

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 46, №3, 2019.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 46, No.3, 2019.

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; Google Scholar; 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», 2019.

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; CyberLeninca.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2019.

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

ВЕСТИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 46, № 3, 2019

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 WBH, г. Берлин, Германия.

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

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 гидроневмоагрегаты 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 46, №3 Махачкала, 2019 – 181с.

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

Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОНОМИЧНОМ СВЕТОТРАНЗИСТОРЕ8

Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Рагимова Т.А., Магомадов Р.А.-М.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВНУТРИПОЛОСТНОЙ ГИПОТЕРМИИ20

Татаренко Ю.В., Мизин В.М., Рачковский Н.О.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕХНИКЕ32

Хазамова М.А., Магомедов Д.А., Кобзаренко Д.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕПЛООВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТОПУ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ43

Юсуфов Ш.А., Базаев А.Р., Бидалов Б.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАТОРА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА
В СОСТАВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ53

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ66

Асланов Г.К., Казибекоев Р.Б., Мирзабеков Т.М., Мусаилов Р.Р.

ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АЭРОДРОМНЫХ
КВАЗИДОПЛЕРОВСКИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ66

Бизянов Е.Е., Гутник А.А.

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ
НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ79

Каднова А.М.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СВОЕВРЕМЕННОСТИ
ВЫПОЛНЕНИЯ ТИПОВЫХ ОПЕРАЦИЙ АДМИНИСТРАТОРОМ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ
ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ87

Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С., Айгузов Т.Г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИТЕЛЯ С ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОТИВОФАЗНОГО
СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА97

Степанов О.И., Худякова С.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО
ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ108

Якунин А.Г.

ЭКСПРЕСС - МЕТОД НАЗЕМНОГО МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА 116

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА 129

Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А., Сайдумов М.С., Омаров А.О.

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ НАПОЛНЕННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ 129

Несветаев Г.В., Долгова А.В., Хаджишалапов Г.Н., Батдалов М.М.

О ВЛИЯНИИ ПОРИСТОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ, НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ 139

Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Исмаилова З.Х., Бисултанов Р.Г.

ПОЛУЧЕНИЕ БЕСКЛИНКЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ СИНТЕЗОМ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ СИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД 149

Соболь Б.В., Соловьев А.Н., Пайзулаев М.М., Рашидова Е.В., Муртазалиев Г.М.

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ УПРУГОГО КЛИНА, ПОДКРЕПЛЕННОГО ТОНКИМ ГИБКИМ ПОКРЫТИЕМ НА ЕГО СТОРОНАХ 159

Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Абакаров М.С., Алибеков М.С.

РАСЧЕТ СТОЙКОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПИРАМИДАЛЬНЫМ ДИСКРЕТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ К ДЕЙСТВИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 167

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ 177

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 6 , N o . 3 , 2 0 1 9 .

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. Davidyuk, 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. Nesvetayev, 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 Science. Vol. 46, No.3 Makhachkala, 2019 –181p. Published by decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Editor 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 ENGINEERING8

H.M. Gadzhiev, M.E. Akhmedov, S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova

THERMOELECTRIC PROCESSES IN AN EFFICIENT LIGHT-EMITTING TRANSISTOR8

T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.A. Hazamova, T.A. Ragimova, R.A.-M. Magomadov

THERMOELECTRIC DEVICE FOR INTRACAVITARY HYPOTHERMIA20

Y.V. Tatarenko, V.M. Misin, N.O. Rachkovsky

PREDICTION OF THE USE OF REFRIGERANTS IN LOW-TEMPERATURE EQUIPMENT32

M.A. Khazamova, D.A. Magomedov, D.N. Kobzareno

MODELLING THE EFFECT OF A THERMOELECTRIC DEVICE ON THE FOOT UNDER
AMBULATORY CONDITIONS43

Sh.A. Yusufov, A.R. Bazaev, B.A. Bilalov

STUDY OF A FLOWING-TYPE HEAT TRANSFER INTENSIFIER USED AS PART OF A
THERMOELECTRIC SEA WATER DESALINATION SYSTEM53

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT66

G.K. Aslanov, R.B. Kazibekov, T.M. Mirzabekov, R.R. Musaibov

SOFTWARE METHODS FOR INCREASING THE RELIABILITY OF AERODROME
QUASI-DOPPLER AUTOMATIC RADIO DIRECTION FINDERS66

E. E. Bisyanov, A. A. Gutnik

METHOD FOR OBTAINING THE PARAMETERS OF MEMBERSHIP FUNCTIONS OF FUZZY
SETS BASED ON REAL DATA FOR AUTOMATED INFORMATION PROCESSING SYSTEMS79

