

При обнаружении пострадавшего, продвижение возможно до 6 минут. Время продвижения с пострадавшим (пострадавшими) замедляет звено в 2 и более раза, потребление воздуха возрастает в 1,5 раза. Таким образом, при массовом спасении, операции а3 – а4 могут прово-

даться при нахождении пострадавших не далее 40-45 м от места ввода звена ГДЗС, в глубине объекта пожара.

Таким образом, необходимо внести в расчет времени работы звена ГДЗС (ΔT), при массовом спасении, средний расход воздуха не менее 60 л/мин.

По ранее проведенному расчету ΔT составит:

$$\Delta T = \frac{108 \times 6,8}{60 \times 1,1} = 11,1 \text{ мин.}$$

Полученный расчет коррелирует с экспериментальными данными [15, 17] и позволяет оценить возможность проведения массового спасения на объекте пожара.

Вывод. Текущий порядок расчетов параметров работы звеньев ГДЗС, на основании экспериментальных данных, требует корректировки в части применения коэффициента для сложных условий или среднего расхода воздуха из ДАСВ.

Изменение коэффициента, учитывающего необходимый запас воздуха на обратный путь с учетом непредвиденных обстоятельств, на значение «3,5» или применение среднего расхода воздуха 60 л/мин более коррелируется со временем работы, полученным в ходе проведения экспериментов.

Разрабатываемые методики оценки действий личного состава пожарных подразделений по спасению пострадавших должны проходить обязательное широкое экспериментальное обоснование в условиях наиболее приближенных к условиям реального пожара.

Библиографический список:

1. Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
2. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
3. Степанов О.И. Информационно-аналитическое обеспечение управления пожарными подразделениями при тушении пожаров в жилом секторе. Автореферат диссертации канд. тех. наук: 05.13.10 / Олег Игоревич Степанов – М., 2019. – 25 с.
4. Степанов О.И., Денисов А.Н. Алгоритм синтеза системы управления пожарными подразделениями на месте пожара // интернет-журнал «Техносферная безопасность» – 2018. – Вып. № 2 (19).
5. Приказ МЧС России от 09.01.2013 №3 «Об утверждении Правил проведения личным составом федеральной противопожарной службы Государственной противопожарной службы аварийно-спасательных работ при тушении пожаров с использованием средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в непригодной для дыхания среде».
6. Методические рекомендации по тактике применения наземных робототехнических средств при тушении пожаров, утвержденные МЧС России 17.07.2015, 38 с.
7. Тербнев В.В., Подгрушный А.В. Пожарная тактика: Основы тушения пожаров: учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 322 с.
8. Тербнев В.В. Пожарная тактика. Расчет параметров пожаротушения. 2-е издание с изм. Екатеринбург: ООО «Издательство «Калан», 2019. – 447 с.
9. Тербнев В.В., Паровин С.Л. Математическая модель определения времени боевого развертывания // Динамика пожаров и их тушение: сборник научных трудов. – М.: ВПТШ МВД СССР, 1987.
10. Повзик Я.С., Тербнев В.В. Неравномерность нагрузки на пожарных при боевом развертывании. Пожарная техника, тактика и автоматические установки пожаротушения : сб. науч. трудов. – М.: ВПТШ МВД СССР, 1989.
11. Тербнев В.В., Подгрушный А.В. Пожарная тактика. Основы тушения пожара. – Екатеринбург: Калан, 2008. – 512 с.
12. Коршунов И.В., Смагин А.В., Панков Ю.И., Андреев Д.В. О поисково-спасательных работах звена газодымозащитной службы // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2016. – № 4 (68).
13. Кабелев Н.А. Пожарная разведка: тактика, стратегия и культура. Екатеринбург: ООО «Издательство «Калан», 2016. – 348 с.
14. Универсальная спасательная петля. Рекомендации. Методика использования. – М.: ГУ МЧС России по г. Москве, 2018, 49 с.
15. Степанов О.И., Зайцева Е.Е., Стахеев М.В., Худякова С.А. О тактических возможностях звеньев газодымозащитной службы спасения пострадавших в торгово-развлекательных центрах // интернет-журнал «Техносферная безопасность» – 2019. – Вып. № 4 (25).

16. Методические указания по проведению расчетов параметров работы в средствах индивидуальной защиты органов дыхания и зрения, утвержденные МЧС России 05.08.2013 (с изменениями), 8 с.

17. Тужиков Е.Н. Экспериментальная проверка эффективности управления звеньями газодымозащитной службы при внедрении датчиков неподвижного состояния. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018, 45 (4), с. 124-132. [Doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-124-132](https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-124-132)

References:

1. Federal'nyj zakon ot 21 dekabrya 1994 g. № 69-FZ «O pozharnoj bezopasnosti» (s izmeneniyami i dopolneniyami). [Federal law of 21 Decemder 1994 № 69-FZ «On Fire Safety» (with changes and additions). (In Russ)]
2. Federal'nyj zakon ot 22 iyulya 2008 g. № 123-FZ «Tekhnicheskij reglament o trebo-vaniyah pozharnoj bezopasnosti» (s izmeneniyami i dopolneniyami). [Federal law of 22 July 2008 № 123-FZ «Technical regulations about requirements of fire safety» (with changes and additions). (In Russ)]
3. Stepanov O.I. Informacionno-analiticheskoe obespechenie upravleniya pozharnymi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov v zhilom sektore. Avtoreferat dissertacii kand. tekhn. nauk: 05.13.10 / Oleg Igorevich Stepanov – M., 2019. – 25 s. [Stepanov O.I. Information and analytical support for the management of fire departments in extinguishing fires in the residential sector. Abstract of the dissertation: 05.13.10 - M., 2019. 25 p. (In Russ)]
4. Stepanov O.I., Denisov A.N. Algoritim sinteza sistemy upravleniya pozharnymi podrazdeleniyami na meste pozhara // internet-zhurnal «Tekhnosfernaya bezopasnost» – 2018. – Vol. № 2 (19). [Stepanov O.I., Denisov A.N. The synthesis algorithm of the fire department control system at the fire site // Technosphere Security online journal 2018. Issue. № 2 (19). (In Russ)]
5. Priказ MCHS Rossii ot 09.01.2013 №3 «Ob utverzhdenii Pravil provedeniya lichnym sostavom federal'noj protivopozharnoj sluzhby Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby avarijno-spasatel'nyh rabot pri tushenii pozharov s ispol'zovaniem sredstv individual'noj zashchity organov dyhaniya i zreniya v neprigodnoj dlya dyhaniya srede». [Order of the Ministry of Emergencies of Russia 01.01.2013 № 3 «On the Approval of the Rules for Conducting by the Personnel of the Federal Fire Service of the State Fire Service of Emergency Rescue Operations during Fire Fighting Using Personal Respiratory and Visual Aids in Unsuitable Breathing Environment». (In Russ)]
6. Metodicheskie rekomendacii po taktike primeneniya nazemnyh robototekhnicheskikh sredstv pri tushenii pozharov, utverzhdennye MCHS Rossii 17.07.2015, 38 s. [Methodological recommendations on the tactics of using ground-based robotic equipment for fire fighting, approved by EMERCOM of Russia on 07.17.2015, 38 p. (In Russ)]
7. Terebnev V.V., Podgrushnyj A.V. Pozharnaya taktika: Osnovy tusheniya pozharov: ucheb. posobie. – M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2012. – 322 s. [Terebnev V.V., Podgrushny A.V. Fire tactics: Fundamentals of fire fighting: textbook. allowance. - M.: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2012. 322 p. (In Russ)]
8. Terebnev V.V. Pozharnaya taktika. Raschet parametrov pozharotusheniya. 2-e izdanie s izm. Ekaterinburg: OOO «Izdatel'stvo «Kalan», 2019. – 447 s. [Terebnev V.V. Fire tactics. Calculation of fire extinguishing parameters. 2nd edition, rev. Ekaterinburg: «Publishing House «Kalan», 2019. 447 p. (In Russ)]
9. Terebnyov V.V., Parovin S.L. Matematicheskaya model' opredeleniya vremeni boevogo razvyortyvaniya // Dinamika pozharov i ih tushenie: sbornik nauchnyh trudov. – M.: VIPTSH MVD SSSR, 1987. [Terebnev V.V., Parovin S.L. A mathematical model for determining the deployment time // Fire dynamics and extinguishing: a collection of scientific papers. - M.: Higher Fire Engineering School of the Ministry of the Interior USSR, 1987. (In Russ)]
10. Povzik Ya.S., Terebnyov V.V. Neravnomernost' nagruzki na pozharnykh pri boevom razvyortyvani. Pozharnaya tekhnika, taktika i avtomaticheskie ustanovki pozharotusheniya : sb. nauch. trudov. – M.: VIPTSH MVD SSSR, 1989. [Povzik Ya.S., Terebnev V.V. Uneven load on firefighters during combat deployment. Fire fighting equipment, tactics and automatic fire extinguishing installations: Sat scientific labor. - M.: Higher Fire Engineering School of the Ministry of the Interior USSR, 1989. (In Russ)]
11. Terebnyov V.V., Podgrushnyj A.V. Pozharnaya taktika. Osnovy tusheniya pozhara. – Ekaterinburg: Kalan, 2008. – 512 s. [Terebnev V.V., Podgrushny A.V. Fire tactics. Fire fighting basics. - Ekaterinburg: «Publishing House «Kalan», 2008. 512 p. (In Russ)]
12. Korshunov I.V., Smagin A.V., Pankov Yu.I., Andreev D.V. O poiskovo-spasatel'nyh rabotah zvena gazodymozashchitnoj sluzhby // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti». – 2016. – № 4 (68). [Korshunov I.V., Smagin A.V., Pankov Yu.I., Andreev D.V. On search and rescue operations of a gas and smoke protection service link // Internet journal «Technosphere Safety Technologies». 2016. No 4 (68). (In Russ)]
13. Kabelev N.A. Pozharnaya razvedka: taktika, strategiya i kul'tura. Ekaterinburg: OOO «Izdatel'stvo «Kalan», 2016. – 348 s. [Kabelev N.A. Fire intelligence: tactics, strategy and culture. Ekaterinburg: «Publishing House «Kalan», 2016. - 348 p. (In Russ)]

14. Universal'naya spasatel'naya petlya. Rekomendacii. Metodika ispol'zovaniya. – M.: GU MCHS Rossii po g. Moskve, 2018, 49 s. [Universal rescue loop. Recommendations The method of use. – M.: head-office for Moscow of EMERCOM of Russia, 2018, 49 p. (In Russ)]
15. Stepanov O.I., Zajceva E.E., Staheev M.V., Hudyakova S.A. O takticheskikh vozmozhnostyakh zven'ev gazodymozashchitnoj sluzhby spaseniya postradavshih v torгово-razvlekatel'nyh centrakh // internet-zhurnal «Tekhnosfernaya bezopasnost'» – 2019. – Vol. № 4 (25). [Stepanov O.I., Zaitseva E.E., Stakheev M.V., Khudyakova S.A. On the tactical capabilities of the gas and smoke protection service for rescue of victims in shopping and entertainment centers // Internet journal «Technosphere Security» - 2019. - Issue. № 4 (25). (In Russ)]
16. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu raschetov parametrov raboty v sredstvakh individual'noj zashchity organov dyhaniya i zreniya, utverzhdennye MCHS Rossii 05.08.2013 (s izmeneniyami), 8 s. [Guidelines for calculating the parameters of work in personal protective equipment for respiratory and visual organs, approved by EMERCOM of Russia on 05.08.2013 (as amended), 8 p. (In Russ)]
17. Tuzhikov E.N. Eksperimental'naya proverka effektivnosti upravleniya zven'yami gazodymozashchitnoj sluzhby pri vnedrenii datchikov nepodvizhnogo sostoyaniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018, 45 (4), s. 124-132. [Tuzhikov E.N. Experimental verification of the effectiveness of the control of gas and smoke protection units when introducing stationary sensors. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2018, 45 (4), pp. 124-132. Doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-124-132 (In Russ)]

Сведения об авторах:

Степанов Олег Игоревич, кандидат технических наук, преподаватель; e-mail: oleg01911@yandex.ru

Зайцева Екатерина Евгеньевна, заместитель начальника отдела по организации медицинской и психологической работы, охраны труда; e-mail: katya260387@mail.ru

Худякова Светлана Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и информатики; e-mail: hudyakovac@mail.ru

Information about authors:

Oleg I. Stepanov, Cand. Sc. (Technical), lecturer; e-mail: oleg01911@yandex.ru

Ekaterina E. Zaitseva, Deputy head of the department for the organization of medical and psychological work, labor protection; e-mail: katya260387@mail.ru

Svetlana A. Khudyakova, Cand. Sc. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Mathematics and Computer Science.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.02.2020.

Принята в печать 07.03.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.02.2020.

Accepted for publication 07.03.2020.

Для цитирования: А.Л.Большеротов. Структура экологической безопасности строительства - основа экологического паспорта территории. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (1):126-137. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-126-137

For citation: A.L. Bolsherotov. Environmental security structure forming the groundwork for a territorial environmental passport. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1):126-137. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-126-137

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-126-137

СТРУКТУРА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА – ОСНОВА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПАСПОРТА ТЕРРИТОРИИ

А.Л. Большеротов

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
230023, г. Гродно, ул. Ожешко, 22, Беларусь

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка экологического паспорта строительства на основе структуры комплексной экологической безопасности строительства. С каждым годом всё большее значение приобретают проблемы экологии. Для оценки и контроля экологической безопасности территории застройки и строительных объектов требуется экологический паспорт. **Метод.** Исследование основано на разработке обоснованной модели комплексной экологической безопасности строительства и методики расчёта её показателей в частности показателя «степени концентрации». Применена методика ранжирования факторов по значимости. **Результат.** Представлена структура экологического паспорта объекта, учитывающая комплексно весь спектр его прямого воздействия и загрязнения окружающей среды, а также опосредованное воздействие, энергоэффективность объекта и его автономность. Область применения экологического паспорта - весь жизненный цикл, от проектирования, до эксплуатации и ликвидации объекта. Экологический паспорт позволяет определить проблемные, с экологической точки зрения, территории, даёт рекомендации по разрешению проблем. Для каждой оцениваемой территории установлен порог экологической безопасности (для каждого объекта, каждой территории он свой, определяется своим составом факторов), определяется существующий уровень загрязнения окружающей среды, определяется экологический резерв территории и диапазон устойчивого состояния, то есть допустимый уровень отклонения показателей экологической безопасности, зависящий от временных факторов и объективной реальности функционирования инфраструктуры оцениваемой территории. Для проектируемых и строящихся объектов показатели экологического резерва и показатели техногенного давления объекта имеют принципиальное значение при принятии решений. **Вывод.** В статье дана смысловая оценка основных показателей экологического паспорта, приведена структура комплексной оценки экологической безопасности; представлены результаты исследований и предложена область применения экологического паспорта при оценке территорий, оценке объектов и проектировании.

Ключевые слова: экспертиза строительства, экологический паспорт территорий, экологическая безопасность, степень концентрации недвижимости, биотоп, экологический резерв, порог экологической безопасности

BUILDING AND ARCHITECTURE

ENVIRONMENTAL SECURITY STRUCTURE FORMING THE GROUNDWORK FOR A TERRITORIAL ENVIRONMENTAL PASSPORT

A. L. Bolsherotov

Janka Kupala State University of Grodno,
22 Ozheshko St., Grodno 230023, Belarus

Abstract. Aim. The aim of the study is to develop an environmental passport based on the structure of integrated environmental safety for construction projects. With each year that passes, environmental problems are coming increasingly to the fore. As part of mitigation efforts, an environmental passport is required to assess and control the environmental safety of construction areas and building sites. **Method.** The study is based on the development of a sound model of integrated environmental safety in construction projects and a methodology for calculating its indicators, in particular, the indicator of “degree of concentration”. The methodology of ranking the factors by importance is applied. **Results.** The structure of a building site's environmental passport is presented, taking the entire spectrum of its direct impact and environmental pollution into account, as well as the indirect impact, energy efficiency and autonomy of the site. The scope of the environmental passport comprises the entire building lifecycle, from design to operation and liquidation. An environmental passport enables the identification of problematic impacts on the geographical area from an environmental point of view, as well as giving recommendations for resolving problems. The threshold of environmental safety is set for each geographical area under assessment (i.e., for each building project and geographical area, it is determined by the composition of relevant factors) and the existing level of environmental pollution is determined along with the ecological reserve of the area and its steady state range, i.e., the acceptable level of deviation of environmental safety indicators, which depends on temporary factors and the objective reality of the functioning of the infrastructure of the evaluated territory. For the design and construction of building projects, indicators of environmental reserve and technogenic pressure of the facility are of fundamental importance when making decisions. **Conclusion.** The article presents a rational assessment of the main indicators of the environmental passport, providing the structure of a comprehensive assessment of environmental safety. The research results are presented and the scope of the environmental passport proposed in the assessment of geographical areas and evaluation of facilities and design.

Keywords: construction assessment, ecological passports, environmental safety, degree of concentration of real estate, biotope, ecological reserve, ecological safety threshold

Введение. Целью исследования является разработка экологического паспорта строительства на основе структуры комплексной экологической безопасности строительства.

Постановка задачи. Задача исследования – разработка обоснованной модели комплексной экологической безопасности строительства и методики расчёта её показателей в частности показателя «степени концентрации». До настоящего времени модели комплексной системы оценки экологической безопасности строительства не было создано в удовлетворительной разработке, достаточной для практического применения. Этой теме посвящены работы Гутенева В.В., Графкиной М.В., Слесарева М.Ю., Ройтмана В.М. и др. авторов.

В 2012-2017, 2019г.г. проводились исследования в г. Москве, Московской области и в г. Новокузнецке, Кемеровской области по разработке комплексной системы оценки экологической безопасности строительства. В результате была создана представленная ниже модель и на её основе создан экологический паспорт территорий и строительного объекта.

Экологический паспорт территории – это экологическая документация территории или населённого пункта, разделённого на выделенные для исследования площади застройки (с пе-

шеходной доступностью в каждой точке не более 1 километра или площадью исследований, ограниченной административными границами).

Экологическая ситуация, в местах проживания и работы, должна обеспечивать качество жизни и здоровье людей [1, 2]. Чтобы понять состояние экологической безопасности территории или отдельного объекта необходимо знать ряд основных показателей. Создание экологического паспорта это в первую очередь обоснование смысла его показателей.

Методы исследования. Рассмотрим основные показатели оценки экологической безопасности территорий и объектов строительства.

1. Степень концентрации недвижимости.

Данный показатель показывает уровень плотности застройки территории. Плотность застройки опосредованно отражает численность населения, количество паркующихся на территории автомобилей. В свою очередь с количеством автомобилей связан показатель обеспеченности территории парковочными местами. Количество автомобилей напрямую связано с уровнем загрязнения окружающей среды, т.к. автотранспорт даёт основную (более 90% [3]) долю загрязнения воздуха выхлопными газами и пылью, воды ливневыми стоками с дорог и почвы оседающими частицами выхлопных газов и пыли.

Показатель степени концентрации является расчётным. Расчёт производится по заданному критерию, на основе статистических данных детального обследования территории.

2. Экологический резерв территории.

Это второй равнозначный с показателем «степени концентрации» критерий оценки экологической безопасности территории [4] (рис.1.).

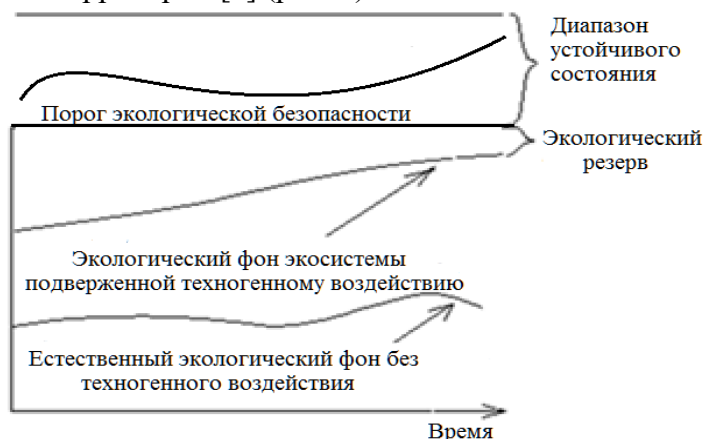


Рис.1. Иллюстрация уровней экологической безопасности экосистем

Fig. 1. Illustration of ecological safety levels of ecosystems

Экологический резерв показывает насколько загрязнение окружающей среды отличается от нормативного. За нормативный показатель принято значение в 1 ПДК (предельно допустимая концентрация) загрязнения любым видом загрязнения или суммарным, разовым, часовым, среднесуточным и т.д. загрязнением группы загрязняющих факторов. Если уровень загрязнения ($УЗ$) менее 1 (единицы), то экологический резерв территории ($ЭР_t$) есть и он равен разнице между 1 (единицей) и уровнем загрязнения ($УЗ$) – $ЭР_t = 1 - УЗ$.

Экологический резерв показывает возможности строительства на данной территории нового объекта с уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду данным объектом – $ТН_o$, который определяется объектным экологическим паспортом.

Если уровень техногенной нагрузки объекта меньше или равен экологическому резерву территории - $ТН_o \leq ЭР_t$, то строительство на данной территории данного конкретного объекта не нанесёт вреда здоровью населения, качеству его жизни и не нанесёт непоправимого вреда окружающей среде и живой природе.

Если уровень техногенной нагрузки объекта больше экологического резерва территории - $ТН_o > ЭР_t$, то строительство на данной территории данного конкретного объекта недопустимо. Так как в сумме уровень техногенной нагрузки территории превысит 1 ПДК и это негативно

отразится на качестве жизни и здоровье населения, на окружающей среде и живой природе. Однако, вместо строительства объекта с высокой техногенной нагрузкой возможна замена на проект объекта с меньшей техногенной нагрузкой.

В европейских странах давно практикуется система наилучших доступных технологий (НДТ), когда предлагаются на выбор несколько идентичных проектов, но с разной технологией и разной техногенной нагрузкой на окружающую среду. Например, строительство городской ТЭЦ возможно по нескольким технологическим вариантам проектов: ТЭЦ с топливом на угле, на мазуте или на газе. Каждый вариант отличается уровнем техногенной нагрузки. ТЭЦ на угле наиболее техногенна, а на газе наоборот – экологична. Система налогообложения регулирует выбор проекта строительства. Если приоритетным является экологическая безопасность, то стимулирование будет для строительства ТЭЦ на газе.

Второй вариант получения возможности строительства объекта с уровнем техногенной нагрузки больше экологического резерва территории, это проведение мероприятий по увеличению величины экологического резерва, если невозможно уменьшить уровень техногенной нагрузки объекта.

К таким мероприятиям может относиться изменение мощности объекта строительства, изменение его местоположения относительно розы ветров, замена оборудования, установка дополнительных технических систем очистки выбросов и стоков, изменение логистики и организационной схемы работы предприятия – перенесение наиболее техногенных технологических циклов на время суток или недели, когда общий экологический резерв территории увеличивается, например, на ночное время.

Здесь мы подошли к третьему экологическому показателю – диапазону устойчивого состояния искусственной экосистемы.

3. Диапазон устойчивого состояния искусственной экосистемы.

Экологический резерв территории не остаётся постоянным, а меняется в зависимости от времени суток, дня недели, времени года, от состояния погоды [5].

Пиковая техногенная нагрузка попадает на дневное время, на будние дни – это очевидно, так как это основное время работы производств и активности автотранспорта (рис. 2, 3, 4).

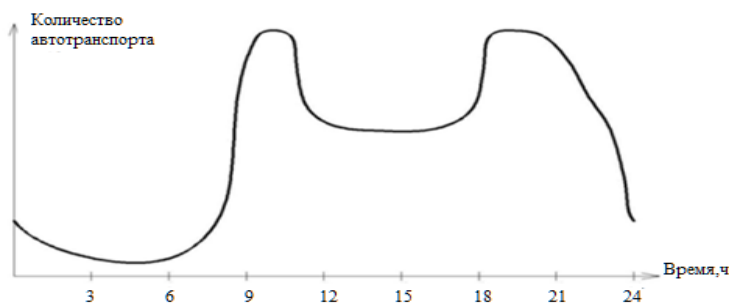


Рис. 2. Величина загрязнения атмосферы автотранспортом в течение суток
Fig. 2. The amount of air pollution by vehicles during the day

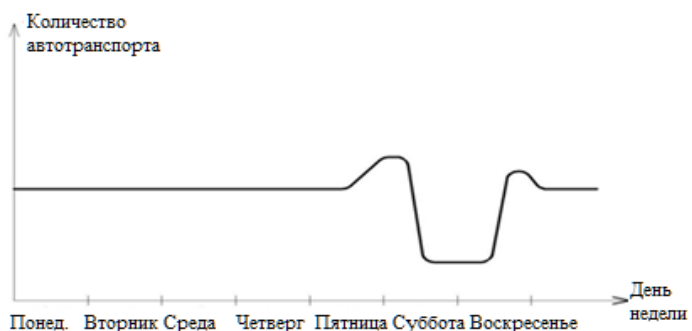


Рис. 3. Величина загрязнения атмосферы автотранспортом в течение недели
Fig. 3. The amount of air pollution during the week

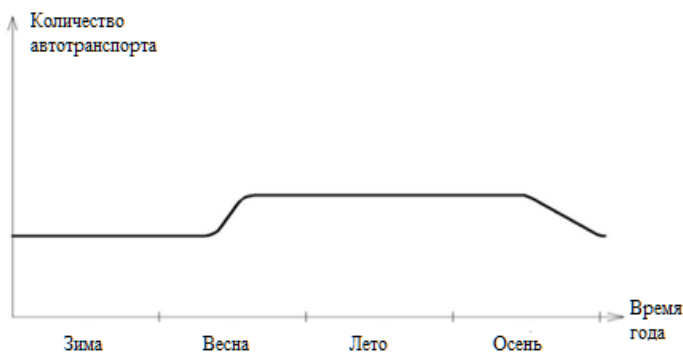


Рис. 4. Величина загрязнения атмосферы автотранспортом в течение года

Fig. 4. The amount of air pollution by vehicles during the year

Но так как более 90% загрязнения окружающей среды даёт в городах автотранспорт, можно предположить, что в пиковую транспортную нагрузку территории загрязнение окружающей среду будет максимальным, хоть и кратковременным.

Обсуждение результатов. Исследования показали, что максимальная техногенная нагрузка возникает в тёплое время года (в тёплое время хуже конвенция тёплых выхлопных газов), при повышенной влажности воздуха, в безветрие (плохое рассеивание газов), в пятницу (день массового выезда за город на выходные), в августе-сентябре (влажная погода), с 15-21 часа (час «пик»). Например, в 1983 году в августе, в пятницу замеры загрязнения воздуха выхлопными газами в районе метро «Красные Ворота» в г. Москве показали превышение нормы загазованности в 55 раз !!! Это в то время, когда машин на улицах Москвы было в десятки раз меньше. Какие сейчас показатели в то же время и в том же месте в пятницу в августе, можно только догадываться, но однозначно значительно выше прежних.

Рассчитывая техногенную нагрузку на окружающую среду, экологический резерв территории безусловно требуется учитывать колебания устойчивого состояния экосистемы населённых пунктов (искусственной экосистемы) [6, 7]. Превышение допустимого порога устойчивого состояния экосистемы может привести к необратимым последствиям в окружающей среде, в качестве жизни людей, в здоровье населения. Это станет заметно не сразу, но, когда негативные последствия станут явными, возможно, уже будет поздно применять профилактические меры. Пример тому – перегруженные транспортом дороги городов, забитые личными автомобилями дворы. И решить эту проблему крупных городов не удастся в течение ближайших 50-80 лет, пока не начнут сносить отслужившие свой век ныне построенные здания и не изменится концепция застройки территорий, учитывающая потребность людей в парковочных местах, как в спальнях местах, и лучше вне доступной визуализации – под землёй, на этажах зданий, на крышах, в отдельных многоярусных гаражах, украшающих своим внешним видом город, а не в виде пугающих построек без окон. Хотелось бы обратить особое внимание и на живую часть природы городов, как на индикатор экологического благополучия.

Поэтому оценка экологической безопасности при подготовке экологического паспорта территории или объекта строительства должна включать в себя не только явные, видимые экологические проблемы, но и скрытые, пока не видимые и не ощущаемые физические, но которые есть, и которые рано или поздно проявятся [8]. К таким оценочным категориям относится величина электромагнитного излучения, высокочастотное излучение бытовых приборов и промышленных установок [9], загазованность атмосферы [10], радиологическое загрязнение, загрязнение городских почв (урбозёмов) [11], как источника загрязнения подземных и надземных вод [12, 13], шумовой фон городов [14, 15], не беспокоящий, но активно влияющий на нервную систему и многое другое [16, 17].

Все эти негативные воздействия на окружающую среду и человека, загрязняющие факторы, опосредованно влияющие проблемы экологической безопасности на качество жизни и здоровье населения можно объединить в комплексную систему оценки экологической безопасности [18].

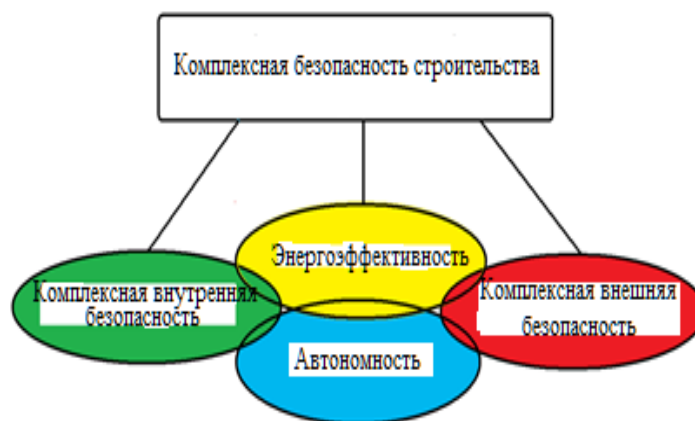


Рис.5. Комплексная безопасность строительства
Fig. 5. Integrated construction safety

На рис. 5 представлена схематично комплексная система экологической безопасности, которая ложится в основание разработки экологического паспорта территории и экологического паспорта строительного объекта. В систему оценки входят: внешняя экологическая безопасность (рис.6.), внутренняя экологическая безопасность (рис.7.), энергообеспечение и автономность (рис.8.).

При разработке экологического паспорта оценивается каждая позиция комплексной системы оценки. Методы и методология оценки формируются при постановке задачи исследования и могут значительно отличаться для объектов и территорий различного назначения, для различных условий [19, 20]. Для оценки территорий населённых пунктов при разработке экологического паспорта в первую очередь оценивается «степень концентрации». «Степень концентрации» первый экологический показатель для любой территории и любого объекта. Такой подход упрощает и удешевляет работы на стадии предпроектной проработки идеи строительства конкретного объекта и развития территории. В зависимости от концепции строительства или развития территории определяется состав и значимость исследуемых экологических факторов. Методика ранжирования факторов по значимости всегда индивидуальна и разрабатывается, как отдельный документ в составе экологического паспорта.

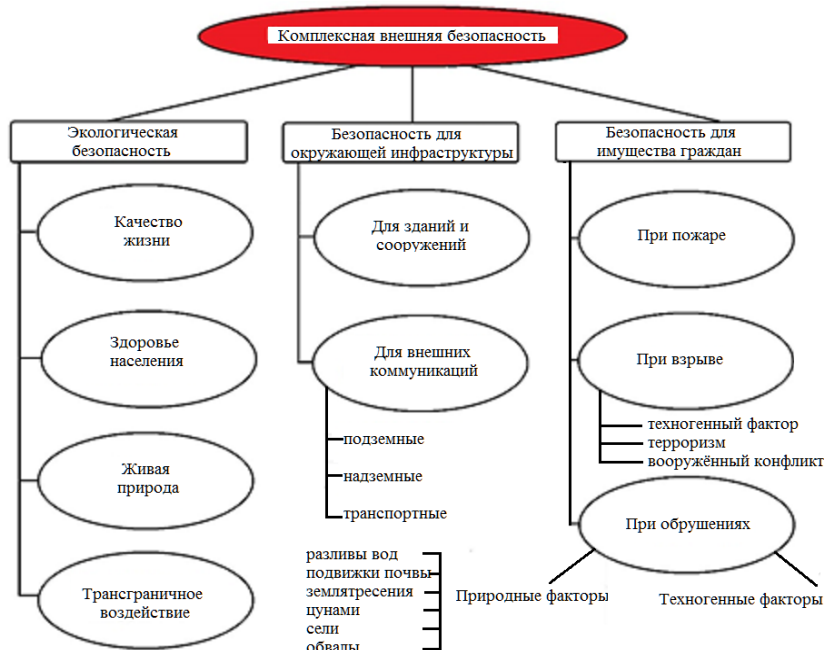


Рис.6. Комплексная внешняя безопасность
Fig. 6. Comprehensive External Security

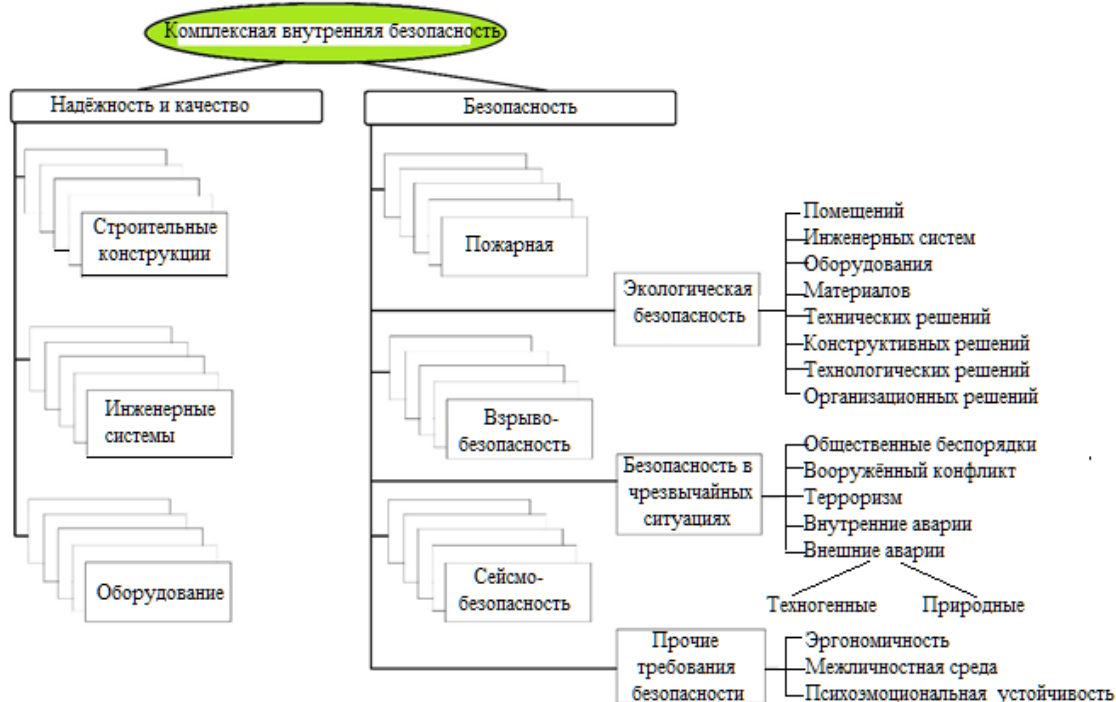


Рис.7. Комплексная внутренняя безопасность
Fig. 7. Integrated Internal Security



Рис.8. Энергоэффективность и автономность
Fig. 8. Energy Efficiency and Autonomy

Глубина проработки каждого фактора зависит от поставленной заказчиком задачи и места фактора в априорной диаграмме рангов проводимого исследования. Результатом разработки экологического паспорта территории или строительного объекта является фактическая констатирующая часть с установлением порога экологической безопасности (рис.1.) по каждому показателю и группе показателей, превышение которого приведёт к разбалансированию экосистемы населённого пункта, к снижению качества жизни и массовому нарушению здоровья жителей. Заключительный раздел экологического паспорта включает в себя рекомендации по устранению выявленных экологических проблем данной территории или объекта.

Экологический паспорт территории является объективной и достоверной основой для разработки раздела строительного проекта «Оценка воздействия на окружающую среду» (ОВОС). Для территорий населённых пунктов с разными показателями экологических факто-

ров устанавливается три категории экологической безопасности: зелёный – экологически безопасная территория с благоприятными условиями сохранения здоровья и качества жизни населения; жёлтый – территория неустойчивого экологического состояния; красный – экологически неблагоприятная территория.

Для естественных экосистем оценка экологической безопасности и разработка экологического паспорта начинается с определения основных биотопов крупнейшего животного, обитающей на оцениваемой территории. Качество жизни животных, сохранность видового разнообразия флоры и фауны экосистемы, обеспечение устойчивого гомеостаза цель разработки экологического паспорта естественной экосистемы.

Развитие экологического, рекреационного туризма, в частности, в приграничной зоне Беларуси в Гродненской и Брестской области требует документального подтверждения качественного уровня экологической безопасности территорий естественных экосистем. В таблице 1 представлен образец шаблона экологического паспорта территории, составленный на основе принципов комплексной оценки экологической безопасности. Оценка каждой позиции экологического паспорта проводится по специальной методике в баллах.

Общий суммарный балл оценки экологической безопасности, это экологический рейтинг территории. Такой рейтинговый подход к оценке экологической безопасности, как населённых пунктов, так и природных зон стимулирует их устойчивое развитие и инициативу властей по улучшению экологических показателей своих подведомственных территорий [21].

Таблица 1. Паспорт комплексной экологической безопасности строительства (объекта)

Наименование объекта строительства: _____

Table 1. Passport of integrated environmental safety of construction (facility)

Name of the construction object: _____

Уровень оценки безопасности Safety rating level		Оцениваемые факторы Assessed Factors		Фактический показатель безопасности, ед. изм. Actual safety indicator, u.ism	Уровень безопасности, в баллах Level security in points		
Внешняя безопасность External security	Экологическая безопасность Environmental Safety	Качество жизни The quality of life					
		Здоровье населения Public health					
		Живая природа Live nature					
		Трансграничное воздействие Transboundary impact					
	Безопасность для окружающей среды Environmental safety	Для зданий и сооружений For buildings and structures					
		Для внешних коммуникаций For external communications	Подземные Underground				
			Надземные Aboveground				
			Транспортные Transport				
	Прочие.... Others ...						
	Безопасность для имущества граждан Security for property of citizens	При пожаре In case of fire					
		При взрыве In case of explosion	Техногенный фактор Technogenic factor				
			Терроризм Terrorism				
			Вооружённый конфликт Armed conflict				
		При обрушениях When collapsing	Техногенные факторы Technogenic factor				
			Природные факторы Natural factors	Разливы рек River spills			
				Подвижки почвы Soil movements			
Землетрясения Earthquakes							
Цунами Tsunami							
Сели Sat down							
Обвалы Landslides							
Внутренняя безопасность Internal security	Надёжность и качество Reliability and quality	Строительные конструкции Building construction					
		Инженерные системы Engineering systems					
		Оборудование Equipment					
	Безопасность	Пожарная Fire department					

	Security	Взрывобезопасность Explosion proof				
		Экологическая безопасность Environmental Safety	Качество жизни The quality of life			
			Здоровье людей People's health			
			Помещений Premises			
			Инженерных систем Engineering systems			
			Оборудования Equipments			
			Материалов Of materials			
			Технических решений Technical solutions			
			Конструктивных решений Constructive solutions			
			Технологических решений Technological solutions			
			Организационных решений Organizational decisions			
		Безопасность в чрезвычайных ситуациях Security in emergency situations	Общественные беспорядки Public unrest			
			Вооружённый конфликт Armed conflict			
			Терроризм Terrorism			
			Внутренние аварии Internal accidents			
			Внешние аварии External accidents	Техногенные Technogenic		
				Природные Natural		
		Прочие требования безопасности Other safety requirements	Эргономичность Ergonomics			
			Межличностная среда Interpersonal environment			
			Психоэмоциональная устойчивость Psycho-emotional stability			
			Прочие Other			
Энергоэффе- ktivность Energy efficiency	Потребление тепла Heat consumption					
	Потребление электроэнергии Power consumption					
	Потребление воды Water consumption					
	Потребление воздуха Air consumption					
	Потребление прочих ресурсов Consumption of other resources					
Автоном- ность Autonomy	По потреблению According to consumption					
	По инженерно-техническим решениям For engineering solutions					
	По отходам For waste					
	Прочие показатели Other indicators					
Общий комплексный показатель безопасности строительства: General complex indicator of safety of construction:					___ баллов points	

Вывод: Экологический паспорт эталонной природной территории, разработанный на основе авторских методик, является необходимым документом естественной экосистемы, сертификатом, подтверждающим безусловное качество окружающей среды по всем критериям экологической безопасности. Экологический паспорт территории совместно с экологическим паспортом объекта строительства устанавливает уровень экологической безопасности и территории и объекта, отмечает зоны закрытые для производства строительных работ – защищённые территории. Экологический сертификат эталонной природной территории важный аргумент экологической, рекреационной эксплуатации природных зон на принципах устойчивого развития.

Библиографический список:

1. Экологическая доктрина Российской Федерации Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. N 1225-р – М.: Российская газета. №7958. – 10.09. 2002г. С.3.
2. Сушко В.А., Бухтиярова И.Н., Зубова О.Г. Экология как фактор формирования качества жизни: методология социологического анализа// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 2. С. 58-63.
3. Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие / Под общей ред. д.б.н. А.А.Минина. - М.: Изд-во «Пасва», 2001. – 192 с.
4. Жарницкий В.Я. Теория управления недвижимостью / В.Я. Жарницкий, Л.В. Большеротова – М.: БАРК-91. – 2015. – С. 198.

5. Жарницкий В.Я. Управление недвижимостью / В.Я Жарницкий, Л.В. Большеротова, Е.В. Андреев. – М.: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – 2016. – С.137.
6. Писаренко П.В., Самойлик М.С., Плаксиенко И.Л., Колесникова Л.А. Концептуальные основы обеспечения ресурсно-экологической безопасности в регионе// Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 137-142.
7. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания- интегральный критерий качества жизни// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 50-54.
8. Сокольская Е.В., Кочуров Б.И., Долгов Ю.А., Лобковский В.А. Многофакторная модель как основа для управления качеством окружающей среды урбанизированных территорий// Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 26-34.
9. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Кочуров Б.И. Техногенное загрязнение окружающей среды канцерогенными веществами// Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 42.
10. Трофименко Ю.В., Чинова В.С. Обоснование мероприятий по снижению риска здоровью от загрязнения воздуха взвешенными частицами размером менее десяти микрон (PM10) на улично-дорожной сети городов// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 48-51.
11. Горохова А.Г., Иванов А.И., Язынина Н.А., Ермолаев С.Е., Ферезанова М.В. Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий// Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 4. С. 100-105.
12. Ильина Х.В., Гаврилова Н.М., Бондаренко Е.А., Андрианова М.Ю., Чусов А.Н. Экспресс-методы изучения вод загрязненных пригородных водотоков // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8(76). С. 241–254.
13. Минченко Е.Е., Пахомова Н.А. Оценка состояния городских водных экосистем по гидробиологическим показателям// Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 48-55.
14. Гиясов Б.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Метод расчета шума при зеркально-рассеянном отражении звука // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1(77). С. 13–22.
15. Боголепов И.И., Лаптева Н.А. Шумовая карта городов и агломераций // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 6(16). С. 5-11.
16. Васенина И.В., Сушко В.А. Промышленная экология региона и качество жизни местного населения// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 66-71.
17. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Мулухов К.К., Вернигор В.В. Пылевое загрязнение при открытой разработке месторождений// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 6. С. 30-34.
18. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Шагидуллин А.Р., Валиев В.С., Морайш А. Методология оценки уровня территориального экологического риска для планового управления экологической безопасностью городской среды// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 10. С. 44-49.
19. Тикунов В.С., Черешня О.Ю. Индекс загрязнения и индекс напряженности экологической ситуации в регионах Российской Федерации// Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 34-38.
20. Большеротов А.Л., Большеротова Л.В. Существующие методы оценки загрязнения окружающей среды и воздействия на неё / А.Л. Большеротов, Л.В. Большеротова//Жилищное строительство. 2012. № 11. С. 37-41.
21. Яблоков А.В., Левченко В.Ф., Керженцев А.С. О концепции «управляемой эволюции» как альтернативе концепции «устойчивого развития» // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 4-8.

References:

1. Ekologicheskaya doktrina Rossiyskoy Federatsii Rasporyazheniye Pravitel'stva Ros-siyskoy Federatsii ot 31 avgusta 2002 g. N 1225-r – М.: Rossiyskaya gazeta. №7958. – 10.09. 2002g. S.3. [Environmental Doctrine of the Russian Federation Order of the Government of the Russian Federation of August 31, 2002, No. 1225-p. (In Russ.)]
2. Sushko V.A., Bukhtiyarova I.N., Zubova O.G. Ekologiya kak faktor formirovaniya kache-stva zhizni: metodologiya sotsiologicheskogo analiza// Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2018. Т. 22. № 2. S. 58-63. [Sushko V.A., Buchtiyarov I.N., Zubova O.G. Ecology as a factor of quality of life formation: methodology of sociological analysis //Ecology and industry of Russia. 2018. Т. 22. No. 2. pp. 58-63. (In Russ.)]
3. Ekologiya krupnogo goroda (na primere Moskvyy). Uchebnoye posobiye / Pod obshchey red. d.b.n. A.A.Minina. - М.: Izd-vo «Pas'va», 2001. 192 s. [Ecology of the large city (on the example of Moscow) / Under the general editorship of Doctor of Biological Science A.A. Minin. - М.: Pasva publishing house, 2001. 192 p. (In Russ.)]
4. Zharnitskiy V.YA. Teoriya upravleniya nedvizhimost'yu / V.YA. Zharnitskiy, L.V. Bol'she-rotova – М.: BARK-91. – 2015. – S. 198. [Zharnitskiy V.Ya. The Theory of Management of the Real Estate / V.Ya. Zharnitskiy, L.V. Bolsherotova – М.: BARK-91. 2015. P. 198. (In Russ.)]
5. Zharnitskiy V.YA. Upravleniye nedvizhimost'yu / V.YA. Zharnitskiy, L.V. Bol'sherotova, Ye.V. Andreyev. – М.: Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet - MSKHA im. K.A. Timiryazeva. – 2016. – S.137. [Zharnitskiy V.Ya. Management of the real estate / V. YaZharnitskiy, L.V. Bolsherotova, E.V. Andreyev. – М.: The Russian state agricultural university - MSHA of K.A. Timiryazev. 2016. pp.137. (In Russ.)]
6. Pisarenko P.V., Samoylik M.S., Plaksienko I.L., Kolesnikova L.A. Kontseptual'-nyye osnovy obespecheniya resursno-ekologicheskoy bezopasnosti v regione// Teoreti-cheskaya i prikladnaya ekologiya. 2019. № 2. S. 137-142. [Pisarenko P.V., Samoilik M.S., Plaksienko I.L., Kolesnikov L.A. Conceptual foundations for ensuring resource and environmental safety in the region //Theoretical and applied ecology. 2019. № 2. Page 137-142. (In Russ.)]