A.M. Kadnova

METHODICAL APPROACH TO EVALUATING THE PROBABILISTIC TIME PERFORMANCE
INDICATOR OF AUTOMATED ADMINISTRATOR OPERATIONS IN INFORMATION
PROTECTION SYSTEMS87

Z.N. Mirzaev, M.S. Guseynov, T.G. Aigumov

MATHEMATICAL MIXER MODEL WITH FORMATION OF HETERODYNE
ANTIPHASE SIGNAL97

O.I. Stepanov, S.A. Khudyakova

MODELLING OF EXTERNAL FIRE PROTECTION WATER SUPPLY SOURCES IN THE
SUBSTANTIATION OF SPECIAL TECHNICAL CONDITIONS108

A.G. Yakunin

EXPRESS MONITORING OF THE MAIN PARAMETERS OF CLOUDS FROM
 THE EARTH'S SURFACE 116

BUILDING AND ARCHITECTURE 129

A.Kh. Alaskhanov, T.S.-A. Murtazaeva, M.S Saidumov, A.O. Omarov

DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF FILLED INSULATORS BASED ON SECONDARY
 RAW FOR MONOLITHIC HIGH-STRENGTH CONCRETE 129

G.V. Nesvetaev, A.V. Dolgova, G.N. Khadzhishalapov, M.M. Batdalov

ON THE INFLUENCE OF THE POROSITY OF FINE-GRAINED CONCRETES AND DRY BUILDING
 MIXTURES ON CONTACT ZONE FROST RESISTANCE 139

M.Sh. Salamanova, S.-A.Yu. Murtazaev, Z.H. Ismailova, R.G. Bisultanov

OBTAINING CLINKERLESS CEMENTS THROUGH THE SYNTHESIS OF BASIC SOLUTIONS OF
 SODIUM SILICATE FROM SILICA-CONTAINING ROCKS 149

B.V.Sobol, A.N. Soloviev, M.M. Payzulaev, E.V. Rashidova, G.M. Murtazaliev

FEATURES OF STRESSES AT THE APEX OF AN ELASTIC WEDGE, SUPPORTED BY A THIN
 FLEXIBLE COATING ON THE SIDES 159

O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, M.S. Abakarov, M.S. Alibekov

ESTIMATION OF THE RESISTANCE OF A THREE-LAYERED STRUCTURE WITH A PYRAMID
 DISCONTINUOUS FILLER TO DYNAMIC STRESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD 167

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS 177

Для цитирования: Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А. Термоэлектрические процессы в экономичном светотранзисторе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 8-19. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

For citation: H.M. Gadzhiev, M.E. Akhmedov, S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova. Thermoelectric processes in an efficient light-emitting transistor. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 8-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОНОМИЧНОМ СВЕТОТРАНЗИСТОРЕ

Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А.

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

Резюме. Цель Разработка энергоэффективных светоизлучающих биполярных полупроводниковых структур. **Метод** Предложен метод трансформации термоэлектрического тепла в биполярных полупроводниковых структурах в электромагнитное излучение оптического диапазона. При этом сохраняется охлаждающий эффект на термоэлектрических переходах. Вместо электрического переноса информационного импульса от излучающего свет перехода база-эмиттер информация переносится на поглощающий свет переход база-коллектор фотонами напрямую или после многократного переотражения от зеркальных металлических электродов. **Результат** Принцип излучения светодиода позволяет реализовать оптопару в пределах одного электронного компонента. В отличие от обычных оптопар, которые дискретно в пространстве разделены, здесь они интегрально объединены в пределах одного электронного компонента. В результате светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции. **Вывод** Светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят не только повысить надежность работы электронных компонентов в широком диапазоне эксплуатационных характеристик, но и повысить энергоэффективность за счет применения рекуперации оптического излучения. Перспективы развития световых экономичных транзисторов позволяют не только повысить степень интеграции, а значит, и увеличить производительность процессоров, но и снизить энергозатраты на системы охлаждения и на систему питания самого устройства.