7. Kal'ner V.D. Ekologicheski oriyentirovannaya sreda obitaniya- integral'nyy kriteriy kachestva zhizni// *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. № 11. S. 50-54. [Kalner V.D. Ecologically Oriented Environment - Integral Criterion of Quality of Life//*Ecology and Industry of Russia*. 2019. T. 23. No. 11. pp. 50-54. (In Russ.)]
8. Sokol'skaya Ye.V., Kochurov B.I., Dolgov YU.A., Lobkovskiy V.A. Mnogofaktornaya mo-del' kak osnova dlya upravleniya kachestvom okruzhayushchey sredy urbanizirovannykh territoriy// *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018. № 2. S. 26-34. [Sokolskaya E.V., Kochurov B.I., Dolgov Yu.A., Lobkovsky V.A. Multi-factor model as the basis for environmental quality management of urbanized territories //*Theoretical and applied ecology*. 2018. № 2. pp. 26-34. (In Russ.)]
9. Galiulin R.V., Galiulina R.A., Kochurov B.I. Tekhnogennoye zagryazneniye okruzhayushchey sredy kantserogennymi veshchestvami// *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. № 2. S. 42. [Galiulin R.V., Galiulin R.A., Kochurov B.I. Technogenic environmental pollution with carcinogenic substances //*Theoretical and applied ecology*. 2015. № 2. pp. 42. (In Russ.)]
10. Trofimenko YU.V., Chizhova V.S. Obosnovaniye meropriyatiy po snizheniyu riska zdo-rov'yu ot zagryazneniya vozdukh vzhveshennymi chastitsami razmerom meneye desyati mik-rometrov (RM10) na ulichno-dorozhnoy seti gorodov// *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. № 7. S. 48-51. [Trofimenko Yu.V., Chizhova V.S. Justification of measures to reduce health risk from air pollution with suspended particles of less than ten micrometers (PM10) on the street-road network of cities//*Ecology and industry of Russia*. 2019. T. 23. No. 7. pp 48-51. (In Russ.)]
11. Gorokhova A.G., Ivanov A.I., YAzynina N.A., Yermolayev S.Ye., Ferezanova M.V. Soder-zhaniye rtuti v pochvakh i biologicheskikh ob"yektakh prirodnykh i tekhnogennykh territo-riy// *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2017. № 4. S. 100-105. [Gorokhova A.G., Ivanov A.I., Linguina N.A., Yermolayev S.E., Ferezanov M.V. Mercury content in soils and biological objects of natural and man-made territories//*Theoretical and applied ecology*. 2017. № 4. pp.100-105. (In Russ.)]
12. Il'ina KH.V., Gavrilova N.M., Bondarenko Ye.A., Andrianova M.YU., Chusov A.N. Eks-press-metody izucheniya vod zagryaznennykh prigorodnykh vodotokov // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2017. № 8(76). S. 241–254. [Ilina H.V., Gavrilova N.M., Bondarenko E.A., Andrianov M.Y., Chusov A.N. Express Methods of Studying the Waters of Contaminated Suburban Watercourses //*Engineering and Construction Journal*. 2017. № 8(76). pp. 241-254. (In Russ.)]
13. Minchonok Ye.Ye., Pakhomova N.A. Otsenka sostoyaniya gorodskikh vodnykh ekosistem po gidrobiologicheskimi pokazatelyam// *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2016. № 3. S. 48-55. [Minchenok E.E., Pakhomova N.A. Assessment of the state of urban aquatic ecosystems by hydrobiological indicators //*Theoretical and applied ecology*. 2016. № 3. pp. 48-55. (In Russ.)]
14. Giyasov B.I., Ledenev V.I., Matveyeva I.V. Metod rascheta shuma pri zerkal'no-rasseyannom otrazhenii zvuka // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2018. № 1(77). S. 13–22. [Gyasov B.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Method of calculation of noise at mirror-scattered reflection of sound //*Engineering and construction log*. 2018. № 1(77). pp. 13-22. (In Russ.)]
15. Bogolepov I.I., Lapteva N.A. Shumovaya karta gorodov i aglomeratsiy // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2010. № 6(16). S. 5-11. [Bogolepov I.I., Lapteva N.A. Noise map of cities and agglomerations //*Engineering and construction journal*. 2010. № 6(16). pp. 5-11. (In Russ.)]
16. Vasenina I.V., Sushko V.A. Promyshlennaya ekologiya regiona i kachestvo zhizni mest-nogo naseleniya// *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. T. 22. № 11. S. 66-71. [Vasenina I.V., Sushko V.A. Industrial ecology of the region and quality of life of the local population //*Ecology and industry of Russia*. 2018. T. 22. No. 11. pp. 66-71. (In Russ.)]
17. Golik V.I., Dmitrak YU.V., Mulukhov K.K., Vernigor V.V. Pylevoye zagryazneniye pri otkrytoy razrabotke mest-torozhdeniy// *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. T. 22. № 6. S. 30-34. [Golik V.I., Dmitry Yu.V., Mulukhov K.K., Vernigor V.V. Dust pollution during open field development //*Ecology and industry of Russia*. 2018. T. 22. No. 6. pp. 30-34. (In Russ.)]
18. Tunakova YU.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiyev V.S., Moraysh A. Metodologiya otsenki urovnya territoral'nogo ekologicheskogo riska dlya planovogo upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu gorodskoy sredy// *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. № 10. S. 44-49. [Tunakov Yu.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S., Moraysh A. Methodology of assessment of the level of territorial environmental risk for planned management of environmental safety of the urban environment //*Ecology and industry of Russia*. 2019. T. 23. No. 10. pp. 44-49. (In Russ.)]
19. Tikunov V.S., Chereshnya O.YU. Indeks zagryazneniya i indeks napryazhonosti ekologicheskoy situatsii v regionakh Rossiyskoy Federatsii// *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2017. № 3. S. 34-38. [Tikunov V.S., Chereshnya O.Y. Pollution index and environmental tension index in regions of the Russian Federation //*Theoretical and applied ecology*. 2017. № 3. pp. 34-38. (In Russ.)]
20. Bol'sherotov A.L., Bol'sherotova L.V. Sushchestvuyushchiye metody otsenki zagryazneniya okruzhayushchey sredy i vozdeystviya na neyo / A.L. Bol'sherotov, L.V. Bol'sherotova-va//*Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2012. № 11. S. 37-41. [Bolsherotov A.L., Bolsherotova L.V. Existing methods of assessment of environmental pollution and impact on it / A.L. Bolsherotov, L.V. Bolsherotova//*Housing construction*. 2012. № 11. pp. 37-41. (In Russ.)]
21. Yablokov A.V., Levchenko V.F., Kerzhentsev A.S. O kontseptsii "upravlyayemoy evolyutsii" kak al'ternative kontseptsii «ustoychivogo razvitiya» // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2017. № 2. S. 4-8. [Yablokov A.V.,

Levchenko V.F., Kerzhenov A.S. On the concept of "managed evolution" as an alternative to the concept of "sustainable development" //Theoretical and applied ecology. 2017. № 2. pp 4-8. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

Большеротов Аркадий Леонидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства; e-mail: bark1091@mail.ru

Information about the author:

Bolsherotov Arkadiy Leonidovich, Dr. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Prof., Department of construction production; e-mail: bark1091@mail.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.03.2020.

Принята в печать 21.03.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 09.03.2020.

Accepted for publication 21.03.2020.

Для цитирования: Е.А. Ефименко, М.Ю. Беккиев, Д.Р. Маилян, А.С. Чепурненко. Определение оптимального расположения опор в плите перекрытия промышленного здания с использованием стохастических методов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1):138-146. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-138-146

For citation: E.A. Efimenko, M.Yu. Bekkiev, D.R. Mayilyan, A.S. Chepurnenko. Determination of the optimal distribution of supports in the floor slabs of industrial buildings using stochastic methods. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1):138-146. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-138-146

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624. 04

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-138-146

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОР В ПЛИТЕ ПЕРЕКРЫТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Е.А. Ефименко¹, М.Ю. Беккиев², Д.Р. Маилян¹, А.С. Чепурненко¹

¹Донской государственный технический университет,
¹344002, г. Ростов -на-Дону, площадь Гагарина, 1, Россия,

²Высокогорный геофизический институт,
²360003, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение оптимального расположения опор в плите перекрытия промышленного здания **Метод.** Для определения оптимального расположения колонн использован метод Монте-Карло в сочетании с методом конечных элементов. Расчет производился на основе теории упругих тонких плит. **Результат.** В статье представлено решение задачи о нахождении оптимального расположения заданного количества точечных опор плиты перекрытия n из условия минимума целевой функции. В качестве целевой функции были выбраны максимальный прогиб плиты, потенциальная энергия деформации и расход арматуры. Подбор арматуры производился в соответствии с действующими нормами проектирования железобетонных конструкций. Вычисления выполнялись при помощи разработанной авторами программы в среде MATLAB. Приведены результаты при $n = 3, 4, 5$. Выполнена модификация алгоритма для большого числа опор n и представлено сравнение базового и модифицированного алгоритма при $n=25$. Показана возможность существенного уменьшения деформаций плиты при нерегулярном расположении опор по сравнению с регулярным. **Вывод.** Предложена методика нахождения рационального расположения точечных опор плиты перекрытия при заданном их количестве из условия минимума прогиба, потенциальной энергии деформации и расхода арматуры на основе метода Монте-Карло. Данная методика подходит для произвольных конфигураций плиты и произвольных нагрузок. Представлена модификация алгоритма, подходящая для большого числа опор. На тестовом примере показано, что по сравнению с регулярным шагом колонн максимальный прогиб можно снизить на 42%. В рассмотренных примерах положение всех опор заранее считалось неизвестным, однако разработанный алгоритм легко позволяет учесть и стационарные опоры, положение которых не меняется.

Ключевые слова: оптимизация, железобетонная плита, стохастические методы, расход арматуры, потенциальная энергия деформации

BUILDING AND ARCHITECTURE

DETERMINATION OF THE OPTIMAL DISTRIBUTION OF SUPPORTS IN THE FLOOR
SLABS OF INDUSTRIAL BUILDINGS USING STOCHASTIC METHODS

E.A. Efimenko¹, M.Yu Bekkiev², D.R. Mayilyan¹, A.S. Chepurnenko¹

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin pl., Rostov-on-Don 344000, Russia,

²High-Mountain Geophysical Institute,

²2 Lenin Ave., Nalchik 360003, Russia

Abstract. Aim. The purpose of the study is to determine the optimal location of supports used in the floor slab of an industrial building. **Method.** In order to determine the optimal arrangement of the columns, a Monte Carlo algorithm was used in combination with the finite element method. The calculation was carried out on the basis of the theory of elastic thin plates. **Results.** The article presents a solution to the problem of determining the optimal location of a given number of point-supports of a floor slab n from the condition of minimum objective function. For the objective function, the maximum deflection of the slab, the potential energy of deformation and the flow rate of reinforcement were selected as variables. The selection of reinforcement was carried out in accordance with current generally-accepted standards for the design of reinforced concrete structures. The calculations were performed using a program developed by the authors in the MATLAB computing environment. The results are given for $n = 3, 4, 5$. The algorithm, which has been modified for a large number of supports n , is presented alongside a comparison of the basic and modified algorithm with $n = 25$. The possibility of a significant reduction in plate deformations with an irregular arrangement of supports compared to a regular distribution is shown. **Conclusion.** A method is proposed for finding the rational locations of point supports for a floor slab for a given quantity from the condition of minimum deflection, potential strain energy and consumption of reinforcement materials based on the Monte Carlo method. This technique is suitable for arbitrary slab configurations and arbitrary loads. A modification of the algorithm is presented that is suitable for a large number of supports. The test example shows that the maximum deflection can be reduced by 42% when using an irregular support configuration compared to regular column spacing. In the considered examples, the position of all the supports was previously considered unknown, but the developed algorithm easily allows for stationary supports, whose position does not change.

Keywords: optimisation, reinforced concrete slab, stochastic methods, consumption of reinforcement resources, potential strain energy

Введение. Проблема оптимизации железобетонных конструкций, в том числе плит перекрытий, посвящено большое количество публикаций, включая [1-20]. В качестве способов оптимизации выступают, как правило, варьирование характеристик бетона [3-6], рациональное армирование [7-16], варьирование толщины плиты [17] и рациональная расстановка ребер жесткости [18-20].

Еще одним эффективным способом оптимизации является рациональная расстановка опор. Однако в литературе такой метод в основном реализуется только для балок [1-2].

Постановка задачи. Рассмотрим следующую задачу. Пусть имеется железобетонная плита произвольной конфигурации с заданной толщиной h , характеристиками бетона E_b, R_b, ν , характеристиками арматуры R_s, R_{sc} . Также считаются известными расстояния a_x, a'_x, a_y, a'_y , определяющие привязку центров тяжести арматуры к верхней и нижней поверхности.

Плита опирается на n точечных опор (колонн), число которых считается заданным, а расположение может быть произвольным. Помимо этих колонн могут быть стационарные опоры, положение которых не меняется. На плиту действует произвольная, но заранее известная

нагрузка. Требуется определить рациональное расположение колонн, при котором целевая функция принимает минимальное значение.

В качестве целевой функции будем рассматривать следующие величины:

1. Максимальное значение прогиба плиты w_{max} , мм;
2. Величина потенциальной энергии деформации W , кДж;
3. Расход арматуры m_s , т.

Выбор в качестве целевой функции потенциальной энергии деформации (ПЭД) объясняется тем, что она является интегральной мерой, определяющей уровень напряженно-деформированного состояния [1]. Чем меньше величина W , тем лучше система сопротивляется внешним воздействиям [2].

Методы исследования. При использовании в качестве целевых значений величин w_{max} и W будем считать что жесткость плиты не зависит от координат x и y . Расчет будет производиться на основе теории упругих тонких плит.

Для определения оптимального расположения колонн мы будем использовать метод Монте-Карло в сочетании с методом конечных элементов.

На первом этапе плита в зависимости от ее геометрии разбивается сеткой треугольных или прямоугольных конечных элементов. Вычисляется матрица жесткости конструкции и вектор нагрузок с учетом стационарных опор, но без учета колонн, положение которых может варьироваться.

Далее при помощи генератора случайных чисел генерируется n равномерно распределенных случайных значений, определяющих номера узлов, в которых устанавливаются колонны. Выполняется проверка на отсутствие повторяющихся номеров узлов, а также контролируется, чтобы минимальное расстояние между опорами было больше заданной величины. В противном случае генерация случайных чисел производится повторно.

Затем на матрицу жесткости и вектор нагрузки накладываются граничные условия с учетом выбранного расположения колонн, выполняется решение системы уравнений МКЭ:

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости, $\{U\}$ – вектор узловых перемещений, $\{P\}$ – вектор нагрузок. Потенциальная энергия деформации определяется по формуле:

$$W = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\}. \quad (2)$$

Подбор арматуры в плите производится на основе СП 63.13330.2018 из условий:

$$\begin{aligned} (M_{x,ult} - M_x)(M_{y,ult} - M_y) - M_{xy}^2 &\geq 0; \\ M_{x,ult} &\geq M_x; \\ M_{y,ult} &\geq M_y; \\ M_{xy,ult} &\geq M_{xy}, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_x, M_y, M_{xy} – изгибающие и крутящие моменты, действующие на плоский выделенный элемент, $M_{x,ult}, M_{y,ult}, M_{xy,ult}$ – предельные изгибающие и крутящие моменты, воспринимаемые плоским выделенным элементом.

Величина целевой функции f сравнивается со значением f_0 , в качестве которого изначально принимается очень большое число. Если $f < f_0$, то величине f_0 присваивается значение f .

Расчет со случайным расположением колонн повторяется большое число раз (нами число испытаний k принималось равным 10^6 и более). Количество возможных вариантов расположения опор зависит от густоты конечно-элементной сетки и резко возрастает с увеличением n . Поэтому полученные в результате работы программы варианты расположения скорее будут рациональными, но не самыми оптимальными.

Обсуждение результатов. При помощи описанного алгоритма была проведена серия численных экспериментов. Рассматривалась квадратная плита размерами 10x10 м, толщиной

$h = 20$ см, бетон В30, арматура А400, под действием равномерно распределенной по площади нагрузки $q = 20$ кПа.

Вычисления производились в пакете MATLAB с использованием разработанной авторами программы.

На рис. 1 представлено полученное нами расположение трех опор при выборе в качестве целевой функции максимального прогиба w_{max} , потенциальной энергии деформации W и расхода арматуры m_s в случае разбиения плиты на треугольные КЭ.

Узлы, в которых расположены опоры, отмечены номерами. Величины $\{w_{max}, W, m_s\}$ составили для первого варианта $\{31.9$ мм, 11.79 кДж, 1.45 т $\}$, $\{50.9$ мм, 9.53 кДж, 1.23 т $\}$ для второго и $\{40.3$ мм, 9.73 кДж, 1.25 т $\}$ для третьего варианта.

Таким образом, при выборе в качестве целевой функции потенциальной энергии деформаций был обеспечен и минимум расхода арматуры, но третий вариант по сравнению со вторым является более оптимальным по величине прогиба.

Результаты, полученные при $n = 3$ с использованием прямоугольных КЭ, приведены на рис. 2. Величины $\{w_{max}, W, m_s\}$ при выборе в качестве целевой функции прогиба составили $\{35.5$ мм, 13.4 кДж, 1.66 т $\}$.

При выборе в качестве минимизируемой величины расхода арматуры или ПЭД получен одинаковый результат: $\{49.5$ мм, 9.86 кДж, 1.26 т $\}$.

Из рис. 2 видно, что варианты расположения опор при использовании двух указанных критериев оказались симметричными относительно центра плиты.

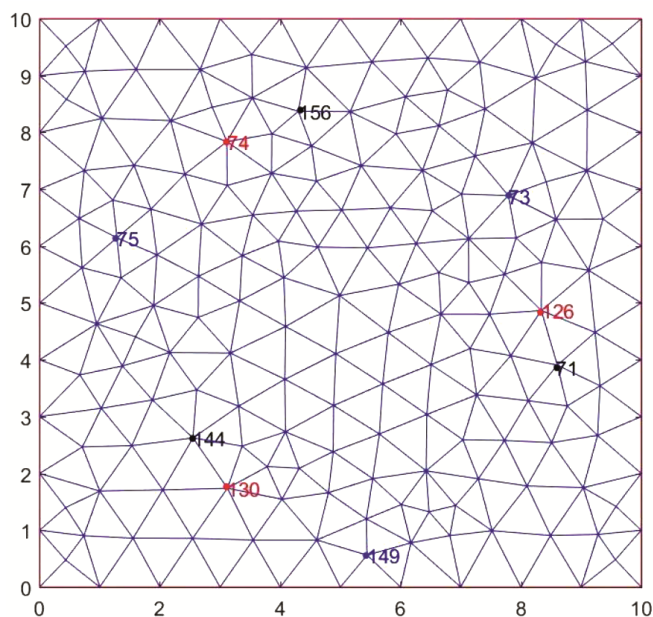


Рис.1.Оптимальное расположение трех опор при использовании треугольных конечных элементов

Fig. 1. The optimal arrangement of the three supports when using triangular finite elements

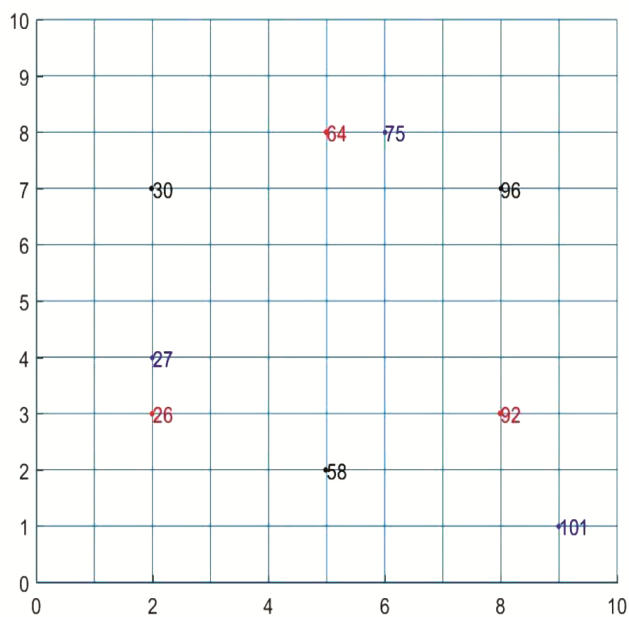


Рис.2.Оптимальное расположение трех опор при использовании прямоугольных конечных элементов

Fig. 2. The optimal arrangement of the three supports when using rectangular finite elements

Синие узлы – из условия минимума прогиба, красные узлы – из условия минимума ПЭД, черные узлы – из условия минимума расхода арматуры.

Разница результатов при использовании треугольных и прямоугольных КЭ связана с различной густотой сетки. На рис. 3 показаны результаты, полученные с использованием прямоугольных КЭ при $n = 4$. Значения целевых функций w_{max}, W, m_s для представленных вариантов приведены в табл. 1.

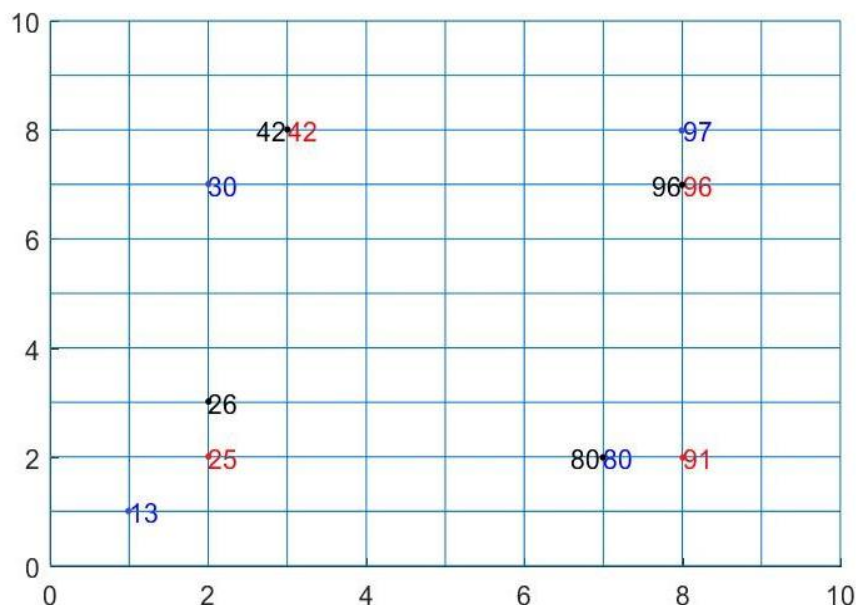


Рис.3. Оптимальное расположение четырех опор: синие узлы – из условия минимума прогиба, красные узлы – из условия минимума ПЭД, черные узлы – из условия минимума расхода арматуры

Fig. 3. The optimal location of the four supports: blue nodes - from the condition of minimum deflection, red nodes - from the condition of minimum SEM, black nodes - from the condition of minimum consumption of reinforcement

Таблица 1. Значения целевых функций для оптимальных вариантов расположения колонн при $n = 4$

Table 1. The values of the objective functions for the optimal options for the arrangement of columns with $n = 4$

Из минимума прогиба From minimum deflection			Из минимума ПЭД From minimum PEM			Из минимума расхода арматуры From minimum consumption of reinforcement		
w_{max} , мм	W , кДж	m_s , т	w_{max} , мм	W , кДж	m_s , т	w_{max} , мм	W , кДж	m_s , т
11.3	4.72	0.908	14.3	3.75	0.794	15.8	3.76	0.729

Авторами была сделана попытка внести корректировку в вариант, обеспечивающий минимум потенциальной энергии деформации.

Положение двух колонн в узлах 25 и 91 было оставлено без изменений, а колонны в узлах 96 и 42 были смещены в точки с координатами (8,8) и (2,8) соответственно. Данный вариант оказался менее оптимальным с точки зрения расхода арматуры и потенциальной энергии деформации, но более оптимальным по прогибу. Величины $\{w_{max}, W, m_s\}$ составили $\{13 \text{ мм}, 4.24 \text{ кДж}, 0.816 \text{ т}\}$.

Из симметрии задачи при $n = 4$ следует, что оптимальное расположение колонн должно быть симметричным относительно центра плиты, однако в представленных на рис. 3 вариантах симметрия не наблюдается из-за ограничения на расположение опор (колонны могут располагаться только в узлах конечно-элементной сетки).

При $n = 5$ с использованием прямоугольных КЭ было найдено расположение опор, удовлетворяющее одновременно минимуму перемещений, потенциальной энергии деформации и расхода арматуры (рис. 4). Величины $\{w_{max}, W, m_s\}$ составили $\{5.48 \text{ мм}, 2.13 \text{ кДж}, 0.551 \text{ т}\}$. Отметим, что характеристики бетона и арматуры, величина нагрузки, толщина плиты не влияют на оптимальное расположение колонн.

Кроме того, относительное расположение колонн не зависит от размеров плиты, а зависит только от соотношения ее сторон. Перейдем далее к большому числу опор n .

На рис. 5 представлено расположение 25 колонн, полученное на основе описанного выше алгоритма в результате 10^6 испытаний для плиты размерами 24x24 м при выборе в качестве целевой функции прогиба. Максимальный прогиб при $E_b = 3 \cdot 10^4$ МПа, $q = 50$ кПа, $h = 20$ см составил 58.4 мм. Для той же плиты при равномерном шаге колонн 6 м $w_{max} = 43.6$ мм. Таким образом, при таком количестве колонн предложенный алгоритм оказался неэффективным.

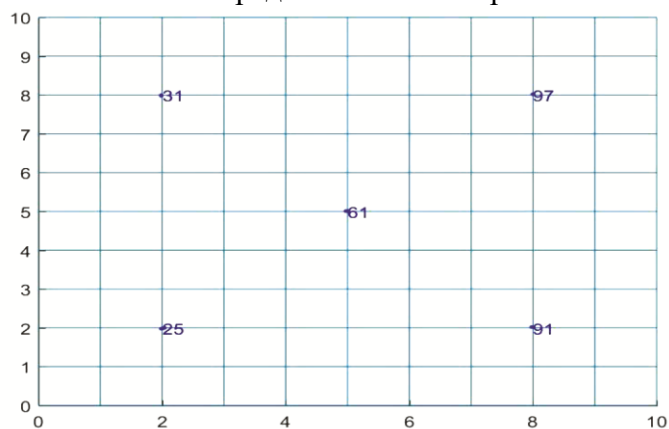


Рис.4. Оптимальное расположение пяти опор
Fig. 4. The optimal location of the five pillars

Была выполнена модификация данного алгоритма, заключающаяся в следующем. Начальное расположение колонн задается регулярным с заданным шагом. Каждый пролет разбивается m конечных элементов (нами принималось $m = 6$).

Затем для каждой колонны генерируется 2 случайных значения, определяющих их смещение относительно начального положения по x и y .

На величину смещения накладывается ограничение, чтобы оно не превышало по модулю $\left(\frac{m}{2} - 1\right) \cdot \Delta$, где Δ – размер конечного элемента по x или y , и было кратно размеру КЭ.

Расчет так же выполняется 10^6 раз и выбирается наиболее оптимальный вариант. Результат поиска оптимального варианта из условия минимума прогиба приведен на рис. 6. Для представленного на рис. 6 расположения опор максимальный прогиб составил 25.4 мм, что по сравнению с результатом при регулярном шаге колонн ниже на 42%.

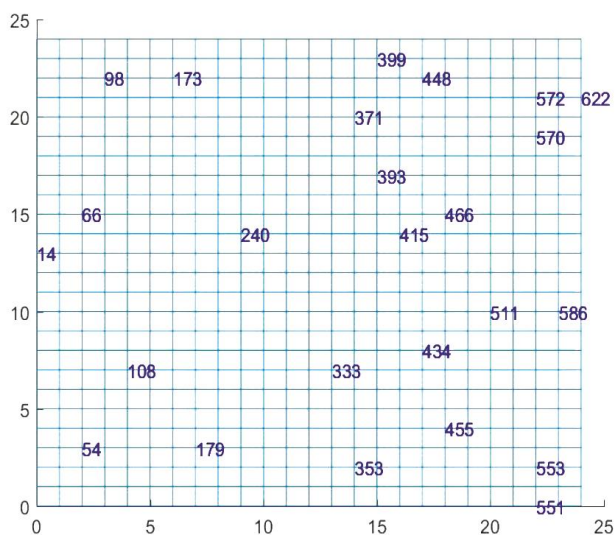


Рис.5. Результат поиска оптимального варианта с использованием базового алгоритма
Fig. 5. The search result for the best option using the basic algorithm

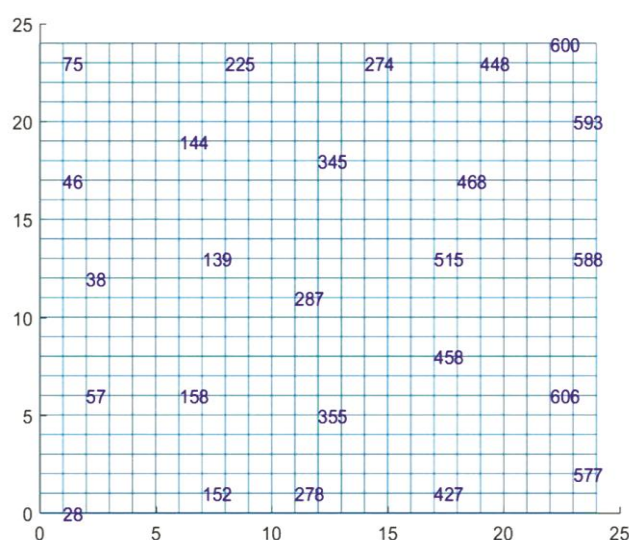


Рис.6. Результат поиска оптимального варианта с использованием модифицированного алгоритма
Fig. 6. The search result for the best option using a modified algorithm

Вывод. Предложена методика нахождения рационального расположения точечных опор плиты перекрытия при заданном их количестве из условия минимума прогиба, потенциальной энергии деформации и расхода арматуры на основе метода Монте-Карло. Данная методика подходит для произвольных конфигураций плиты и произвольных нагрузок.

Представлена модификация алгоритма, подходящая для большого числа опор.

На тестовом примере показано, что по сравнению с регулярным шагом колонн максимальный прогиб можно снизить на 42%.

В рассмотренных примерах положение всех опор заранее считалось неизвестным, однако разработанный алгоритм легко позволяет учесть и стационарные опоры, положение которых не меняется.

Библиографический список:

1. Васильков, Г.В. Эволюционные задачи строительной механики: синергетическая парадигма / Г.В. Васильков. – Ростов н/Д: ИнфоСервис, 2003. – 179 с.
2. Васильков, Г.В. Теория адаптивной эволюции механических систем / Г.В. Васильков. – Ростов н/Д: Терра-Принт, 2007. – 248 с.
3. Andreev, V.I. Way of optimization of stress state of elements of concrete structures / V.I. Andreev, E.V. Barmentkova, I.A. Potekhin // *Procedia Engineering*. 2016. – Vol. 153. – Pp. 37-44.
4. Yazyev, S. Task for a Prestressed Reinforced Concrete Cylinder with External Reinforcement and Cylinder Optimization by Varying the Modulus of Elasticity / S. Yazyev, M. Bekkiev, E. Peresypkin, M. Turko // *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. – Springer, Cham, 2017. – Pp. 869-876.
5. Andreev, V. I. About one way of optimization of the thick-walled shells / V.I. Andreev // *Applied mechanics and materials*. – Trans Tech Publications, 2012. – Vol. 166. – Pp. 354-358.
6. Andreev, V. I. Optimization of thick-walled shells based on solutions of inverse problems of the elastic theory for inhomogeneous bodies / V.I. Andreev // *Computer Aided Optimum Design in Engineering*. – 2012. – Pp. 189-202.
7. Серпик, И. Н. Оптимизация железобетонных конструкций на основе эволюционного поиска: монография / И.Н. Серпик [и др.] – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2018. – 200 с.
8. Серпик И. Н. Оптимизация железобетонных плит с использованием генетического алгоритма / И. Н. Серпик, К. В. Муймаров, С. Н. Швачко // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2015. – №. 1. – С. 30-36.
9. Тамразян, А. Г. Оптимизация параметров железобетонных пластин при разных краевых условиях / А. Г. Тамразян // *Известия вузов. Строительство и архитектура*, 1986. – № 2. – С. 46-49.
10. Ahmadi-Nedushan, F. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using neural dynamics model / F. Ahmadi-Nedushan, A. Hojjatli // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2005. – Vol. 18. – No. 1. – Pp. 65-72.
11. Тамразян, А. Г. Структура целевой функции при оптимизации железобетонных плит с учетом конструкционной безопасности / А.Г. Тамразян, Е.А. Филимонова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – №. 9. – С. 14-15.
12. Тамразян, А. Г. Оптимальное проектирование железобетонных плит перекрытий по критерию минимальной стоимости / А.Г. Тамразян, Е.А. Филимонова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2016. – №. 7. – С. 35-40.
13. Тамразян, А. Г. Оптимизация железобетонной плиты перекрытия по критерию минимальной стоимости с учетом анализа риска / А.Г. Тамразян, Е.А. Филимонова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – №. 9. – С. 19-22.
14. Тамразян, А. Г. Критерии формирования комплексной целевой функции железобетонной плиты с учетом анализа риска / А.Г. Тамразян, Е.А. Филимонова // *Вестник МГСУ*. – 2013. – №. 10. – С. 68-74.
15. Филимонова, Е. А. Методика поиска оптимальных параметров железобетонных конструкций с учетом риска отказа / Е.А. Филимонова // *Вестник МГСУ*. – 2012. – №. 10. – С. 128-133.
16. Романова, Т. П. Несущая способность и оптимизация трехслойных железобетонных кольцевых пластин, опертых по внутреннему контуру / Т.П. Романова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – №. 3. – С. 114-132.
17. Зураев, Т. Г. Метод определения параметров равнопрочной консольной пластины переменной толщины при заданных допускаемых напряжениях, нагрузках и конструктивных ограничениях / Т.Г. Зураев // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1974. – №. 1. – С. 60-65.
18. Яров, В. А. Проектирование круглых монолитных плит перекрытий рациональной структуры с использованием топологической и параметрической оптимизации / В. А. Яров, Е. В. Прасоленко // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2011. – №. 3. – С. 89-102.
19. Яров, В. А. Монолитные ребристые перекрытия круглых в плане высотных зданий / В. А. Яров, Е. В. Прасоленко // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2010. – №. 3. – С. 117-126.

20. Абовский, Н. П. Инженерные аспекты оптимизации конструкций / Н.П. Абовский [и др.] // Проблемы оптимального проектирования сооружения: доклады I Всероссийской конференции. Новосибирск: НГАСУ. – 2008. – С. 30-39.

References:

1. G.V. Vasil'kov. Evolyutsionnyye zadachi stroitel'noy mekhaniki: sinergeticheskaya paradigm [Evolutionary tasks of structural mechanics: a synergetic paradigm]. Rostov-on-Don: InfoServis, 2003. 179 p.(In Russ.)]
2. G.V. Vasil'kov. Teoriya adaptivnoy evolyutsii mekhanicheskikh system [Theory of adaptive evolution of mechanical systems]. Rostov-on-Don: Terra-Print, 2007. 248 p.(In Russ.)]
3. V.I. Andreev, E.V. Barmenkova, I.A. Potekhin. Way of optimization of stress state of elements of concrete structures. Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. pp. 37-44. (In Russ.)]
4. S. Yazyev, M. Bekkiev, E. Peresypkin, M. Turko. Task for a Prestressed Reinforced Concrete Cylinder with External Reinforcement and Cylinder Optimization by Varying the Modulus of Elasticity. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. Springer, Cham, 2017. pp. 869-876. In Russ.)]
5. V. I. Andreev. About one way of optimization of the thick-walled shells. Applied mechanics and materials. Trans Tech Publications, 2012. Vol. 166. pp. 354-358 (In Russ.)]
6. V.I. Andreev. Optimization of thick-walled shells based on solutions of inverse problems of the elastic theory for inhomogeneous bodies. Computer Aided Optimum Design in Engineering. 2012. pp. 189-202. (In Russ.)]
7. I.N. Serpik. Optimization of reinforced concrete structures based on evolutionary search: monograph. Bryansk: Publishing House of BSTU, 2018. 200 p.(In Russ.)]
8. N. Serpik, K. V. Muymarov, S. N. Shvachko. Optimizatsiya zhelezobetonnykh plit s ispol'zovaniyem geneticheskogo algoritma [Optimization of reinforced concrete slabs using the genetic algorithm]. Structural mechanics and calculation of structures. 2015. No. 1. pp. 30-36. (In Russ.)]
9. G. Tamrazyan. Optimization of parameters of reinforced concrete plates under different boundary conditions [Optimizatsiya parametrov zhelezobetonnykh plastin pri raznykh krayevykh usloviyakh]. News of universities. Construction and architecture, 1986. No. 2. pp. 46-49. (In Russ.)]
10. F. Ahmadi-Nedushan, A. Hojjatli. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using neural dynamics model. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005. Vol. 18. No. 1. pp. 65-72. (In Russ.)]
11. A.G. Tamrazyan, E.A. Filimonova. Struktura tselevoy funktsii pri optimizatsii zhelezobetonnykh plit s uchetom konstruksionnoy bezopasnosti [The structure of the objective function in the optimization of reinforced concrete slabs taking into account structural safety]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2013. No. 9. Pp. 14-15.
12. A.G. Tamrazyan, E.A. Filimonova. Optimal'noye proyektirovaniye zhelezobetonnykh plit perekrytiy po kriteriyu minimal'noy stoimosti [Optimal design of reinforced concrete floor slabs by the criterion of minimum cost]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2016. No. 7. pp. 35-40. (In Russ.)]
13. A.G. Tamrazyan, E.A. Filimonova. Optimizatsiya zhelezobetonnoy plity perekrytiya po kriteriyu minimal'noy stoimosti s uchetom analiza riska [Optimization of reinforced concrete floor slabs according to the criterion of minimum cost, taking into account risk analysis]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2014. No. 9. pp. 19-22. (In Russ.)]
14. A.G. Tamrazyan, E.A. Filimonova. Kriterii formirovaniya kompleksnoy tselevoy funktsii zhelezobetonnoy plity s uchetom analiza riska [Criteria for the formation of a complex objective function of a reinforced concrete slab taking into account risk analysis]. Vestnik MGSU. 2013. No. 10. pp. 68-74. (In Russ.)]
15. E.A. Filimonova. Metodika poiska optimal'nykh parametrov zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom riska ot-kaza [Methods of searching for optimal parameters of reinforced concrete structures taking into account the risk of failure]. Vestnik MGSU. 2012. No. 10. pp. 128-133.(In Russ.)]
16. T.P. Romanova. Nesushchaya sposobnost' i optimizatsiya trekhslonnykh zhelezobetonnykh kol'tsevykh plastin, opertykh po vnutrennemu konturu [Bearing capacity and optimization of three-layer reinforced concrete ring plates supported on the inner contour]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2015. No. 3. pp. 114-132. (In Russ.)]
17. T.G. Zurayev. Metod opredeleniya parametrov ravnoprochnoy konsol'noy plastiny peremennoy tolshchiny pri zadannykh dopuskayemykh napryazheniyakh, nagruzkakh i konstruktivnykh ogranicheniyakh [The method of determining the parameters of an equal-strength cantilever plate of variable thickness at specified permissible stresses, loads and design constraints]. Uchenyye zapiski TSAGI. 1974. No. 1. pp. 60-65.(In Russ.)]
18. V. A. Yarov, Ye. V. Prasolenko. Proyektirovaniye kruglykh monolitnykh plit perekrytiy ratsional'noy struktury s ispol'zovaniyem topologicheskoy i parametricheskoy optimizatsii [Designing round monolithic floor slabs of rational structure using topological and parametric optimization]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2011. No. 3. pp. 89-102. (In Russ.)]
19. V. A. Yarov, Ye. V. Prasolenko. Monolitnyye rebristyye perekrytiya kruglykh v plane vysotnykh zdaniy [Monolithic ribbed ceilings round in terms of high-rise buildings]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2010. No. 3. pp. 117-126. (In Russ.)]
20. N.P. Abovskiy et al. Inzhenernyye aspekty optimizatsii konstruksiy [Engineering aspects of structural optimization]. Problemy optimal'nogo proyektirovaniya sooruzheniya: doklady I Vserossiyskoy konferentsii. Novosibirsk: NGASU. 2008. pp. 30-39. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Ефименко Екатерина Андреевна, ассистент, кафедра железобетонных и каменных конструкций; e-mail: ps62@yandex.ru

Беккиев Мухтар Юсубович, доктор технических наук, профессор, директор института; e-mail: vgikbr@yandex.ru

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru Чепурненко Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; e-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Information about the authors:

Ekaterina A. Efimenko, Assistant, Department of reinforced concrete and stone structures; e-mail: ps62@yandex.ru

Mukhtar Yu. Bekkiev, Dr. Sci., (Technical), Prof., Institute Director; e-mail: vgikbr@yandex.ru

Dmitry R. Mayilyan, Dr. Sc. (Technical), Prof., Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru

Anton S. Chepurnenko, Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department Strength of Materials; e-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.12.2019.

Принята в печать 28.12.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.12.2019.

Accepted for publication 28.12.2019.

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.А. Синицын, Н.Н. Монаркин, А.Г. Гудков. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1):147-155 DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.A. Sinitsyn, N.N. Monarkin, A.G. Gudkov. Features of mounted ventilated facade heat control systems in construction projects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 147-155. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691:620.19

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.А. Синицын, Н.Н. Монаркин, А.Г. Гудков

*Вологодский государственный университет,
160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия*

Резюме. Цель. Тепловизионная диагностика зданий и сооружений является неотъемлемой частью энергетического обследования. Она позволяет оценивать теплозащитные свойства ограждающих конструкций объектов капитального строительства, контролировать функциональное и эксплуатационное состояние инженерных систем, идентифицировать скрытые (невидимые, неявные) и явные (видимые) дефекты в них. Целью работы является анализ некоторых особенностей и результатов теплового контроля несветопрозрачной навесной вентилируемой фасадной системы и светопрозрачных ограждающих конструкций в виде оконных систем объекта капитального строительства. **Метод.** Тепловой (тепловизионного) контроль в решении вопросов энергоресурсосбережения. Выделена особая важность теплового контроля светопрозрачных фасадных систем и несветопрозрачных навесных вентилируемых фасадов объектов капитального строительства различного функционального и эксплуатационного назначения. **Результат.** Представлены подробный алгоритм комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций строительных объектов различного назначения по анализу термограмм, методики теплового контроля объектов капитального строительства, инженерных систем, строительных материалов и готовых изделий, а также технология натурного тепловизионного обследования светопрозрачных ограждающих конструкций. Представлены и проанализированы полученные термограммы. **Вывод.** Актуализированы современные проблемы энергоэффективности и энергоресурсосбережения в строительной и энергетической отраслях производства. Предложенный графо-аналитический алгоритм комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм является максимально полным среди известных аналогов и прототипов.

Ключевые слова: тепловой контроль, тепловизионная диагностика, тепловизор, термограмма, тепловое изображение, навесной вентилируемый фасад, светопрозрачная и несветопрозрачная ограждающая конструкция, объекты капитального строительства

BUILDING AND ARCHITECTURE

FEATURES OF MOUNTED VENTILATED FACADE HEAT CONTROL SYSTEMS IN
CONSTRUCTION PROJECTS

D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.A. Sinitsyn, N.N. Monarkin, A.G. Gudkov

Vologda State University,
15 Lenin Str., Vologda 160000, Russia

Abstract. Aim. An integral part of an energy audit of buildings and structures consists in thermal imaging diagnostics. This permits an evaluation of the heat-shielding properties of the enclosing structures of buildings in order to control the functional and operational status of engineering systems, as well as to identify implicit (invisible) and explicit (visible) defects in them. The aim of the work is to analyse some features and results of thermal control of an opaque hinged ventilated facade system and translucent enclosing structures in the form of window systems of a capital construction project. **Method.** Thermal imaging was used as a control for resolving issues of energy and resource conservation. The special importance of thermal control of translucent facade systems and non-translucent hinged ventilated facades of capital construction projects having various functional and operational purposes is highlighted. **Results.** A detailed algorithm is presented for supporting a comprehensive diagnosis of the heat engineering state of building envelopes for various construction projects by analysing thermograms, using thermal monitoring methods, to take into consideration engineering systems, building materials and finished products, along with technologies of full-scale thermal imaging inspection of translucent building envelopes. The obtained thermograms are presented and analysed. **Conclusion.** Current problems in the fields of energy efficiency and energy saving in the construction and energy industries are considered in the light of the latest technological developments. The proposed graph-analytical algorithm supporting a diagnosis of the heat engineering state of building envelopes based on the analysis of thermograms is the most comprehensive among known analogues and prototypes.

Keywords: thermal control, thermal imaging diagnostics, thermal imager, thermogram, thermal image, hinged ventilated facade, translucent and non-translucent enclosing structure, capital construction projects.

Введение. Вопросы энергоэффективности и энергоресурсосбережения в различных отраслях народного хозяйства (строительство, энергетика, машиностроение, транспорт и др.) являются стратегически важными, входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации [1], а также в перечень критических технологий Российской Федерации.

Задачи рационального использования энергоресурсов (первичных, вторичных) различной природы происхождения также укладываются в парадигму энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [2], в проект энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года; соответствуют Федеральному закону от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3], стратегиям развития строительного и топливно-энергетического комплексов страны и отдельных субъектов Российской Федерации; отвечают целям национальных проектов «Экология» (2018-2024 гг.) и «Жилье и городская среда» (2018-2024 гг.), государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды»; лежат в основе федеральной целевой программы обеспечения безопасности в Российской Федерации, национальной безопасности и национальных интересов. Так, согласно [3], тепловизионная диагностика зданий и сооружений является неотъемлемой частью энергетического обследования.

Она позволяет оценивать теплозащитные свойства ограждающих конструкций объектов капитального строительства, контролировать функциональное и эксплуатационное состояние инженерных систем, идентифицировать скрытые (невидимые, неявные) и явные (видимые) дефекты в них.

Тепловизионная диагностика базируется на методах и средствах теплового контроля [4–13]. В свою очередь, тепловой контроль основан на измерении, мониторинге и анализе температуры контролируемых объектов. Главным условием применения теплового контроля является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение теплоты в объекте контроля приводит к тому, что его температура изменяется относительно окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта контроля является основным параметром в тепловом методе, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи (теплообмена), режиме работы объекта контроля, его внутренней структуре, наличии или отсутствии дефектов. Тепловые потоки в контролируемом объекте могут возникать по различным причинам.

Практически любое здание, сооружение, строение (при наличии инженерных систем кондиционирования микроклимата) является сложным объектом с точки зрения теплообмена. Воздушный и температурно-влажностный режим такого объекта формируются под действием внешних метеорологических (климатических) воздействий, внутренних теплопоступлений от отопительных приборов, оборудования, присутствия людей (бытовые теплопоступления), а также совместной работы ограждающих конструкций и инженерных систем (в первую очередь систем отопления и вентиляции).