Ключевые слова: светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры, оптическое излучение, рекуперация, энергоэффективный, зеркальный электрод

THERMOELECTRIC PROCESSES IN AN EFFICIENT LIGHT-EMITTING TRANSISTOR

H.M.Gadzhiev, M.E. Akhmedov, S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova

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

Abstract Objectives Development of energy-efficient light-emitting bipolar semiconductor structures. **Method** A method for transforming thermoelectric heat in bipolar semiconductor structures into optical-range electromagnetic radiation, which preserves the cooling effect on thermoelectric transitions, is proposed. Instead of transferring the information impulse electrically from the base-emitter light-emitting transition, the information is transferred directly to the light-absorbing base-collector transition by photons or following multiple re-reflections from mirror metal electrodes. **Results** Unlike conventional optocouplers discretely separated in space, the novel optocouplers described in the article are integrated into a single electronic component using the principle of LED radiation. As a result, light-emitting bipolar semiconductor structures will result in the creation of more powerful, faster and better integrated devices. **Conclusion** Light-emitting bipolar semiconductor structures will not only increase the reliability of electronic components across a wide range of performance characteristics, but also increase energy efficiency through the use of optical radiation recovery. The future development of light-efficient transistors improves integration and increases processor performance, at the same time as reducing the power consumption of the cooling system and the power supply of the device itself.

Keywords: Light-emitting bipolar semiconductor structures, optical radiation, recovery, energy-efficiency, mirror electrode

Введение. Современный уровень развития электроники основывается на широкой номенклатуре пассивных и активных элементов на основе полупроводниковых кристаллов [1, 3 - 9]. Наиболее широкое распространение получили полевые и биполярные структуры в виде диодов, транзисторов, тиристоров и других электронных компонентов.

В основе биполярных структур находится взаимодействие полупроводниковых материалов с различными электронными проводимостями. Если в четырехвалентный полупроводник типа германий, кремний или углерод внести трехвалентную примесь, то возникнет акцепторная проводимость с вакансией недостающего четвертого электрона. Таким образом, возникает дырочная проводимость. Если же внести пятивалентную примесь, то лишний пятый электрон для полупроводниковой четырехвалентной структуры будет играть роль донорной структуры. Электронная проводимость позволит осуществлять перенос зарядов непосредственно каждому электрону, в то время как в дырочной проводимости виртуальный мнимый перенос положительных зарядов осуществляется каждый раз перескоком нового электрона и образованием новой вакансии дырки.

Возможны комбинированные структуры на основе арсенид-галлия, когда трех- и пятивалентная структура в среднем создает четырехвалентную структуру полупроводниковую, а та или иная проводимость в виде электронной или дырочной осуществляется при помощи изменения концентрации и соотношения этих трех и пятивалентных примесей [2]. Такая структура является наиболее современной для формирования новой компонентной базы. На основе этих структур широкое распространение получили биполярные транзисторы.

Постановка задачи. Недостатком биполярных транзисторов является то, что перенос энергии в них осуществляется через Джоулевы потери, выражающиеся в виде паразитных тепловыделений, и требующие значительные ресурсы отводить на то, чтобы тепловую энергию отвести из рабочей зоны кристалла для предотвращения теплового пробоя. Однако инерцион-

ность тепловых процессов не позволяет данную процедуру осуществить быстро, и это является существенным препятствием для формирования мощных переключающих элементов. Также это же препятствие возникает и при попытке создать сверхбольшие интегральные схемы, в которых на единицу площади приходится большое количество переключающих элементов. Каждый элемент, даже при незначительных тепловыделяющих паразитных выделениях, в результате интеграции всех действующих компонентов приводит к тому, что на малой площади выделяется очень большая тепловая энергия, а это является препятствием для дальнейшей интеграции и повышения степени компоновки электронных схем.

Для предотвращения этого недостатка необходимо изменить структуру самого полупроводникового компонента. Основной проблемой является тепловыделение, то есть оно возникает за счет обычного Джоулевого тепловыделения при прохождении электрического тока через полупроводниковую структуру p и n типа, а также за счет в основном эффекта Пельтье при разности энергии электронов в одном и другом типе полупроводника.