В связи с этим продолжает оставаться актуальным и практически значимым массовый и оперативный контроль качества тепловой защиты, как вводимых в эксплуатацию, так эксплуатируемых и прошедших капитальный ремонт, реконструкцию или модернизацию зданий. Такой контроль (тепловой контроль, тепловизионная инспекция) позволяет определить фактические теплопотери через ограждающие конструкции и сделать заключение о классе энергоэффективности контролируемых объектов. Тепловизионное обследование (термографирование) объектов капитального строительства, инженерных систем, отдельных установок и их элементов выполняют с помощью инфракрасного прибора – тепловизора.

Особый интерес в настоящее время в проведении подобной тепловизионной (тепловой) диагностики наблюдается в отношении светопрозрачных фасадных систем зданий и сооружений (рис. 1, верхний ряд), а также несветопрозрачных навесных вентилируемых фасадов объектов капитального строительства (рис. 1, нижний ряд).



Рис. 1. Варианты примеров светопрозрачных фасадных систем (верхний ряд) и несветопрозрачных навесных вентилируемых фасадных систем (нижний ряд) объектов капитального строительства различного функционального и эксплуатационного назначения

Fig. 1. Variants of examples of translucent facade systems (upper row) and non-translucent hinged ventilated facade systems (lower row) of capital construction objects of various functional and operational purposes

В первом случае, такой интерес обоснован высоким спросом на строительные объекты с большой площадью остекления для удовлетворения потребностей максимальной по времени естественной освещенности и инсоляции помещений.

Во втором случае – связан с увеличением количества капитальных ремонтов, модернизаций, реконструкций, реноваций в отношении существующих и эксплуатируемых зданий, сооружений, строении, необходимых для выполнения ужесточающихся требований к тепловой защите строительных оболочек различного назначения [3–6, 9].

Постановка задачи. Целью работы является анализ некоторых особенностей и результатов теплового контроля несветопрозрачной навесной вентилируемой фасадной системы и светопрозрачных ограждающих конструкций в виде оконных систем объекта капитального строительства.

Таким объектом капитального строительства является административно-производственное здание ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат» (г. Вологда, Россия).

Графо-аналитический алгоритм комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства различного назначения по анализу термограмм представлен на рис. 2.

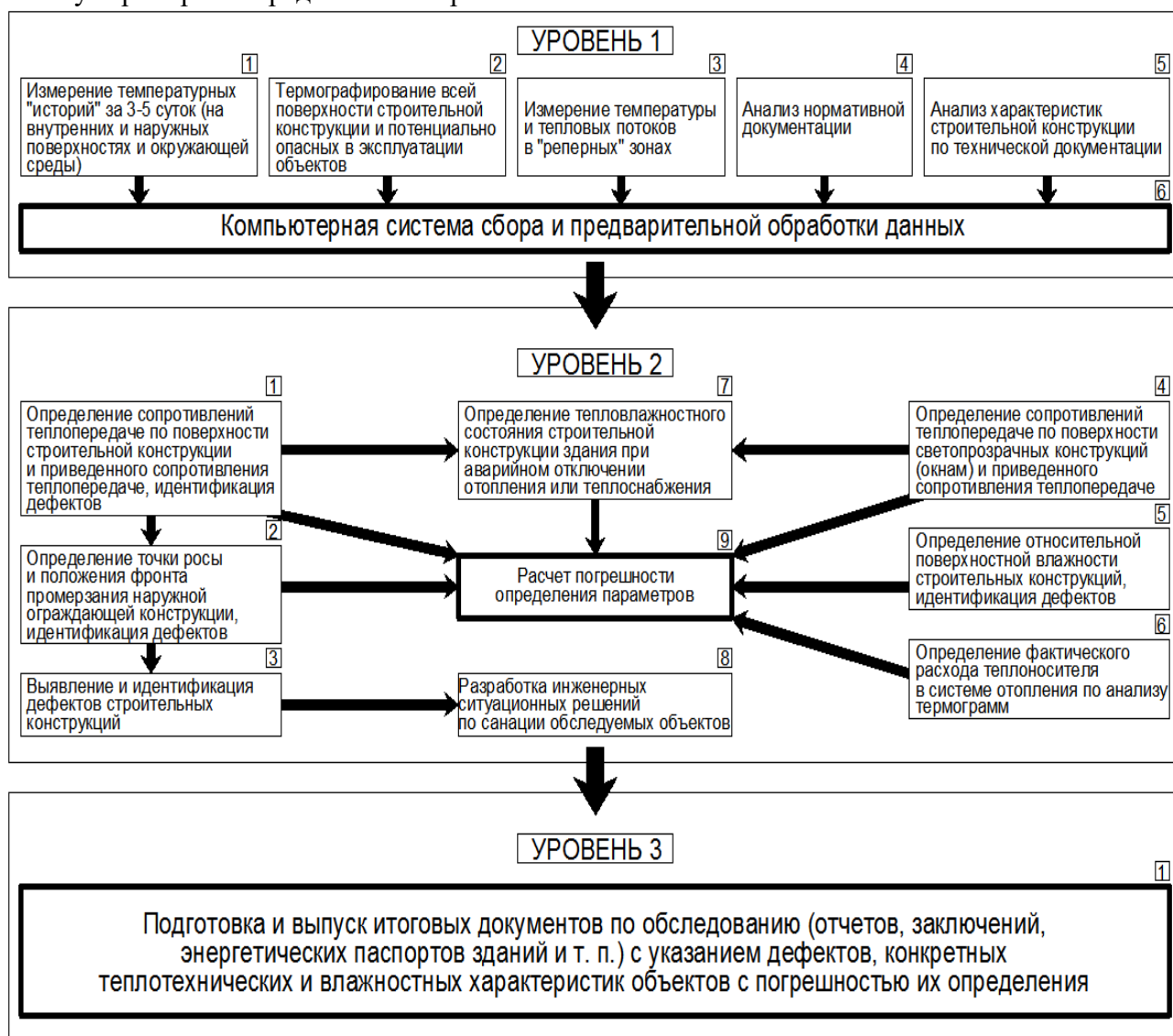


Рис. 2. Графо-аналитический алгоритм комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм

Fig. 2. Graph-analytical algorithm for the comprehensive diagnosis of the heat engineering condition of building envelopes of building objects according to the analysis of thermograms

В [4, 5, 9, 14–16] приведена максимально подробная методика теплового контроля строительных объектов, инженерных систем, строительных материалов и изделий.

В [17] предложена краткая технология натурного тепловизионного обследования светопрозрачных ограждающих конструкций:

1. Тепловизионный контроль проводят при режиме теплопередачи, близком к стационарному, через ограждающую конструкцию.

Если режим теплопередачи нестационарный – выполняют несколько тепловизионных съемок с последующим совместным анализом термограмм. Обследуемые поверхности не должны находиться в зоне прямого и отраженного солнечного облучения в течение измерений и 12 часов до проведения измерений.

2. Минимальный перепад температур между внутренним и наружным воздухом при выполнении тепловизионного контроля должен составлять 10 °С.

3. Измерения при обследовании не следует проводить, если значение интегрального коэффициента излучения поверхности объекта менее 0,7.

Значения коэффициента излучения принимают по технической документации на тепловизор, справочной литературе для заданных материалов в спектральном диапазоне тепловизора либо измеряют в натуральных или лабораторных условиях.

Поверхности ограждающих конструкций в период тепловизионных измерений не должны подвергаться дополнительному тепловому воздействию от биологических объектов, источников отопления и источников освещения.

4. Обработку термограмм проводят с использованием программного обеспечения фирмы-производителя тепловизионной техники.

Методы исследования. Методологической основой исследования служат фундаментальные положения теорий теплопередачи, теплового контроля и инфракрасной диагностики, методы качественного и количественного анализа термограмм (тепловых изображений).

Применяемые методы исследования и обработки полученных результатов базируются на действующих нормативных документах Российской Федерации (межгосударственные и национальные стандарты, своды правил и др.), федеральных законах, современных передовых научных работах и охраняемых документах (объектах интеллектуальной собственности) отечественных и зарубежных авторов, классических учебных и справочных материалах.

Обсуждение результатов. Проанализируем некоторые результаты теплового контроля светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций одного из объектов капитального строительства ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат».

Тепловизионная диагностика и анализ ее результатов продиктованы необходимостью сокращения потребления энергетических ресурсов и экономией денежных средств ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат».

На рис. 3 представлены некоторые результаты термографирования административно-производственного здания ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат».

Тепловой контроль выполнялся в январе тепловизором марки Testo 875-2 с соблюдением всех норм и требований, предъявляемым к подобному рода обследованиям [4, 5, 9, 16, 18]. Тепловому контролю подвергались наружные поверхности ограждающих конструкций обследуемого объекта капитального строительства.

Напомним, что навесная вентилируемая фасадная система – это конструкция, состоящая из облицовочных материалов, которые крепятся на стальной оцинкованный, стальной нержавеющей или алюминиевый каркас к несущему слою стены или к монолитному перекрытию. По зазору между облицовкой и стеной свободно циркулирует воздух, который убирает конденсат и влагу с конструкций. Все элементы крепления навесной вентилируемой фасадной системы являются универсальными, что позволяет решать сложные архитектурные и конструкторские задачи – от классических до ультрасовременных.

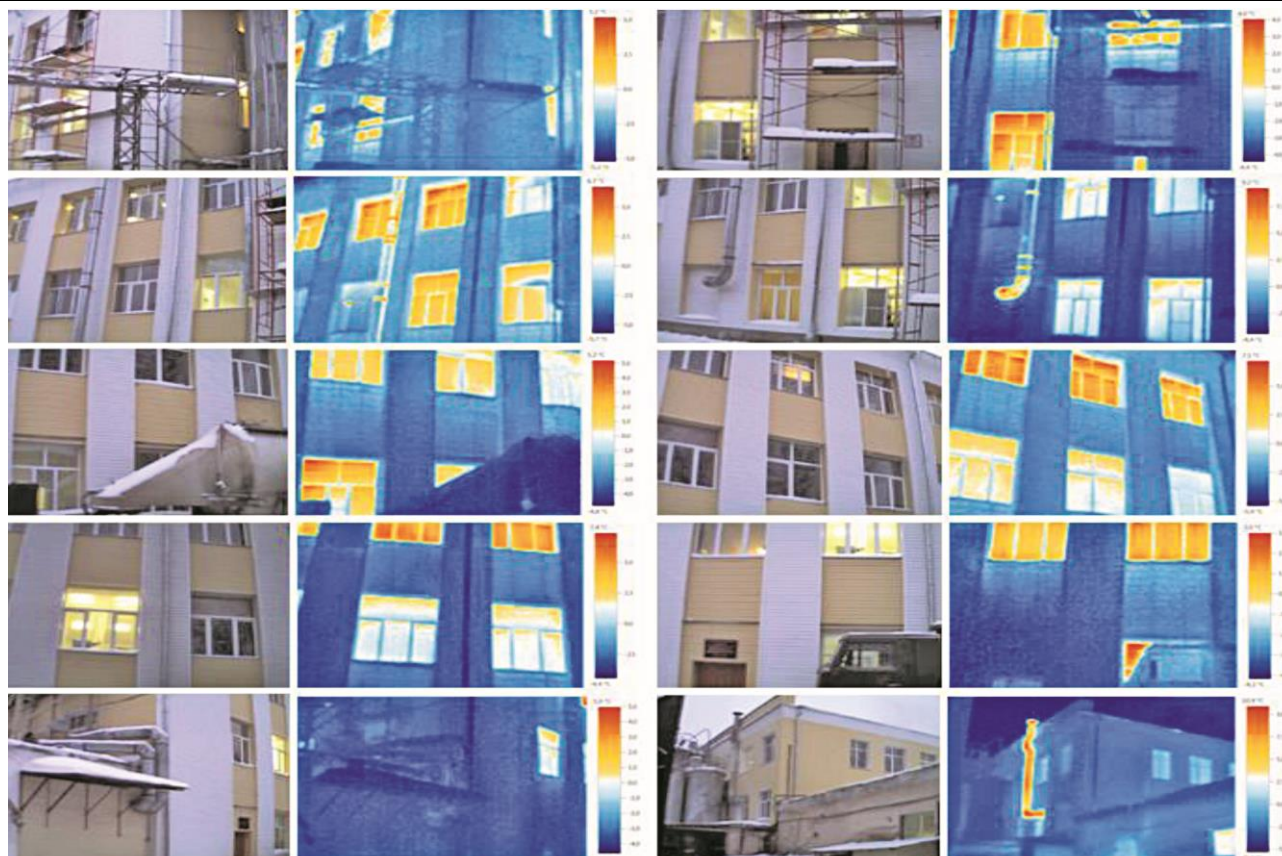


Рис. 3. Результаты теплового контроля (термограммы) несветопрзрачных навесных вентилируемых фасадов со светопрозрачными ограждающими конструкциями в виде оконных систем с фотографическим подтверждением натурного обследования

Fig. 3. The results of thermal control (thermograms) of non-translucent hinged ventilated facades with translucent walling in the form of window systems with photographic confirmation of a full-scale external examination

Преимуществами таких систем являются: высокие тепло- и звукоизоляционные характеристики; значительное сокращение затрат на отопление строительного объекта; устойчивость к атмосферным воздействиям; быстрый монтаж в любое время года и др. Недостатками таких систем являются: высокие требования к квалификации монтажников; несовершенство ряда существующих конструктивных решений для обеспечения пожарной безопасности; несоблюдение условий по коррозионной защите металлического каркаса; несоблюдение условий или отказ от защитных пленок в конструкции теплоизоляционного слоя, сказывается на экологичности системы и др.

Вывод. Результатом проведенного исследования являются следующие заключения:

1. Качественный анализ термограмм по результатам теплового контроля навесных вентилируемых фасадов ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат» не выявил избыточных тепловых потерь строительной оболочкой. Данный факт свидетельствует о высоком качестве монтажных работ по устройству несветопрзрачной навесной вентилируемой фасадной системы и светопрозрачных ограждающих конструкций в виде оконных систем, а также других строительных конструкций, элементов, инженерных систем и установок.

2. В процессе теплового контроля и качественного анализа термограмм идентифицированы незначительные тепловые аномалии. Для устранения (ликвидации) локализованных зон с повышенными тепловыми потерями рекомендовано их утепление (герметизация) современными теплоизоляционными материалами [19].

3. Тепловизионная диагностика строительных объектов с различного рода навесными вентилируемыми фасадными системами (светопрозрачными и несветопрзрачными) позволяет выявить форму, размеры и точное местонахождение явных и скрытых дефектов; объяснить причины появления и выбрать рациональный способ устранения обнаруженных низко- и

высокотеплопроводных включений; вычислить теплотехнические характеристики материалов и изделий, из которых они изготовлены.

4. Предложенный графо-аналитический алгоритм комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм является максимально полным среди известных аналогов и прототипов.

5. Тепловой контроль является одним из видов неразрушающего контроля [4, 5, 9, 20] и позволяет с высокой степенью технологичности и безопасности выполнять оценку и диагностику текущего состояния и потенциала энергосбережения различных объектов строительства, энергетики, транспорта, машиностроения. Активно применяется в военном деле, медицине, металлургии, электронике и некоторых других производственно-промышленных областях и сферах.

6. Практический опыт предыдущих обследований объектов капитального строительства и инженерных систем с применением законов и принципов теплового контроля подтвердил – тепловизионная диагностика является одним из наиболее прогрессивных и востребованных направлений качественной и количественной оценки функционирования различных объектов жилищного, коммунального, энергетического секторов страны.

7. Тепловизионная диагностика обеспечивает возможность безопасного мониторинга теплового состояния объектов контроля без вывода их из эксплуатации, прогнозирования и выявления дефектов на ранней стадии их развития, сокращение затрат на техническое обследование и т. д.

8. Тепловой контроль в очередной раз подтвердил свою практическую применимость для неразрушающего обследования строительных оболочек с подобного рода фасадными системами.

Библиографический список:

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715-р. – М.: Правительство РФ. – 104 с.
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ // Ведомости Федерального Собрания Российской Федерации. – М.: ООО «Рид Групп», 2012. – 80 с.
4. Будадин, О.Н. Тепловой контроль: учеб. пособие / О.Н. Будадин, В.П. Вавилов, Е.В. Абрамова. – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2013. – 176 с.
5. Вавилов, В.П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров. Изд. 1-е / В.П. Вавилов. – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 72 с.
6. Карпов, Д.Ф. Алгоритм комплексной диагностики технического состояния строительных конструкций по анализу термограмм / Д.Ф. Карпов // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 23-28.
7. Карпов, Д.Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий / Д.Ф. Карпов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 7. – С. 57-62.
8. Павлов, М.В. Качественно-количественный анализ тепловых изображений в строительной термографии / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, В.А. Князев // Научный журнал «Вестник ВоГУ. Серия: Технические науки». – Вологда: ВоГУ. – 2019. – № 4 (6). – С. 79-82.
9. Сеницын, А.А. Основы тепловизионной диагностики теплопотребляющих объектов строительства: учеб. пособие / А.А. Сеницын, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов. – Вологда: ВоГУ, 2013. – 156 с.
10. Карпов, Д.Ф. Экспериментально-расчетное определение приведенного коэффициента теплопроводности фрагмента неоднородной ограждающей строительной конструкции из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе методом теплового неразрушающего контроля / Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, В.И. Игонин, А.А. Кочкин // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3, Т. 1. – С. 351-358.
11. Пат. 2379668 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ теплового неразрушающего контроля рабочего тела / В.И. Игонин, Д.Ф. Карпов; заявитель и патентообладатель Вологодский государственный технический университет. – № 2008140634/28; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.01.2010. – Б. и. – 2010. – № 2.
12. George S., Goravar S., Mishra D., Shyamsunder M.T., Sharma P., Padmashree G.K., Kumar P.S., Bremond P., Mukherjee K. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography // Insight. 2010. V. 52. No. 9. Pp. 470-474.
13. Vijayraghavan G.K., Majumder M.C., Ramachandran K.P. NDTE using flash thermography: numerical modelling and analysis of delaminations in GRP pipes // Insight. 2010. V. 52. No. 9. Pp. 481-487.
14. Будадин, О.Н. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений / О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова, М.А. Родин, О.В. Лебедев // Дефектоскопия, 2003. – № 5. – С. 77-94.

15. ГОСТ Р 8.619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24.07.2006 г. № 142-ст. – М.: Стандартинформ, 2006. – 19 с.
16. ПНСТ 57-2015. Контроль неразрушающий. Инфракрасная термография. Система и оборудование. Часть 1. Описание характеристик. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20.11.2015 г. № 32-пнст. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.
17. ГОСТ 34379-2018. Конструкции ограждающие светопрозрачные. Правила обследования технического состояния в натуральных условиях. – Введ. 01.10.2018. – Москва: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2018. – 41 с.
18. Cramer K., Winfree W., Hodges K., Koshti A., Ryan D., Reinhardt W. Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA // Proc. SPIE "Thermosense XXVIII". 2006. V. 6205. P. 6205 IB 1-9.
19. Карпов, Д.Ф. Тепловые методы и средства контроля теплопроводности термокраски / Д. Ф. Карпов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 2. – С. 61-68
20. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. Кн. 2: К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф [и др.]. Электрический контроль. 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.

References:

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 iyulya 2011 g. № 899. [Decree of the President of the Russian Federation of July 7, 2011 No. 899. (In Russ.)]
2. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 13.11.2009 № 1715-r. – М.: Pravitel'stvo RF. – 104 s. [The energy strategy of Russia for the period until 2030: order of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715-r. М.: Government of the Russian Federation. 104 p. (In Russ.)]
3. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v ot-del'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii: Feder. zakon ot 23 noyabrya 2009 g. № 261-FZ // Ve-domosti Federal'nogo Sobraniya Rossiyskoy Federatsii. – М.: ООО «Рид Групп», 2012. – 80 s. [On energy conservation and on improving energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation: Feder. Law of November 23, 2009 No. 261-ФЗ // News of the Federal Assembly of the Russian Federation. - М.: Reed Group LLC, 2012. 80 p. (In Russ.)]
4. Budadin, O.N. Teplovoy kontrol': ucheb. posobiye / O.N. Budadin, V.P. Vavilov, Ye.V. Abramova. – М.: Izdatel'skiy dom «SPEKTR», 2013. – 176 s. [Budadin, O. N. Thermal control: textbook. allowance / O.N. Budadin, V.P. Vavilov, E.V. Abramova. - М.: Publishing House "SPECTRUM", 2013. 176 p. (In Russ.)]
5. Vavilov, V.P. Teplovideniye i teplovoy kontrol' dlya inzhenerov. Izd. 1-ye / V.P. Vavilov. – М.: Izdatel'skiy dom «SPEKTR», 2017. – 72 s. [Vavilov, V.P. Thermal imaging and thermal control for engineers. Ed. 1st / V.P. Vavilov. - М.: SPECTR Publishing House, 2017. 72 p. (In Russ.)]
6. Karpov, D.F. Algoritm kompleksnoy diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh kon-struktsiy po analizu termogramm / D.F. Karpov // Stroitel'nyye materialy i izdeliya. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 23-28. [Karpov, D.F. Algorithm for complex diagnostics of the technical condition of building structures for the analysis of thermograms / D.F. Karpov // Building materials and products. 2019.Vol 2. No. 2. pp. 23-28. (In Russ.)]
7. Karpov, D.F. Aktivnyy metod teplovogo kontrolya teploprovodnosti stroitel'nykh materialov i izdeliy / D.F. Karpov // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. – 2019. – № 7. – С. 57-62. [Karpov, D.F. Active method of thermal control of thermal conductivity of building materials and products / D.F. Karpov // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 7. pp. 57-62. (In Russ.)]
8. Pavlov, M.V. Kachestvenno-kolichestvennyy analiz teplovykh izobrazheniy v stroitel'noy termo-grafii / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Knyazev // Nauchnyy zhurnal «Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki». – Vologda: VoGU. – 2019. – № 4 (6). – С. 79-82. [Pavlov, M.V. Qualitative and quantitative analysis of thermal images in building thermography / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Knyazev // Scientific journal "Bulletin of the Voronezh State University. Series: Engineering." - Vologda: VoGU. 2019. No. 4 (6). p. 79-82. (In Russ.)]
9. Sinitsyn, A.A. Osnovy teplovizionnoy diagnostiki teplopotreblyayushchikh ob'yektov stroitel'stva: ucheb. posobiye / A.A. Sinitsyn, D.F. Karpov, M.V. Pavlov. – Vologda: VoGTU, 2013. – 156 s. [Sinitsyn, A.A. Fundamentals of thermal imaging diagnostics of heat-consuming construction objects: textbook. allowance / A.A. Sinitsyn, D.F. Karpov, M.V. Pavlov. - Vologda: VSTU, 2013. 156 p. (In Russ.)]
10. Karpov, D.F. Eksperimental'no-raschetnoye opredeleniye privedennogo koeffitsiyenta teplopro-vodnosti fragmenta neodnorodnoy ograzhdayushchey stroitel'noy konstruktsii iz silikatnogo kirpicha na tsementno-peschanom rastvore metodom teplovogo nerazrushayushchego kontrolya / D.F. Karpov, M.V. Pavlov, V.I. Igonin, A.A. Kochkin // Vestnik MGSU. – 2011. – № 3, Т. 1. – С. 351-358. [Karpov, D.F. Experimental and calculation determination of the reduced coefficient of thermal conductivity of a fragment of a heterogeneous building envelope made of silicate brick on a cement-sand mortar using the method of thermal non-destructive testing / D.F. Karpov, M.V. Pavlov, V.I. Igonin, A.A. Kochkin // Vestnik MGSU. p 2011. p No. 3, Vol. 1. p. 351-358.
11. Pat. 2379668 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01N 25/18. Sposob teplovogo nerazrushayushchego kon-trolya rabochego tela / V.I. Igonin, D.F. Karpov; zayavitel' i patentoobladatel' Vologodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy

universitet. – № 2008140634/28; yayavl. 13.10.2008; opubl. 20.01.2010. – B. i. – 2010. – № 2. [Pat. 2379668 Russian Federation, IPC G01N 25/18. The method of thermal non-destructive testing of the working fluid / V.I. Igonin, D.F. Karpov; Applicant and patent holder Vologda State Technical University. - No. 2008140634/28; declared 10/13/2008; publ. 01/20/2010. B. and. 2010. No. 2. (In Russ.)]

12. George S., Goravar S., Mishra D., Shyamsunder M.T., Sharma P., Padmashree G.K., Kumar P.S., Bremond P., Mukherjee K. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography // *Insight*. 2010. Vol. 52. No. 9. pp. 470-474.

13. Vijayraghavan G.K., Majumder M.C., Ramachandran K.P. NDTE using flash thermography: numerical modelling and analysis of delaminations in GRP pipes // *Insight*. 2010. Vol. 52. No. 9. pp. 481-487.

14. Budadin, O.N. Teplovoy nerazrushayushchiy kontrol' zdaniy i stroitel'nykh sooruzheniy / O.N. Bu-dadin, Ye.V. Abramova, M.A. Rodin, O.V. Lebedev // *Defektoskopiya*, 2003. – № 5. – S. 77-94. [Budadin, O.N. Thermal non-destructive testing of buildings and building structures / O.N. Bu-dadin, E.V. Abramova, M.A. Rodin, O.V. Lebedev // *Defectoscopy*, 2003. No. 5. pp. 77-94. (In Russ.)]

15. GOST R 8.619-2006. Pribory teplovizionnyye izmeritel'nyye. Metodika poverki. Utv. i vved. v deystviye Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 24.07.2006 g. № 142-st. – M.: Standartinform, 2006. – 19 s. [GOST R 8.619-2006. Thermal imaging devices. Verification technique. Approved and enter. in force by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of July 24, 2006 No. 142-Art. - M. : Standartinform, 2006. 19 p. (In Russ.)]

16. PNST 57-2015. Kontrol' nerazrushayushchiy. Infekrasnaya termografiya. Sistema i oborudovaniye. Chast' 1. Opisanie kharakteristik. Utv. i vved. v deystviye Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 20.11.2015 g. № 32-pnst. – M.: Standartinform, 2016. – 15 s. [PNST 57-2015. Non-destructive testing. Infrared thermography. System and equipment. Part 1. Description of characteristics. Approved and enter. in force by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 20, 2015 No. 32-PNST. M. : Standartinform, 2016. 15 p. (In Russ.)]

17. GOST 34379-2018. Konstruktsii ograzhdayushchiye svetoprozrachnyye. Pravila obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya v naturnykh usloviyakh. – Vved. 01.10.2018. – Moskva: FGUP «STANDARTINFORM», 2018. – 41 s. [GOST 34379-2018. Structures enclosing translucent. Rules for the examination of the technical condition in natural conditions. - Enter. 10/01/2018. - Moscow: FSUE STANDARTINFORM, 2018. 41 p. (In Russ.)]

18. Cramer K., Winfree W., Hodges K., Koshti A., Ryan D., Reinhardt W. Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA // *Proc. SPIE "Thermosense XXVIII"*. 2006. Vol. 6205. pp 6205 IB 1-9.

19. Karpov, D.F. Teplovyye metody i sredstva kontrolya teploprovodnosti termokraski / D. F. Kar-pov // *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*. – 2019. – № 2. – S. 61-68 [Karpov, D.F. Thermal Methods and Means of Thermal Conductivity Thermal Paint Control / D.F. V. G. Shukhov. 2019. No. 2. p. 61-68]

20. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: V 8 t. / Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T. 5: V 2 kn. Kn. 1: V.P. Vavilov. Teplovoy kontrol'. Kn. 2: K.V. Podmaster'yev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf [i dr.]. Elektri-cheskiy kontrol'. 2-ye izd., ispr. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 679 s. [Non-destructive testing: Reference: In 8 t. / Under the total. ed. V.V. Klyueva. T. 5: In 2 book. Prince 1: V.P. Vavilov. Thermal control. Prince 2: K.V. Apprentices, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf [et al.]. Electrical control. 2nd ed., Rev. - M.: Mechanical Engineering, 2006. 679 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель; e-mail: karpov_denis_85@mail.ru

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель; e-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Синицын Антон Александрович, кандидат технических наук, доцент; e-mail: nee-energo@yandex.ru

Монаркин Николай Николаевич, старший преподаватель; e-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

Гудков Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент; e-mail: web-medium@yandex.ru

Information about authors:

Denis. F. Karpov, Senior Lecturer; e-mail: karpov_denis_85@mail.ru

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer; e-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Anton A. Sinitsyn, Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof.; e-mail: nee-energo@yandex.ru

Nikolay N. Monarkin, Senior Lecturer; e-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

Alexander G. Gudkov, Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof.; e-mail: web-medium@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.01.2020.

Принята в печать 19.02.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.01.2020.

Accepted for publication 19.02.2020.

Для цитирования: А.С. Личковаха, Б.А. Шемишур, С.А. Кузнецов. Исследование деформированного состояния и перемещений гибкого стержня с начальной кривизной. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (1):156-164. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164

For citation: A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov. Study of the strain state and movements of a flexible rod with initial curvature. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1):156-164. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624. 016.5

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ГИБКОГО СТЕРЖНЯ С НАЧАЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ

А.С. Личковаха¹, Б.А. Шемишур¹, С.А. Кузнецов²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения,
1344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2, Россия,

²Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова,

² 346428, ул. Просвещения, 132, Новочеркасск, Россия

Резюме. Цель. Исследуется возможность получения регрессивной части упругой (регрессивно-прогрессивной) характеристики при осевом нагружении в начальный период, путем применения упругого стержня имеющего начальную кривизну, с приложением к нему вертикальной сжимающей нагрузки. Задачей настоящего исследования является определение статической характеристики такого стержня без учёта сил сопротивления. **Метод.** Для решения поставленной задачи за основу принята расчётная схема с прямолинейным упругим стержнем; используется метод эллиптических параметров и выполняется сравнение с решением, полученным с применением метода конечных элементов в ПК ANSYS. **Результат.** Разработана методика оценки деформированного состояния и перемещений гибкого стержня с начальной кривизной, позволяющая исследовать регрессивно – прогрессивную характеристику различных упругих систем имеющих начальную кривизну для их эффективного использования при определении колебаний. **Вывод.** Деформированное состояние упругого гибкого стержня имеющего начальную кривизну и перемещение точки приложения силы могут, определяется с помощью полученной методики. При этом, задавая различные исходные параметры гибкого стержня (с целью получения регрессивно-прогрессивной характеристики) можно получать значительные перемещения в докритической области, когда осевая нагрузка не превышает Эйлерову силу для данного гибкого стержня.

Ключевые слова: гибкий стержень, деформация, кривизна, Эйлерова сила

BUILDING AND ARCHITECTURE

STUDY OF THE STRAIN STATE AND MOVEMENTS OF A FLEXIBLE ROD
WITH INITIAL CURVATURE

A.S. Lichkovakha¹, B.A. Shemshura¹, S.A. Kuznetsov²

¹Rostov State Transport University,

^{1,2} pl. Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostov-on-Don 344038, Russia,

²M.I. Platov South Russian State Polytechnic University,

²132 St. Prosveshcheniya, Novocherkassk 346428, Russia

Abstract. Aim. The possibility of obtaining the regressive part of the elastic (regressive-progressive) characteristic under axial loading in the initial period is studied by applying an elastic rod having an initial curvature under vertical compressive load. The objective of the study is to determine the static characteristics of such a rod without taking the resistance forces into account. **Method.** To solve the problem, the elliptic parameters method was used to make a comparison with a solution obtained using the finite element method in the ANSYS engineering simulation software. **Results.** A technique was developed for assessing the strain state and displacements of a flexible rod with initial curvature in order to study the regression-progressive characteristic of various elastic systems having initial curvature for their effective use in determining oscillations. **Conclusion.** The obtained technique can be used to determine the deformed state of an elastic flexible rod having initial curvature and displacement of the point of application of force. At the same time, by setting various initial parameters of the flexible rod in order to obtain a regressive-progressive characteristic, significant displacements can be obtained in the subcritical region when the axial load does not exceed the Euler force for this flexible rod.

Keywords: flexible rod, deformation, curvature, Euler force

Введение. Колебания объектов можно значительно уменьшить при использовании упругих стержней большой гибкости с нелинейными характеристиками в различного рода демпфирующих устройствах [1,2]. Такие упругие стержни испытывают большие перемещения при работе материала в пределах упругости, в частности, при осевом нагружении в закритической области, когда осевая нагрузка превышает Эйлерову силу, однако в докритической области перемещения недостаточны для получения регрессивной характеристики.

Постановка задачи. В настоящей работе исследуется возможность получения регрессивной части упругой (регрессивно-прогрессивной) характеристики при осевом нагружении в начальный период, путем применения упругого стержня имеющего начальную кривизну, с приложением к нему вертикальной сжимающей нагрузки.

Задачей настоящего исследования является определение статической характеристики такого стержня без учёта сил сопротивления.

Для решения поставленной задачи за основу принята расчётная схема с прямолинейным упругим стержнем, используемая в работе [3]. Расчётная схема приведена на рис 1. Отличительной особенностью данной расчетной схемы является то, что гибкий стержень имеет начальную кривизну. Жёсткий стержень BA_0 одним концом шарнирно соединён со стержнем большой гибкости OA_0 и может поворачиваться вокруг неподвижного шарнира «B». Стержень OA_0 , имеющий форму тонкой полосы, соединён с неподвижным шарниром «O», находящимся на одной вертикали с шарниром «B».

На рис.1 показано:

- начальное положение системы OA_0B и статическое положение после приложения нагрузки OAB .
- δ – угол между неподвижной осью X и подвижной осью X' ,

- γ_0 – начальное положение поводка,
- $h = BA_0$ – длина поводка,
- $d = OA$ – расстояние между двумя неподвижными шарнирами,
- γ – угол отклонения поводка от вертикали, характеризующий положение статического равновесия при заданной силе тяжести G ,
- F – реакция упругого стержня.

Пунктиром показано первоначальное очертание гибкого стержня, формой которого является дуга окружности с начальной кривизной ρ ;

- f – максимальный прогиб начального очертания стержня;
- l – длина гибкого стержня или дуги OA .

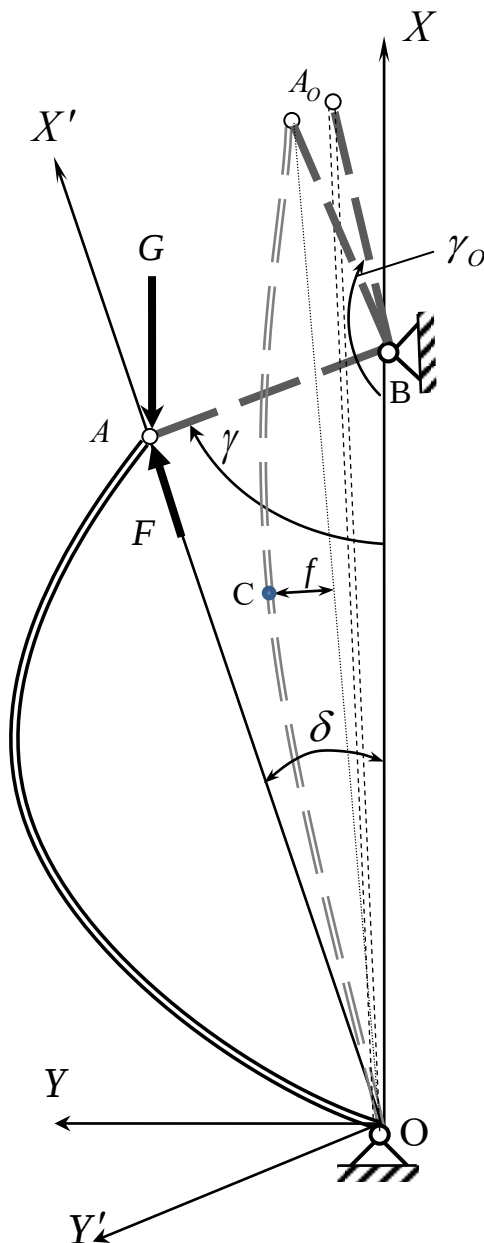


Рис.1 Расчётная схема стержня, имеющего начальную кривизну
 Fig. 1 Design diagram of a bar having an initial curvature

Определим зависимость вертикальных перемещений шарнира «А» от нагрузки G , когда начальное положение стержня OA_0 прямолинейное.

Методы исследования. Для решения задачи используется метод эллиптических параметров [4,5] и выполняется сравнение с решением, полученным с применением метода конечных элементов в ПК ANSYS [6].

В положении статического равновесия зависимость между силой G и реакцией упругого стержня F имеет вид:

$$G = F(\cos \delta - \frac{\sin \delta}{\operatorname{tg} \gamma}), \quad (1)$$

Согласно методикам [7,8] значения эллиптических амплитуд в концевых точках упругого стержня равны: $\psi_o = \frac{\pi}{2}, \psi_A = \frac{3}{2}\pi$, а в точке сжатия эта амплитуда должна быть кратной $\pi/2$, то есть $\psi_C = \pi$.

Тогда силовой коэффициент β для рассматриваемой схемы равен

$$\beta = F(\psi_1) - F(\psi_o) = F(\frac{3\pi}{2}) - F(\frac{\pi}{2}) = 2F(k), \quad (2)$$

Полный эллиптический интеграл первого рода [9] определяется по формуле:

$$F(k) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \right), \quad (3)$$

где α – модулярный угол, связанный с модулем эллиптического интеграла зависимостью $k = \sin \alpha$.

Эллиптический модуль k , в свою очередь определяется из выражения:

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{l+b}{2l} \right)^2}, \quad (4)$$

Сила, сжимающая упругий стержень F , может быть определена, если известен силовой коэффициент подобия β , $\beta = l \sqrt{\frac{F}{H}}$, откуда

$$F = \frac{\beta^2 H}{l^2}. \quad (5)$$

Здесь $l = OA_o$, длина упругого стержня, H – его изгибная жёсткость.

Изгибающий момент в любом сечении гибкого стержня равен

$$M = \frac{2k \cdot \cos \psi}{\beta} F \cdot l \quad (6)$$

Здесь ψ – эллиптическая амплитуда в точке, где определяется изгибающий момент, H – изгибная жёсткость стержня.

Вертикальное перемещение точки приложения силы G определяется по формуле:

$$\lambda = h(|\cos \gamma_o| - |\cos \gamma|) \quad (7)$$

Таким образом, зная величину силы G (1) и вертикальное перемещение точки её приложения (7) может быть получена статическая характеристика для схемы, имеющей прямолинейный гибкий стержень.

Далее определим зависимость вертикального перемещения шарнира «А» от нагрузки G , когда стержень OA_o имеет начальную кривизну (рис. 1).

Если задаётся значение радиуса кривизны ρ (рис. 2), то значение максимального прогиба f определяется по формуле

$$f = 2\rho \sin^2 \frac{l}{4\rho}, \quad (8)$$

Длина хорды OA_o из определяется из выражения (9):

$$OA_0 = b = 2\rho \sin \frac{l}{2\rho}. \quad (9)$$

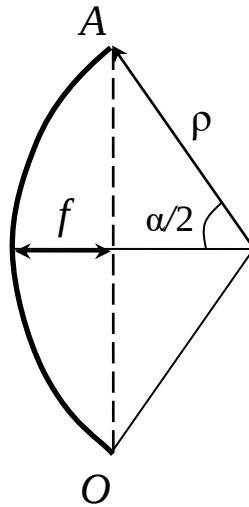


Рис. 2. К определению длины хорды
 Fig. 2. To determine the length of the chord

Для определения зависимости $G = f(\lambda)$ с учётом начальной кривизны стержня вначале вычисляется значение силы F_0 , которое необходимо для преобразования стержня из прямолинейной формы в криволинейную форму с заданными в начальных условиях размерами. Значение силы F_0 определяется из условия, что гибкий стержень изогнут по дуге окружности с радиусом кривизны ρ и максимальным прогибом f . Такая форма стержня является бесперегибной и максимальный прогиб $y' = f$ определяется [10] по формуле

$$y' = \frac{2l}{k\beta_0} [\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi_c} - \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi_0}] \quad (10)$$

Учитывая, что в начале координат эллиптическая амплитуда $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$, а в точке сжатия $\psi_c = \pi$, где прогиб имеет максимальное значение получим

$$\frac{f}{l} = \frac{2}{k\beta_0} (1 - \sqrt{1 - k^2}) \quad (11)$$

Тогда силовой коэффициент для первоначально изогнутого стержня равен

$$\beta_0 = \frac{2l}{kf} (1 - \sqrt{1 - k^2}) \quad (12)$$

Величина силы для создания такого прогиба будет равна

$$F_0 = \frac{\beta^2 H}{l^2} \quad (13)$$

Затем значение силы F , полученное из расчёта системы с прямолинейным стержнем, уменьшаются на величину F_0 , определяемой по формуле (13). Далее, по формуле (1) определяется значение силы G , соответствующее назначенному положению равновесия с принятым значением длины хорды $OA=b$. Эйлерова критическая сила для рассматриваемого прямолинейного стержня определяется по формуле

$$F_3 = \frac{\pi^2 H}{l^2}. \quad (14)$$

Если стержень имеет первоначальную кривизну, то изначально он изгибается без учета Эйлеровой силы. Когда значение силы F , определяемое по формуле (5) будет меньше Эйлеро-

вой силы, т.е. $\pi < \beta$, то формула для вычисления нагрузки сжимающей стержень с первоначальной кривизной имеет вид:

$$G = (F - F_0) \left(\cos \delta - \frac{\sin \delta}{\operatorname{tg} \gamma} \right). \quad (15)$$

Когда значение силы F , определяемое по формуле (5) будет больше Эйлеровой силы, т.е. $\pi > \beta$, то формула для вычисления нагрузки сжимающей стержень с первоначальной кривизной будет иметь вид:

$$G = [(F - F_0) + (F - F_0)] \left(\cos \delta - \frac{\sin \delta}{\operatorname{tg} \gamma} \right). \quad (16)$$

Изгибающий момент в любом сечении гибкого стержня равен

$$M = \frac{2k \cdot \cos \psi}{\beta} F \cdot l - \frac{H}{\rho} \quad (17)$$

Пример. Для гибкого стержня с параметрами $EJ = 0,01076 \text{ Н/м}^2$, $l = 0,04042 \text{ м}$, $\rho = 1,369 \text{ м}$, $d = 0,32 \text{ м}$, $h = 0,09 \text{ м}$, $\gamma_0 = 153,84^\circ$. определить статическую характеристику $G = f(\lambda)$ (зависимость силы G от вертикального перемещения точки её приложения λ).

Решение. По формулам (8) и (9) вычисляются значения максимального прогиба f и хорды $OA=b$ в зависимости от радиуса кривизны гибкого стержня. Далее определяется модуль эллиптического интеграла k (4), силовой коэффициент β_0 (12), и сила F_0 (13).

Задавая длину хорды b посредством формул (4,3,2) определяем силу F , сжимающую упругий стержень до такого положения. С учетом геометрических параметров ($\gamma = \arccos(\frac{d^2 + h^2 - b^2}{2 \cdot d \cdot h})$) данной системы определяем величину силы G (15,16) и вертикальное перемещение точки её приложения λ (7).

Обсуждение результатов. На рис. 3 показан результат моделирования упругого гибкого стержня имеющего начальную кривизну с заданными геометрическими параметрами и условиями закрепления с помощью расчетного комплекса ANSYS.

В случае, представленном на рис.3 перемещение точки приложения силы определяется значением DMX (м) равным 0,156 м при нагрузке в 1 Н.

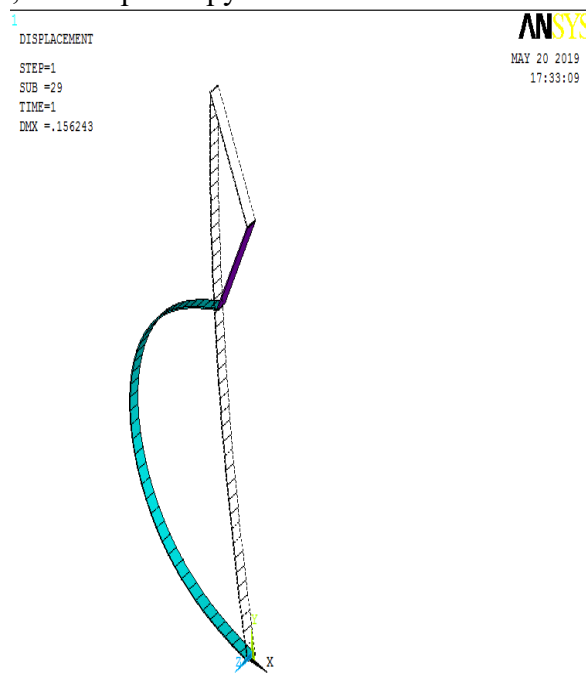


Рис.3. Модель схемы стержня, имеющего начальную кривизну
Fig. 3. Model of the circuit of the rod having the initial curvature

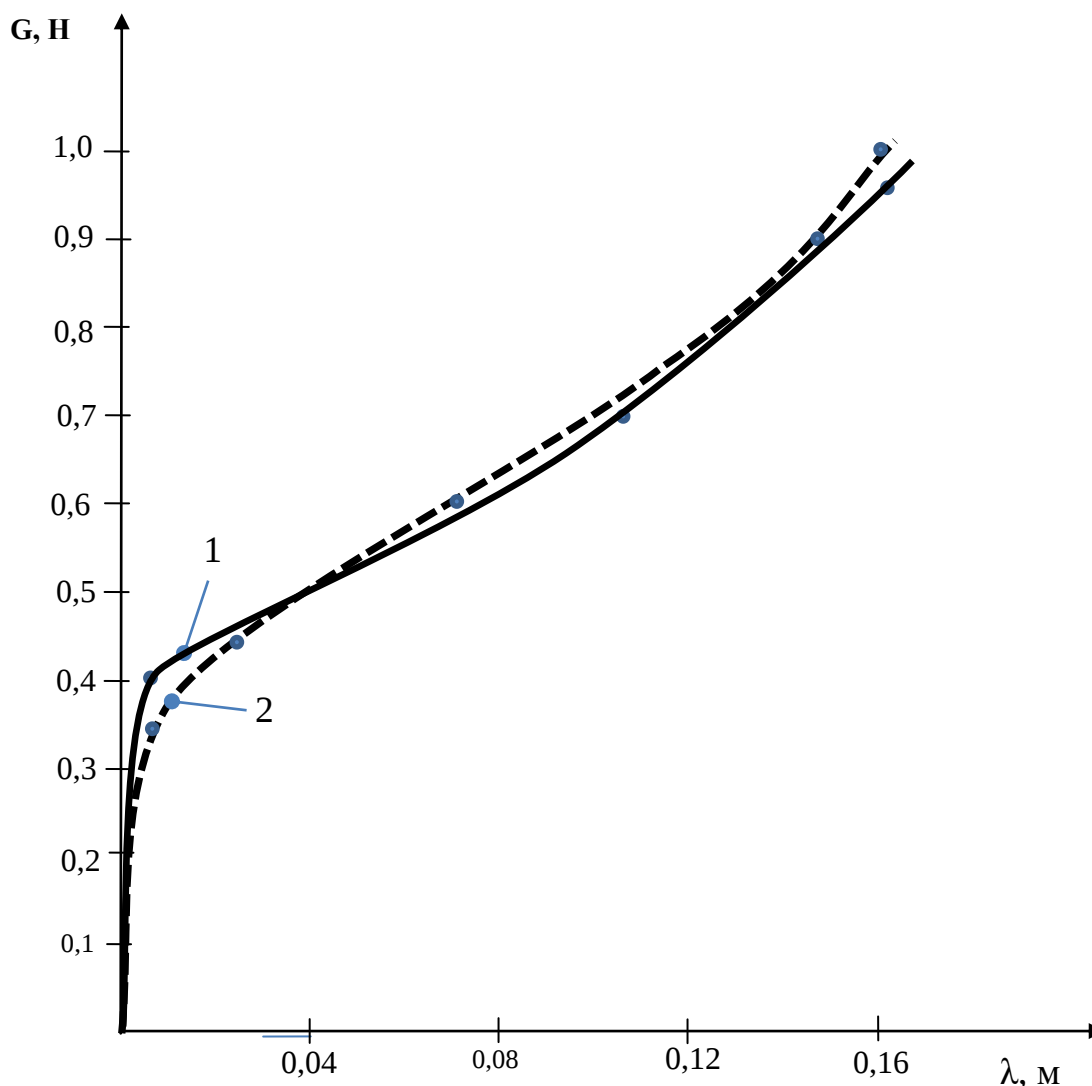


Рис. 4. Зависимости вертикального перемещения точки приложения силы G от величины этой силы (кривые равновесных состояний): 1 – кривая получена по представленному алгоритму. 2 – кривая получена с помощью ПК ANSYS
Fig. 4. Dependences of the vertical displacement of the point of application of force G on the magnitude of this force (equilibrium state curves): 1 - the curve is obtained according to the presented algorithm. 2 - the curve was obtained using the ANSYS PC

На рис. 4 показаны графические зависимости статических характеристик, полученные методом эллиптических параметров (кривая 1) и с использованием метода конечных элементов в ПК ANSYS (кривая 2).