Методы исследования. Если электрон переходит из полупроводника, в котором его энергия выше, в полупроводник, в котором его энергия ниже, то после рекомбинации избыток энергии электрона передается атому, и он приобретает большую энергию, – а это и означает нагрев этой зоны. Если же наоборот, электрон переходит из зоны, в которой имел меньшую энергию, в зону, в которой он должен иметь большую энергию, или комбинирует на место вакансии, то в этом случае происходит поглощение энергии атома, он замедляется, – и это вызывает охлаждающий эффект в таком переходе. В биполярном транзисторе присутствуют оба типа по выделению и поглощению тепла. В одном переходе p - n выделяется тепло, в другом n - p поглощается тепло.

Данную структуру можно дополнить, если использовать свойства полупроводниковых светодиодов. При гораздо большей разнице, чем в обычных p - n переходах, разница энергии в полупроводниковых светодиодах при переходе электрона из одной зоны в другую в виде избытка энергии может выделяться не в виде тепла, то есть приобретение атомом энергии, а в виде испускания фотонов, как инфракрасного диапазона, так и более энергичных: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового и ультрафиолетового диапазона [10, 11]. Самой большой энергией обладают ультрафиолетовые светодиоды, в которых наибольший перепад уровней энергии между p - n переходами способствует при перемещении электрона из одной зоны в другую испусканию фотонов ультрафиолетового диапазона [16].

Таким образом, вместо того, чтобы атом приобретал тепловую энергию, он испускает световую энергию, которую в дальнейшем можно использовать по назначению в виде полезной энергии либо для рекуперации.

На рис. 1 приведена схема экономичного светотранзистора. Биполярный светотранзистор состоит из n - p - n структур [14, 15].

База на схеме представлена позицией 1. Она имеет кольцевую форму и присоединяется к полупроводнику типа p , находящемуся в середине между двух полупроводников типа n . Полупроводник типа p обозначен на рисунке позицией 4. Роль коллектора выполняет полупроводник типа n , обозначенный позицией 3. Электрод коллектора обозначен позицией 2, который представляет из себя металлический зеркальный электрод. Эмиттер обозначен структурой полупроводника n -типа и обозначен позицией 5 на рис.1.

Электрод непосредственно эмиттера обозначен позицией 6 и тоже представляет зеркальную металлическую структуру. Роль диэлектрика между базой, эмиттером и коллектором в виде металлических электродов выполняют диэлектрические прослойки, обозначенные позицией 7.

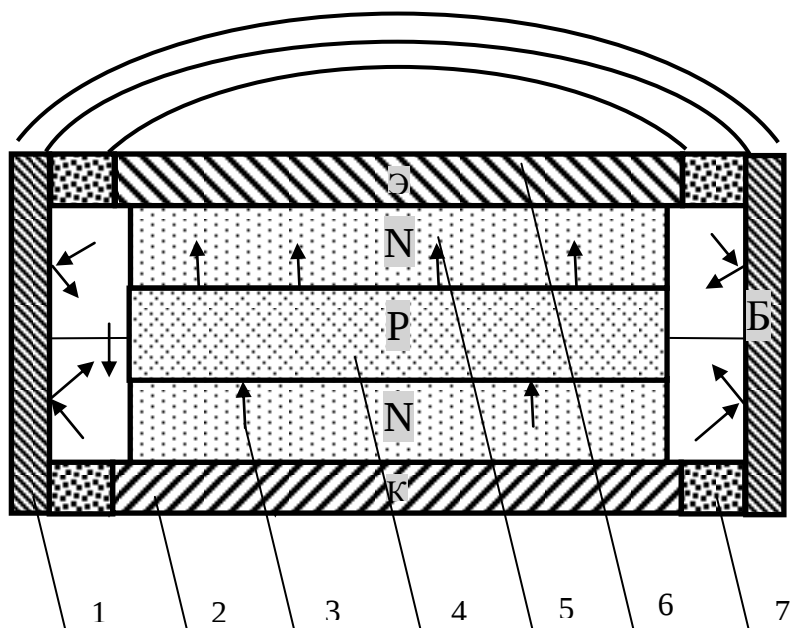


Рис.1. Схема экономичного светотранзистора
Fig. 1. Cost effective light transistor circuit

Функционирует светотранзистор следующим образом. При прохождении тока из зоны n в зону p от эмиттера к базе перепад энергии электрона приводит к тому, что избыток энергии должен превращаться в избыточное тепловое движение атома, но, так как перепад энергии выбран больше, то этот переход приобретает свойства светоизлучающего перехода, и избыток энергии испускается в виде фотонов, не нагревая непосредственно переход [12, 13].

Примером могут послужить светодиодные светильники, которые обладают гораздо большей яркостью при меньших тепловых выделениях за счет более экономичного преобразования электричества в оптическую энергию при меньших затратах на тепловую энергию. Фотоны не могут покинуть внутреннюю поверхность светотранзистора, так как со всех сторон находятся зеркальные электроды. Сами p - n - p структуры выполнены из арсенид-галлия и прозрачны для фотонов. Поэтому фотоны будут многократно отражаться, пересекая многократно внутренний объем светового транзистора. По достижению второго перехода база-коллектор, выполненного в виде солнечной батареи, они будут генерировать электронные пары дырка-электрон, которые будут дрейфовать в разные зоны и создавать электрический потенциал, то есть энергия фотонов вновь преобразуется в электрический сигнал уже на коллекторе. В результате то, что раньше превращалось в паразитную тепловую энергию в таком транзисторе будет преобразовываться в полезную энергию, причем, если в обычном биполярном транзисторе электрический сигнал проходил в виде электронов, дрейфующих со скоростью десятые доли миллиметра в секунду через полупроводниковые структуры, то в этом экономическом световом транзисторе перемещение полезного сигнала будет осуществляться со скоростью света, то есть увеличено на много порядков быстродействие такой структуры. Фотоны, так или иначе, не могут покинуть пределы этого транзистора, и поэтому все они рано или поздно на переходе база-коллектор, выполненном в виде солнечной батареи, будут преобразованы в электрический полезный сигнал.

Таким образом, паразитные тепловые потери будут рекуперированы в полезный электрический сигнал, и коэффициент полезного действия такого транзистора будет гораздо выше. Только малая часть тепловых потерь будет в нем использована. Всё остальное будет полезной энергией, причем это будет сопровождаться повышением быстродействия. Такой транзистор позволит как увеличить мощность переключающих элементов, так и увеличить степень интеграции сверхбольших интегральных схем при сохранении тепловых режимов в допустимых пределах.

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma} &= P_{ЭБ} + P_{\Phi} + P_{ДЖ} \\
 P_{ЭБ} &= U_{ЭБ} I_{ЭБ} \sim 5\% \\
 P_{\Phi} &= h\nu N_{\Phi}, \rightarrow 90\% \\
 P_{ДЖ} &= I_{ЭБ}^2 R_{ЭБ}, \sim 5\%, \text{ где } R_{ЭБ} \rightarrow 0 \\
 P_{\Phi БК1} &= \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{БК}}{100\%} \\
 P_{\Phi БК2} &= \left(P_{\Phi} - \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{БК}}{100\%} \right) \frac{\text{КПД}_{БК}}{100\%} \\
 P_{\Phi БК3} &= \left(P_{\Phi} - \left(\left(P_{\Phi} - \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{БК}}{100\%} \right) \frac{\text{КПД}_{БК}}{100\%} \right) \right) \frac{\text{КПД}_{БК}}{100\%} \\
 P_{БК\Sigma} &\sim 90\% \\
 J_{БЭ} &\sim J_{БК} \\
 P_{\Sigma БК} &= P_{\Phi БК} + P_{БК \text{ Эл}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Баланс мощностей приведен в формуле, где P суммарное состоит из мощности электрического тока между эмиттером-базой и мощности энергии излучающихся фотонов и небольшой мощности Джоулевых паразитных тепловыделений. На долю электрической мощности между эмиттером и базой, приведенной в формуле, приходится не более 5%. Она складывается из произведения напряжения между эмиттером и базой и током эмиттер-база. Часть этого тока ответвляется в сторону базы, а основная часть тока следует дальше в сторону коллектора. Энергия фотонов складывается из постоянной Планка, частоты излучения и количества фотонов и составляет в светодиодной структуре до 90%. Частота чем выше, тем лучше, то есть, если использовать ультрафиолетовый диапазон, то эффективность такой структуры будет намного выше. Паразитные Джоулевы тепловыделения складываются из квадрата тока эмиттер-база и сопротивления между эмиттером и базой. И для полупроводниковых структур на основе арсенида галлия, выполненного в виде тонкой пленки, сопротивление стремится к нулю, поэтому общие потери будут не более 5%. Для того чтобы оценить преобразование, обратное фотонов в энергию полезного сигнала между базой и коллектором, то есть ту часть энергии, которая достигла коллектора, необходимо рассмотреть несколько циклов.