Таким образом, деформированное состояние упругого гибкого стержня имеющего начальную кривизну и перемещение точки приложения силы могут, определяется с помощью полученной методики.

При этом, задавая различные исходные параметры гибкого стержня (с целью получения регрессивно-прогрессивной характеристики) можно получать значительные перемещения в докритической области, когда осевая нагрузка не превышает Эйлерову силу для данного гибкого стержня.

Вывод. Разработанная методика позволяет исследовать регрессивно – прогрессивную характеристику различных упругих систем имеющих начальную кривизну для их эффективно-го использования при определении колебаний.

Библиографический список:

1. Пат. № 2486065 Российская Федерация, МПК В 60G 11/04. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / С.А. Кузнецов, В.Н. Семенов, Я.А. Лысенко, Ю.Ю. Олейничева. – Заявл. 15.02.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
2. Пат. № 2521879 Российская Федерация, МПК В 60G 3/16. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / В.Н. Семенов, С.А. Кузнецов, А.А. Галушкин. – Заявл. 13.12.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
3. Личковаха, А.С. К определению энергетического баланса нелинейной упругой системы /А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра, С.А. Кузнецов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения – 2018. –№2. – С. 137-143.
4. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е.П. Попов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 296с.
5. Пономарёв, С.Д. Расчёты на прочность в машиностроении /С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, В.И. Феодосьев. – М.: Mashgiz, 1956. – Т.1. – 886с
6. Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов – М. : ДМК Пресс, 2009. – 248 с.
7. Личковаха, А.С. Исследование деформации стержня большой гибкости при осевом нагружении /А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра, С.А. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2016. – №3. – С. 71-76.
8. Личковаха, А.С., Исследование напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого стержня большой гибкости / А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра, С.А. Кузнецов // Инженерный вестник Дона, 2018. – № 1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4773/.
9. Анфилофьев, А. В. Геометрическое представление эллиптических интегралов / А.В. Анфилофьев, В.М. Замятин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 11-14.
10. Феодосьев, В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов /В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1973. – 400с.

References:

1. Pat. № 2486065 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 60G 11/04. Uprugaya podveska s regressivno-progressivnoy kharakteristikoy / S.A. Kuznetsov, V.N. Semenov, YA.A. Lysenko, YU.YU. Oleynicheva. – Zayavl. 15.02.2012; opubl. 27.06.2013, Byul. № 18. [Pat. No. 2486065 Russian Federation, IPC B 60 G 11/04. Elastic Suspension with Regressive-Progressive Characteristics / S.A. Kuznetsov, V.N. Semenov, Ya.A. Lysenko, Yu.Yu. Oleinicheva. - Appl. 15.02.2012; publ. 06.27.2013, Bul. № 18.
2. Pat. № 2521879 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 60G 3/16. Uprugaya podveska s regressivno-progressivnoy kharakteristikoy / V.N. Semenov, S.A. Kuznetsov, A.A. Galushkin. – Zayavl. 13.12.2012; opubl. 10.07.2014, Byul. № 19. [Pat. No. 2521879 Russian Federation, IPC B 60 G 3/16. Elastic suspension with a regressive-progressive characteristic / V.N. Semenov, S.A. Kuznetsov, A.A. Galushkin. - Appl. 13.12.2012; publ. 07.10.2014, Bul. № 19.
3. Lichkovakha, A.S. K opredeleniyu energeticheskogo balansa nelineynoy uprugoy sistemy /A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – 2018. –№2. – S. 137-143. [Lichkovakha, A.S. On the definition of the energy balance of a nonlinear elastic system / A.C. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Bulletin of the Rostov State University of Communications - 2018. №2. pp. 137-143.
4. Popov, Ye.P. Teoriya i raschet gibkikh uprugikh sterzhney / Ye.P. Popov. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. – 296s. [Popov, E.P. Theory and calculation of flexible elastic rods / E.П. Popov. - M.: Science, Ch. Ed. fiz.-mat. lit., 1986. P. 296.
5. Ponomarev, S.D. Raschoty na prochnost' v mashinostroyenii /S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, V.I. Feodos'yev. – M.: Mashgiz, 1956. – Т.1. – 886s [Ponomarev, S.D. Calculations on strength in mechanical engineering / S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, V.I. Feodosiev - M.: Mashgiz, 1956. Vol.1 P. 886.
6. Basov, K. A. ANSYS dlya konstruktorov / K. A. Basov – M. : DMK Press, 2009. – 248 c. [Basov, K. A. ANSYS for designers / K. A. Basov - M.: DMK Press, 2009. 248 p.
7. Lichkovakha, A.S. Issledovaniye deformatsii sterzhnya bol'shoi gibkosti pri osevom nagruzhenii /A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. – 2016. – №3. – S. 71-76. [Lichkovakha, A.S. Investigation of deformation of a rod of great flexibility under axial loading / A.C. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // News of Higher Educational Establishments. North-Caucasian region. Technical science. 2016. № 3. pp. 71-76.
8. Lichkovakha, A.S., Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vnetsentrenno szhatogo sterzhnya bol'shoi gibkosti / A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Inzhenernyy vestnik Dona, 2018. – № 1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4773/. [Lichkovakha, A.S. Investigation of the stress-strain state of an extra-centrally compressed rod of great flexibility / A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Engineering Bulletin of the Don, 2018. - № 1. - URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/n1y2018/4773/.

9. Anfilof'yev, A. V. Geometricheskoye predstavleniye ellipticheskikh integralov / A.V. Anfilof'yev, V.M. Zamyatin // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiya TPU]. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 11-14. [Anfilofiev, A.V. Geometric representation of elliptic integrals / AV Anfilofiev, VM Zamyatin // Proceedings of Tomsk Polytechnic University [Izvestiya TPU]. - 2005. Vol 308. No5. pp. 11-14.
10. Feodos'yev, V.I. Izbrannyye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov /V.I. Feodos'yev. – М.: Nauka, 1973. – 400s. [Feodosiev, V.I. Selected problems and questions on the resistance of materials / V.I. Theodosiev. - М.: Science, 1973. P. 400.

Сведения об авторах:

Личковаха Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; кафедра «Строительная механика»; e-mail: lichkovaha@yandex.ru

Шемшюра Борис Андреевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительная механика»; e-mail: stroi_meh@rgups.ru

Кузнецов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Общеинженерные дисциплины», e-mail: sergey-kuznecov-57@mail.ru

Information about the authors:

Andrey S. Lichkovakha, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Mechanics; e-mail: lichkovaha@yandex.ru

Boris A. Shemshura, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Mechanics; e-mail: stroi_meh@rgups.ru

Sergey A. Kuznetsov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of General Engineering Disciplines, e-mail: sergey-kuznecov-57@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.02.2020.

Принята в печать 02.03.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 07.02.2020.

Accepted for publication 02.03.2020.

Для цитирования: М.Ш. Саламанова, С.-А.Ю. Муртазаев, Д.К.-С. Батаев, А.Х. Аласханов. Теоретические основы совместимости многокомпонентных наполненных вяжущих систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1):165-173. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-165-173
For citation: M.Sh. Salamanova, S.-A.Yu. Murtazaev, D.K.-S. Bataev, A.Kh. Alaskhanov. Theoretical basis of compatibility of completely-filled multicomponent binding systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(1):165-173. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-165-173

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-1-165-173

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕСТИМОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАПОЛНЕННЫХ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ

М.Ш. Саламанова^{1,2}, С.-А.Ю. Муртазаев^{1,2}, Д.К.-С. Батаев², Аласханов А.Х.¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,

¹364051, г. Грозный, пр.им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,

²364021, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а, Россия

Резюме. Цель. Развитие современного бетоноведения направлено на разработку многокомпонентных систем с использованием минеральных порошков-наполнителей в тонкодисперсном состоянии для создания прочных и долговечных строительных композитов. Одним из самых важных факторов, влияющих на свойства многокомпонентных систем, является совместимость ее компонентов. Разработка современных эффективных композитов на основе бесклинкерных вяжущих щелочной активацииибезусловно является актуальной проблемой. **Методы.** В основу исследований совместимости многокомпонентных вяжущих систем положен современный технологический прием, способствующий получению прочного и долговечного цементного камня, без применения традиционного портландцемента. **Результаты.** Электронно-зондовые исследования и рентгенофазовый качественный анализ цементного камня бесклинкерного вяжущего щелочной активации показал, что в исследуемой многокомпонентной наполненной системе присутствует гидроалюмосиликатная цеолитовая фаза переменного состава, установлено присутствие кальцита, кварца, близкого к альбиту полевого шпата, слюд, цеолитов; в составе заполнителя присутствует калиевый полевой шпат. **Вывод.** Результаты проведенных исследований подтверждают совместимость всех компонентов многокомпонентной системы «минеральный порошок – щелочной затворитель – ПАВ», а предлагаемый технологический прием позволит получать прочные и долговечные строительные композиты по бесклинкерной технологии, без применения дорого и энергоемкого портландцемента.

*Работа выполнена в рамках исследований по реализации научного проекта № 05.607.21.0320. "Разработка технологии новых строительных композитов на бесклинкерных вяжущих щелочной активации с использованием некондиционного природного и вторичного сырья" получившего поддержку Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификатор соглашения RFMTFI60719X0320.

Ключевые слова: многокомпонентные системы, портландцемент, щелочной раствор, затворитель, кремний, органическая жидкость, совместимость, окремненный мергель, метасиликат натрия

BUILDING AND ARCHITECTURE

THEORETICAL BASIS OF COMPATIBILITY OF COMPLETELY-FILLED
MULTICOMPONENT BINDING SYSTEMS

M.Sh. Salamanova^{1,2}, S.-A.Yu. Murtazaev^{1,2}, D.K.-S. Bataev², A.Kh. Alaskhanov¹

¹M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

¹100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russia,

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CI RAS),

²21a Staropromyslovskoe highway, Grozny 364021, Russia

Abstract. Aim. An important direction in contemporary concrete science is aimed at the development of multicomponent systems using mineral powder fillers in a finely dispersed state to create strong and durable building composites. One of the most significant factors affecting the properties of multicomponent systems is the compatibility of its components. Efforts on the part of leading scientific institutes are aimed at replacing expensive and energy-intensive Portland cement with composite concrete products produced using mixed binders. In this context, the development of modern effective composites based on clinkerless alkaline binders becomes an urgent problem. **Methods.** Studies into the compatibility of multicomponent cementing systems are based on a contemporary technological approach that contributes to the production of strong and durable cement stone, without the use of traditional Portland cement. **Results.** Electron probe studies and X-ray phase analysis of concrete produced using a clinker-free alkaline activation binder showed that the studied multicomponent system contains a hydro-aluminosilicate zeolite phase of variable composition, as well as indicating the presence of calcite, quartz, albite feldspar, mica, zeolites and potassium feldspar. **Conclusion.** The results of the studies confirm the compatibility of all components of the multicomponent system comprised of mineral powder, alkaline coater and surfactant. The proposed technological method can be used to produce strong and durable building composites with clinker-free technology avoiding the use of expensive and energy-intensive Portland cement.

Acknowledgments. The work was performed as part of research on the implementation of scientific project No. 05.607.21.0320. "Development of technology for new building composites on clinker-free alkaline binders using substandard natural and secondary raw materials" which received support from the federal target program "Research and Development in Priority Directions for the Development of the Russian Science and Technology Complex for 2014-2020." Unique identifier for the agreement RFMT-FI60719X0320.

Keywords: multicomponent systems, Portland cement, alkaline solution, hardener, silicon, organic liquid, compatibility, silicified marl, sodium metasilicate

Введение. Эволюция появления и развития, такого сложного и одновременно простого, искусственного камня, как бетон, является примером поиска совместимых материалов, имеющих максимальный эффект от такого сочетания в системе и технологии. Разработка новых научных и методологических подходов в такой многофункциональной синтезированной системе «состав – процесс – структура – свойство» позволит на выходе получить недостижимые ранее показатели строительных композитов. И, безусловно, одним из самых важных факторов, влияющих на свойства многокомпонентных систем, является совместимость их компонентов.

Известны достаточно успешные технологические решения задач обеспечения совместимости или снижения несовместимости компонентов бетона: цементы, эффективные в условиях термообработки; компоненты пуццоланового действия для нейтрализации реакции заполнитель-щелочь; специальные добавки, предотвращающие усадку, коррозию арматуры, высолообразование и др. [1,3,5,7].

Постановка задачи. В настоящее время тенденция развития бетоноведения направлена на разработку мультикомпонентных систем с использованием бинарных порошков-

наполнителей в тонкодисперсном состоянии, двух- или трехфракционированных крупных и мелких заполнителей. Использование бетонов на чистом портландцементе утрачивает значимость, мы стремимся получать композиты на смешанных вяжущих с использованием минеральных добавок различного происхождения и высокоэффективных ПАВ [2,4,6,8].

Многокомпонентность системы – это способность комплексного применения гетерогенных дисперсных систем, с целью их единого взаимодействия, с учетом таких факторов, как строение, морфология, состав, свойства, условия твердения, образования структуры и формирования свойств. Следовательно, каждый компонент системы должен быть полифункциональным. А такой аспект, как функция, предусматривает исходное назначение компонентов с учетом дальнейших изменений, происходящих в результате взаимодействия.

Совместимость многокомпонентной системы «портландцемент – химическая добавка» считается наиболее часто встречающейся в настоящее время, так как современное бетоноведение осваивает новейшие суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и акрилатов. Многочисленные работы в этой области [8,9,11-15] установили факт, что совместимость нужно рассматривать, исследуя реологию смесей с добавками, по показателю сохраняемости достаточно подвижных смесей. Если жизнеспособность бетонной смеси не изменяется через 2-3 часа добавку можно считать совместимой.

Также изучено влияние минералогического и химического составов портландцементного клинкера, удельной поверхности, негативных окислов и др. факторов на реологическую совместимость, которая основывается на электростатическом и/или стерическом механизмах взаимного отталкивания частиц портландцемента, из-за адсорбированных на их поверхности молекулах ПАВ [16-20].

Вопросы совместимости компонентов многокомпонентных систем зачастую являются противоречивыми, и могут проявляться неуправляемые эффекты, такого плана, как замедленное нарастание прочностных показателей в начальные сроки схватывания, высокое воздуховлечение и прочее. Многокомпонентные системы «портландцемент – ПАВ» носят весьма сложный характер [21-25], и совместимость можно охарактеризовать, как способность частиц ПАВ при взаимодействии с компонентами цементной системы определять заданные технологические свойства формовочных смесей и бетонов в течение определенного времени. Исследуя совместимость «портландцемент – ПАВ» с термокинетической точки зрения [8,17,18] акцент уделяется содержанию в составе клинкера алюминатов кальция, так как именно оно влияет на степень функционирования ПАВ в системе. Также отмечается влияние сульфатов в комплексе с алюминатами на совместимость с добавками.

В США действует нормативный документ C1679–08 на определение кинетики процессов гидратации гидравлических вяжущих систем [10] на оценку совместимости минеральных и химических компонентов с цементами. В дальнейшем будем надеяться, что вопросы исследования совместимости многокомпонентных систем найдут развитие этого направления, тем самым повысится технологическая эффективность.

Методы исследования. Рассмотренные выше подходы трактовали вопросы совместимости многокомпонентных систем «портландцемент – ПАВ», но еще одной достаточно важной и малоизученной является система «минеральный порошок – щелочной раствор – ПАВ». Для изучения вопросов совместимости наполненных многокомпонентных систем были разработаны рецептуры бесклинкерных вяжущих щелочной активации. В качестве минерального порошка использовали окремненный мергель Веденского месторождения Чеченской Республики. Окремненный мергель, или опока, состоит из опала с примесями глинистых минералов, минеральных зерен и скелетов микроорганизмов, химический состав в %: $\text{CO}_2 = 31,49$; $\text{MgO} = 0,41$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,20$; $\text{SiO}_2 = 28,53$; $\text{K}_2\text{O} = 0,58$; $\text{CaO} = 35,92$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,86$.

Окремненный мергель характеризуется сбалансированным составом. Одновременное присутствие кальцита и кремнезема благоприятно скажется на свойствах многокомпонентной системы, но термическая обработка при температуре 700°C способствует получению фаз пере-

менного состава, схожих с природным минералом ларнитом Ca_2SiO_4 , что увеличит пуццолановую активность данной минеральной добавки, при взаимодействии с щелочным раствором и водой.

Изучение частиц термоактивированного при температуре 700°C кремненного мергеля методом электронно-зондовой микроскопии (рис. 1), показало, что структура частиц пластинчатая (размер частиц менее $1\text{-}5\text{ мкм}$), что на много меньше частичек портландцемента.

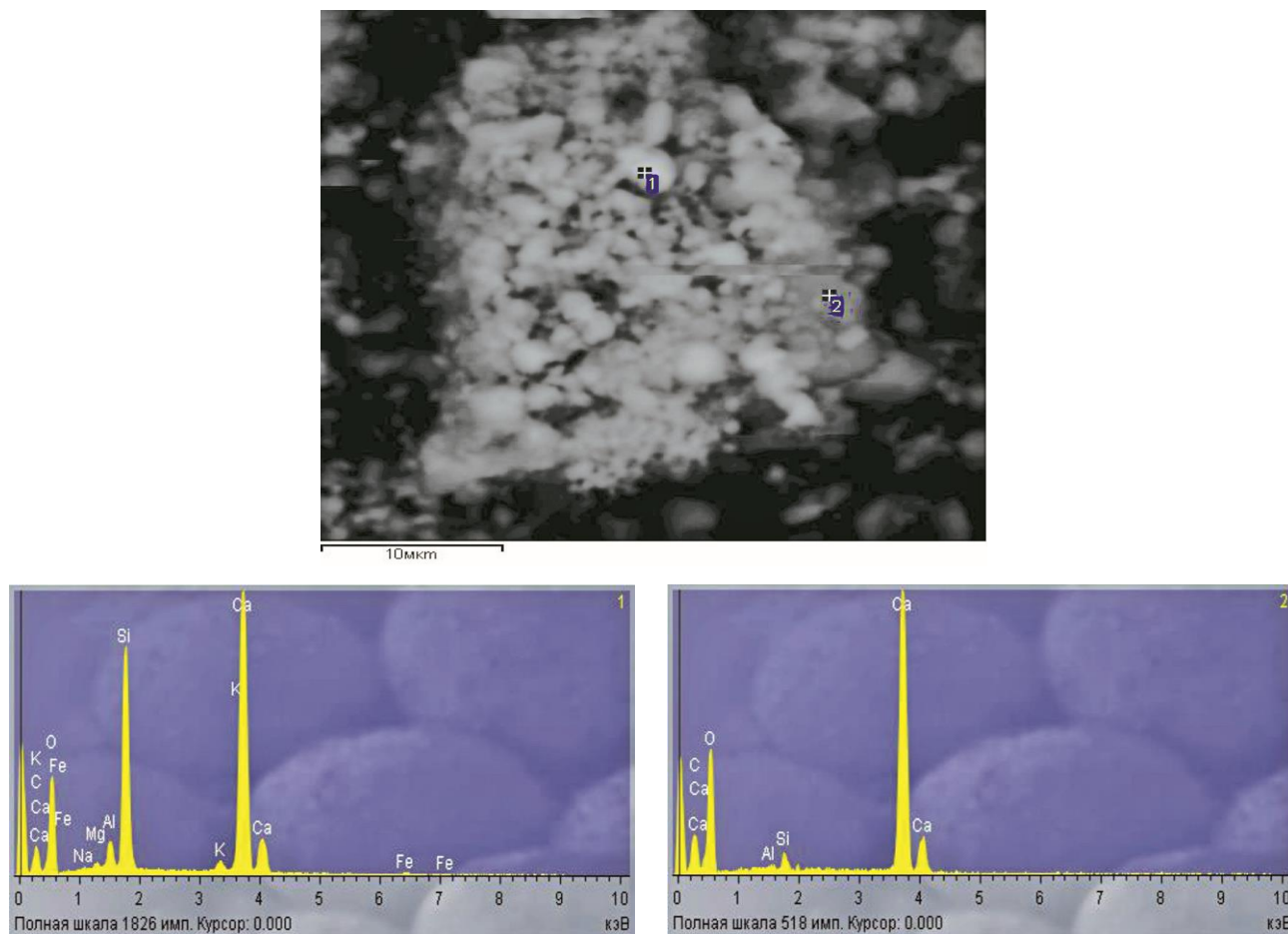


Рис. 1. Микрофотография и энергодисперсионный микроанализ кремненного мергеля 700°C
Fig. 1. Microphotography and energy dispersive microanalysis of silicified marl 700°C

Для приготовления многокомпонентной системы «термоактивированный мергель 700°C – ГКЖ-11 – щелочной активатор», были использованы тонкодисперсный порошок термоактивированного мергеля при 700°C , активированный метасиликатом натрия, также была использована кремнийорганическая жидкость – метилсиликонат натрия (ГКЖ-11) для улучшения свойств вяжущей композиции.

Исследуемый образец цементного камня бесклнкерного вяжущего щелочной активации (БВЩА) характеризуется однородной тонкокристаллической равномерно-кристаллической структурой (рис. 2 в). Присутствуют округлые замкнутые поры диаметром до $0.5\text{-}0.6\text{ мм}$ (рис. 2 а, б). Срастание частиц заполнителя с цементной массой тесное или с развитием микротрещин по границам частиц.

Обсуждение результатов. По результатам рентгенофазового анализа в цементном камне БВЩА с использованием термоактивированного мергеля при 700°C и метилсиликоната натрия, установлено присутствие кварца, близкого к альбиту полевого шпата, слюд, кальцита, цеолитов (рис. 3); в составе заполнителя присутствует также калиевый полевой шпат. Слюды соответствуют мусковиту.