В момент первого прохождения фотонов в формуле приведена доля мощности, которая получается за счет коэффициента полезного действия солнечной батареи на основе перехода база-коллектор. КПД может достигать 18%. Но в данном случае это неважно, так как в основном экономичность батареи будет осуществляться не за счет однократного преобразования, а за счет специальной формы концентратора фотонов, который не позволяет фотонам покинуть пределы солнечной батареи и заставляет их многократно проходить через эту солнечную батарею до их полного преобразования в электричество. Таким образом, даже незначительный КПД позволяет реализовать практически стопроцентное преобразование фотонов.

В формуле приведено, что при втором прохождении фотонов доля полученной энергии будет меньше. В следующей формуле приведено соотношение для третьего прохождения фотонов и так далее. С каждым прохождением количество фотонов уменьшается, но со временем оно будет стремиться к нулю. Но если проинтегрировать все эти значения, то получим, что практически вся энергия фотонов, которые были испущены переходом база-эмиттер, будет поглощена на переходе солнечной батареи база-коллектор и составит в пределах 90% общей мощности батареи. Ток база-эмиттер приблизительно соответствует базе-коллектору за небольшим вычетом той части тока, которая ушла в сторону базы. Баланс мощностей для базы-коллектора приведен в формуле и состоит из мощности фотонов на базе-коллекторе и электрической мощности на базе-коллекторе.

Для того чтобы представить графически этот процесс и показать, что оптимизация позволит увеличить силу тока приведен график на рис.2.

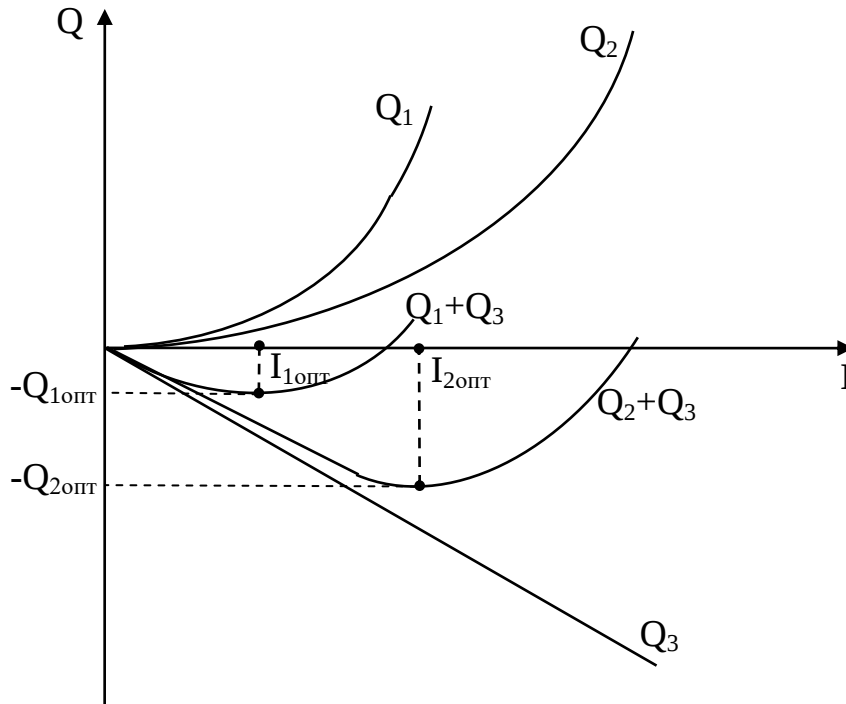


Рис. 2 Зависимость количества теплоты Джоуля (Q_1 и Q_2) и Пельтье (Q_3), поступающей на холодный спай от тока (I):