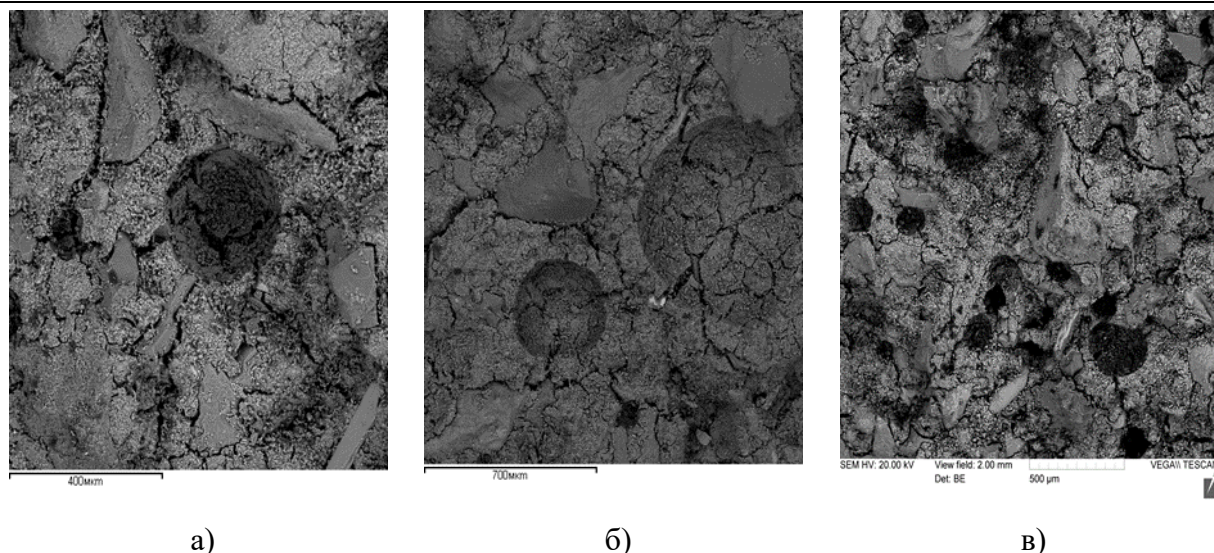


Рис. 2. Микростроение композиции на основе термоактивированного мергеля
Fig. 2. The microstructure of the composition based on thermally activated marl

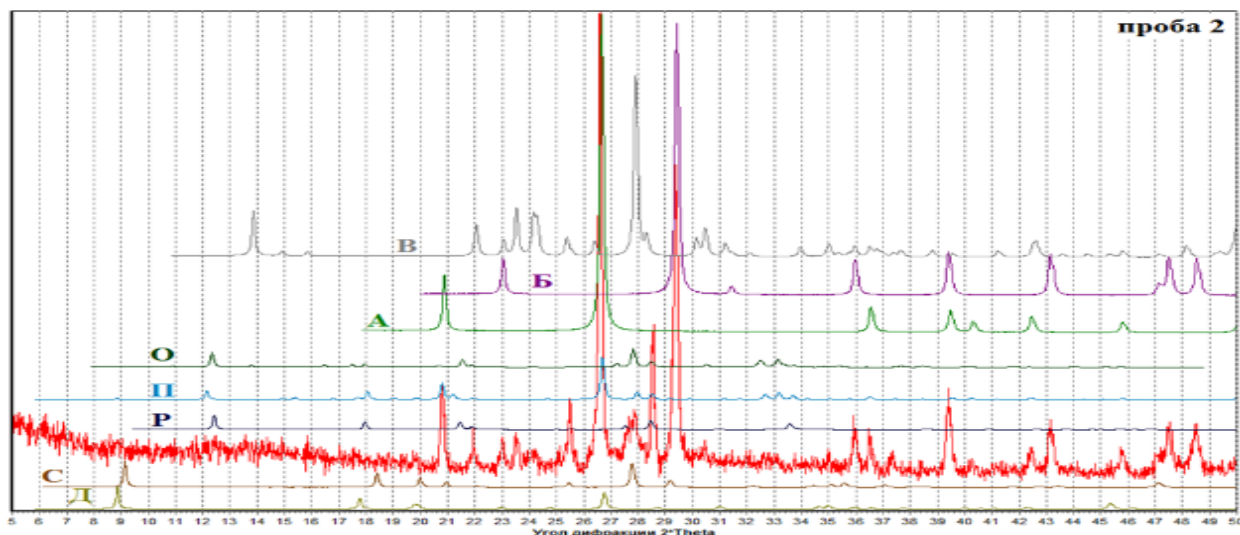


Рис. 3. Дифрактограмма образца цементного камня БВЩА с использованием термоактивированного мергеля при 700 °С и ГКЖ-11 в сопоставлении с данными базы PDF-2. Приведенные фазы сравнения: А – кварц, Б – кальцит, В – альбит, Д – мусковит, О – филлипсит, П – жисмондит, Р – гарронит, С - парагонит.

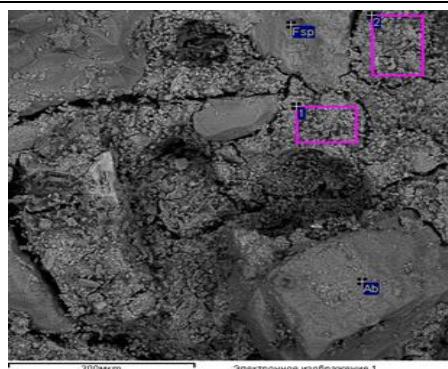
Fig. 3. Diffraction pattern of a BVShA cement stone sample using thermally activated marl at 700 °C and GKZh-11 in comparison with the data from the PDF-2 database. The comparison phases are as follows: A - quartz, B - calcite, B - albite, D - muscovite, O - phillipsite, P - jismondite, P - garronite, C - paragonite.

Цеолиты, рефлексы которых на дифрактограмме слабо проявлены в интервале $2\theta - 12-13^\circ$, слабо окристаллизованы (что подтверждается и результатами электронной микроскопии), по рентгеноструктурным параметрам близки к филлипситу или гаррониту.

Структура и состав цементного камня БВЩА с использованием термоактивированного мергеля при 700 °С и метилсиликоната натрия, однородные (рис. 4, табл. 1).

Таблица 1. Состав участков цементного камня, в вес. %
Table 1. The composition of the sites of cement stone, in weight. %

Спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	Итог
1	7.31	0.28	3.40	26.55	2.51	24.18	0.09	0.06	0.75	65.13
2	6.56	0.37	2.30	25.28	2.64	28.53	0.21		0.84	66.73



Спектр EDX

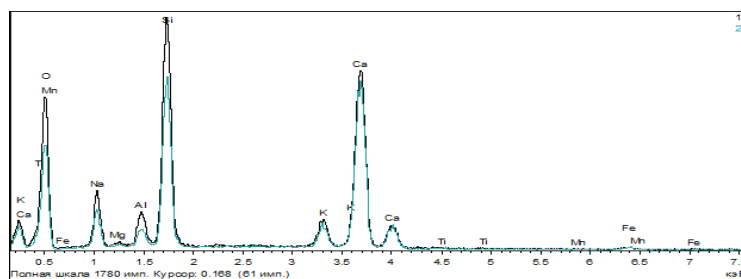
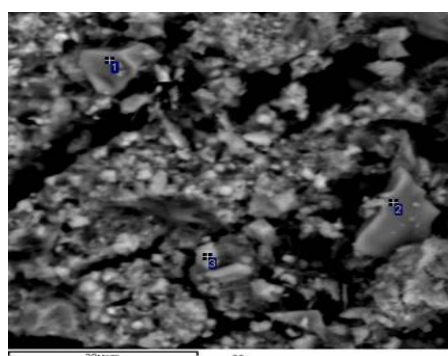


Рис. 4. Структура и участки анализа цементного камня (Ab – альбит, Fsp – калиевый полевой шпат)

Fig. 4. Structure and sites of analysis of cement stone (Ab - albite, Fsp - potassium feldspar)

Главными структурообразующими фазами (рис. 5) выступают гидраты натриевых алюмосиликатов кальция (табл. 2, анализ 1), близкие по составу к цеолитам фазы (табл. 2, анализ 2), карбонаты, вероятно, также $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Спектр EDX

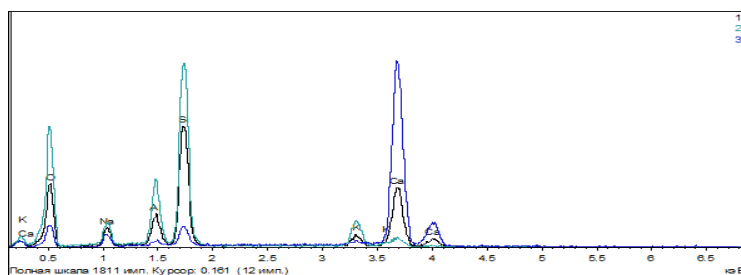


Рис. 5. Фазы основной массы

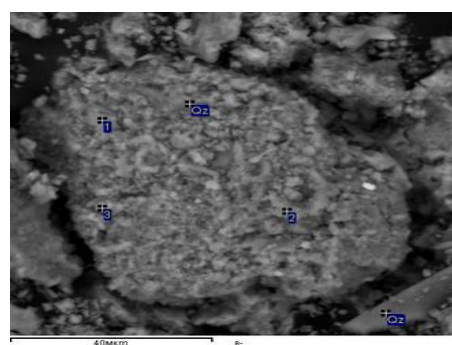
Fig. 5. The phases of the bulk

Таблица 2. Состав основных фаз, в вес. % (места анализа указаны на рис. 5)

Table 2. The composition of the main phases, in weight. % (places of analysis are shown in Fig. 5)

Спектр	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Итого
1	6.88	9.10	45.66	3.08	24.86	89.57
2	5.55	16.09	58.30	5.14	2.92	87.01
3	2.90	0.92	2.44	0.33	38.90	45.49

Местами развиты агрегаты гидратированных высококальциевых силикатов (рис. 6, 7, табл. 3), вероятно, исходно ларнитовые.



Спектры EDX

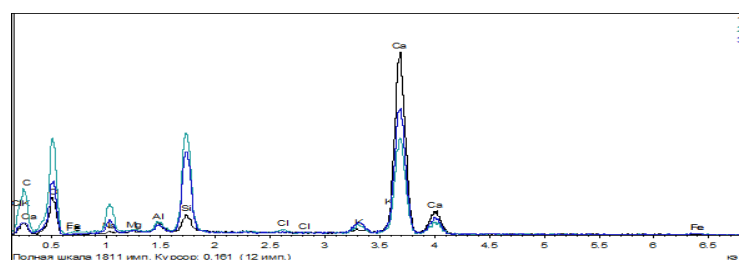


Рис. 6. Спектры EDX фаз основной массы Qz - кварц

Fig. 6. Spectra of the EDX phases of the bulk Qz - quartz

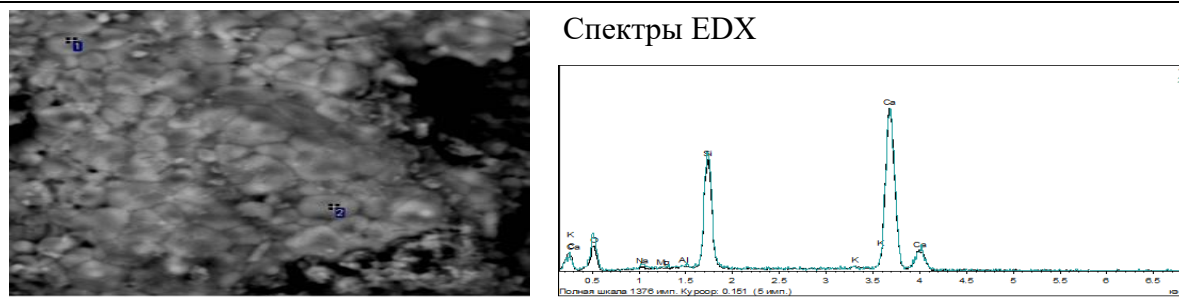


Рис. 7. Фазы высококальциевых гидратированных силикатов

Fig. 7. Phases of high calcium hydrated silicates

Таблица 3. Состав высококальциевых фаз, в вес. % (места анализа указаны на рис. 7)

Table 3. Composition of high calcium phases, by weight. % (places of analysis are shown in Fig. 7)

Спектр	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Итог
1	0.84	0.15	0.49	33.46	0.46	59.73	95.12
2	1.30	-	0.61	34.44	0.24	57.91	94.51

Вывод. По результатам рентгенофазового анализа в цементном камне БВЩА с использованием термоактивированного мергеля при 700 °С и метилсиликоната натрия, обнаружено присутствие кварца, близкого к альбиту полевого шпата, слюд, кальцита, цеолитов, по рентгеноструктурным параметрам близких к филлипситу или гаррониту.

В составе заполнителя присутствует также калиевый полевой шпат. Слюды соответствуют мусковиту. Результаты проведенных исследований подтверждают совместимость всех компонентов многокомпонентной системы «минеральный порошок – щелочной затворитель – ПАВ», а предлагаемый технологический прием позволит получать прочные и долговечные строительные композиты по бесклнкерной технологии, без применения дорого и энергоемкого портландцемента.

Библиографический список:

1. Соломатов В.И. Цементные композиции с бинарным наполнителем / В.И. Соломатов // Известия ВУЗов. Строительство. - 1995. - №9. - С.32-37.
2. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, Volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.
3. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. pp.707-714.
4. Baert, G. Mechanical and thermal behaviour of alkali -activated high volume fly ash concrete / G. Baert, N. De Belie, J. Kratky, A. Ivens, I. Van Driessche, G. De Schutter // Non-Traditional Cement & Concrete III. Proceedings of the International Symposium(Brno) - 2008. pp.57-66.
5. Palomo A. Alkali activated fly ashes. A cement for the future / A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco // Cement and Concrete Research. - 1999. -№29.pp.1323-1329.
6. Shi C. Early microstructure development of activated lime-fly ash paste / C. Shi // Cement and Concrete Research. - 1996. - №26(9). pp.1351-1359.
7. Bakharev T. Geopolimeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing / T. Baldiarev // Cement and Concrete Research. — 2005.-№35. pp.1224-1232.
8. Ущеров-Маршак А.В., Першина Л.А. Циак М. Совместимость цементов с химическими и минеральными добавками. Ч. I / А.В. Ущеров-Маршак, Л.А. Першина, М. Циак // Цемент. 2002. № 6. С. 6–9; ч. II. Количественная оценка // Цемент. 2003. № 1. С. 38–40.
9. Kerton F. Perspectives of market slag cements in Europa / F. Kerton // Cement. - 2006. - №5. pp. 12-17.
10. ASTM C1679–08. Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry.
11. Удодов С.А., Черных В.Ф., Черный Д.В. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого бетона // Сухие строительные смеси. – 2008. – № 3. – С.70.
12. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete //B сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018. P. 04018.
13. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centri-

- fuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule*. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. P. 337.
14. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // *MATEC Web of Conferences* Cep. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. P. 05011.
 15. Солдатов А.А., Сариев И.В., Жаров М.А., Абдураимова М.А. Строительные материалы на основе жидкого стекла // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности Материалы IV-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Н.И. Стоянов (ответственный редактор). 2016. – С.192-195.
 16. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х. Исследование свойств бетонов на бесклнкерных вяжущих // Перспективы развития топливно-энергического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России, посвященная 105-летию М. Д. Миллионщикова: материалы Всероссийской научно – практической конференции 11-12 июня 2018 г. – Грозный: ФГБОУ ВО «ГГНТУ», 2018. – С.392 – 399.
 17. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.*
 18. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. pp.707-714.
 19. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. – 2018. – №2 (Т.46). – С. 65 –70.
 20. Никифоров Е.А., Логанина В.И., Симонов Е.Е. Влияние щелочной активации на структуру и свойства диатомита / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. – № 2. – С.30-32.
 21. Murtazaev S-A.Y., Mintsaeu M.Sh., Aliev S.A., Saydumov M.S. "Strength and Strain Properties of Concrete, Comprising Filler, Produced by Screening of Waste Crushed Concrete", Published by Canadian Center of Science and Education. Received, Vol. 9, № 4, pp.32-44, 2015.
 22. Murtazaev S-A.Y., Zaurbekov Sh.Sh., Alaskhanov A.Kh., Saydumov M.S. "Impact of Technogenic Raw Materials on the Properties of High-Quality Concrete Composites", International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018). *Advances in Engineering Research*, Vol.177, pp.275-279, 2018.
- References:**
1. Solomatov V.I. Tsementnyye kompozitsii s binarnym napolnitelem / V.I. Solomatov // *Iz-vestiya VUZov. Stroitel'stvo*. - 1995. - №9. - S.32-37. [Solomatov V.I. Binary filler cement compositions / V.I. Solomatov // *Proceedings of universities. Construction*. - 1995. No. 9. pp. 32-37. (In Russ.)]
 2. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.*
 3. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. pp.707-714.
 4. Baert, G. Mechanical and thermal behaviour of alkali -activated high volume fly ash concrete / G. Baert, N. De Belie, J. Kratky, A. Ivens, I. Van Driessche, G. De Schutter // *Non-Traditional Cement & Concrete III. Proceedings of the International Symposium(Brno) - 2008*. pp.57-66.
 5. Palomo A. Alkali activated fly ashes. A cement for the future / A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco // *Cement and Concrete Research*. - 1999. -№29. pp.1323-1329.
 6. Shi C. Early microstructure development of activated lime-fly ash paste / C. Shi // *Cement and Concrete Research*. - 1996. - №26(9). - pp.1351-1359.
 7. Bakharev T. Geopolimetric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing / T. Baldiarev // *Cement and Concrete Research*. — 2005.-№35. pp.1224-1232.
 8. Ushero-Marshak A.V., Pershina L.A. Tsiak M. Sovmestimost' tsementov s khimicheskimi i mine-ral'nymi dobavkami. CH. 1 / A.V. Ushero-Marshak, L.A. Pershina, M. Tsiak // *Tsement*. 2002. № 6. S. 6–9; ch. II. Kolichestvennaya otsenka // *Tsement*. 2003. № 1. S. 38–40. [Ushero-Marshak A.V., Pershina L.A. Tsiak M. Compatibility of cements with chemical and mineral additives. Part 1 / A.V. Ushero-Marshak, L.A. Pershina, M. Tsiak // *Cement*. 2002. No 6. S. 6–9; part II. Quantitative assessment // *Cement*. 2003. No 1. pp. 38–40. (In Russ.)]
 9. Kerton F. Perspectives of market slag cements in Europa / F. Kerton // *Cement*. - 2006. - №5. pp. 12-17.
 10. ASTM C1679–08. Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry.
 11. Udodov S.A., Chernykh V.F., Cherny D.V. Primeneniye poristogo zapolnitelya v otdelochnykh so-stavakh dlya yacheistogo betona // *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. – 2008. – № 3. – S.70. [Udodov S.A., Chernykh V.F., Cherny D.V. The use of porous aggregate in finishing compositions for aerated concrete // *Dry building mixtures*. 2008. No. 3. p.70. (In Russ.)]
 12. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete // В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Cep. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018. P. 04018.
 13. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // *Physics and Mechanics of New Materials*

- and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. P. 337.
14. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Cep. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. P. 05011.
 15. Soldatov A.A., Sariyev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Stroitel'nyye materialy na osno-ve zhidkogo stekla // V sbornike: Aktual'nyye problemy stroitel'stva, transporta, mashinostroyeniya i tekhnosfernoy bezopasnosti Materialy IV-y yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. N.I. Stoyanov (otvetstvennyy redaktor). 2016. – S.192-195. [Soldatov A.A., Sariyev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Building materials based on liquid glass // In the collection: Actual problems of construction, transport, engineering and technosphere safety Materials of the IVth annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University. N.I. Stoyanov (executive editor). 2016. pp. 192-195.16. (In Russ.)]
 16. Murtazayev S-A.YU., Salamanova M.SH., Saydumov M.S., Alaskhanov A.KH. Issledovaniye svoystv betonov na besklinkernykh vyazhushchikh // Perspektivy razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa i sovremennoye sostoyaniye neftegazovogo inzhenernogo obrazovaniya v Rossii, posvyashchennaya 105-letiyu M. D. Milli-onshchikova: materialy Vserossiyskoy nauchno – prakticheskoy konferentsii 11-12 iyunya 2018 g. – Groznyy: FGBOU VO «GGNTU», 2018. – S.392 – 399. [Murtazayev S.-A.U., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Alaskhanov A.Kh. A study of the properties of concrete with clinker-free binders // Prospects for the development of the fuel and energy complex and the current state of oil and gas engineering education in Russia, dedicated to the 105th anniversary of M.D. IN "GSTU", 2018. pp.392 - 399. (In Russ.)]
 17. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.
 18. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. pp.707-714.
 19. Murtazayev S-A.YU., Salamanova M.SH. Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoy prirody // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. – 2018. – №2 (T.46). – S. 65 –70. [Murtazayev S.-A.U., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature // Volga Scientific Journal. 2018. No. 2 (T.46) . pp. 65 –70. (In Russ.)]
 20. Nikiforov Ye.A., Loganina V.I., Simonov Ye.Ye. Vliyaniye shchelochnoy aktivatsii na strukturu i svoystva diatomita / Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2011. – № 2. – S.30-32. [Nikiforov E.A., Loganina V.I., Simonov E.E. The effect of alkaline activation on the structure and properties of diatomite / Bulletin of BSTU. V.G. Shukhov. 2011. - No. 2. - pp.30-32. (In Russ.)]
 21. Murtazayev S-A.Y., Mintsayev M.Sh., Aliev S.A., Saydumov M.S. "Strength and Strain Properties of Concrete, Comprising Filler, Produced by Screening of Waste Crushed Concrete", Published by Canadian Center of Science and Education. Received, Vol. 9, № 4, pp.32-44, 2015.
 22. Murtazayev S-A.Y., Zaurbekov Sh.Sh., Alaskhanov A.Kh., Saydumov M.S. "Impact of Technogenic Raw Materials on the Properties of High-Quality Concrete Composites", International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018). Advances in Engineering Research, Vol.177, pp.275-279, 2018.

Сведения об авторах:

Саламанова Мадина Шахидовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства; e-mail: madina_salamanova@mail.ru

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства; e-mail: s.murtazaev@mail.ru

Батаев Дена Карим-Султанович, доктор технических наук, профессор, директор; e-mail: kniiran@mail.ru

Аласханов Арби Хамидович, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства, e-mail: alaskhanov@mail.ru

Information about the authors:

Madina Sh. Salamanova, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Construction Technology;

e-mail: madina_salamanova@mail.ru

Said-Alvi Yu. Murtazaev, Dr. Sci. (Technical). Prof., Head of the Department of Construction Technology;

e-mail: s.murtazaev@mail.ru

Dena K-S. Bataev, Dr. Sci. (Technical). Prof., Director e-mail: kniiran@mail.ru

Arbi Kh. Alaskhanov, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Construction Technology;

e-mail: alaskhanov@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.12.2019.

Принята в печать 29.12.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 07.12.2019.

Accepted for publication 29.12.2019.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом **«Библиографический список»**. Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на

английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и 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 образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

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 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 Imama Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64.

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 47– №1 – 2020.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 47, No.1, 2020.

Верстка: Шагина С.Б.

Перевод: Попова Н.Г.

Адрес редакции:

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

Тел./факс(8722)623715

(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Svetlana B.Shagina

Translation: Natalya G.Popova

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 27.03.2020г. Сдано в печать 31.03.2020г.

Формат 60х84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 15,00 Уч. изд.л. 15,00

Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.