Fig. 2 Dependence of the amount of Joule heat (Q_1 and Q_2) and Peltier (Q_3) entering the cold junction on the current (I):

Q – теплота, приходящая на холодный спай термоэлемента,

Q_1 – кривая теплоты Джоуля обычного термоэлектрического устройства,

Q_2 – кривая теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического устройства,

Q_3 – кривая теплоты Пельтье,

$-Q_{1\text{опт}}$ – оптимальное количество теплоты для обычного термоэлектрического устройства при оптимальном токе питания,

$-Q_{2\text{опт}}$ – оптимальное количество теплоты для излучающего термоэлектрического устройства при оптимальном токе питания,

Q_1+Q_3 – сумма теплоты Джоуля обычного термоэлектрического устройства и теплоты Пельтье,

Q_2+Q_3 – сумма теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического устройства и теплоты Пельтье,

I – ток питания,

$I_{1\text{опт}}$ – оптимальный ток питания обычного термоэлектрического устройства,

$I_{2\text{опт}}$ – оптимальный ток питания излучающего термоэлектрического устройства,

Q is the heat entering the cold junction of the thermocouple,

Q_1 is the Joule heat curve of a conventional thermoelectric device,

Q_2 is the heat curve of the Joule emitting thermoelectric device,

Q_3 - Peltier heat curve,

$-Q_{1\text{опт}}$ - the optimal amount of heat for a conventional thermoelectric device with an optimal supply current,

$-Q_{2\text{опт}}$ - the optimal amount of heat for the radiating thermoelectric device at the optimal supply current,

$Q_1 + Q_3$ - the sum of the Joule heat of a conventional thermoelectric device and the Peltier heat,

$Q_2 + Q_3$ - the sum of the Joule heat of the radiating thermoelectric device and the Peltier heat,

I is the supply current,

I_{1opt} is the optimal supply current of a conventional thermoelectric device,

I_{2opt} - optimal supply current of a radiating thermoelectric device

Для обычных термоэлектрических преобразователей баланс мощностей состоит из Джоулевых тепловыделений и эффекта Пельтье. Причем эффект Пельтье линейно зависит от тока, а Джоулевые тепловыделения квадратично. Но если выполнить транзистор в виде тонких пленок $n-p-n$ структур, то в этом случае Джоулевые сопротивления стремятся к нулю, и тогда ветвь параболы будет иметь очень плавную характеристику, настолько плавную, что только при больших значениях тока можно получить оптимум. В тоже время увеличение значения тока позволяет существенно повысить холодильный эффект Пельтье, то есть, пропуская большие мощности, транзистор будет не греться, а даже охлаждаться.

Это позволяет в значительной степени повысить степень интеграции таких транзисторов, и увеличить их мощности, так как нет необходимости ставить большие теплоотводы от нагретой зоны в окружающую среду, и нет необходимости решать проблему инерциальности тепловых процессов. В этом случае такой транзистор не будет нагреваться. Кроме того при определенных условиях можно добиться того, что транзистор может охлаждаться до той степени, пока не наступит абсолютный ноль, и это приведет к возникновению сверхпроводимости. Такая криоэлектроника способна без существенных тепловых потерь реализовать многие функции современной электронной аппаратуры.

Конструктивно экономичный биполярный светотранзистор может быть выполнен в различных исполнениях. Вместо $n-p-n$ структуры возможна структура $p-n-p$. При этом полярность источника питания должна быть изменена, и излучающие, и приемные переходы тоже поменяются местами. Принцип излучения светодиода позволяет реализовать оптопару в пределах одного электронного компонента.

В отличие от обычных оптопар, которые дискретно в пространстве разделены, здесь, они интегрально объединены в пределах одного электронного компонента. И отличие состоит в том же, как, если биполярный транзистор с двумя $p-n$ переходами сравнивать с двумя диодами, у которых тоже есть два перехода, но нет общей базы. Отличие конструктивное влияет на схемотехническое решение и определяет все электрофизические параметры. Также и в данной структуре - светоизлучающая структура, объединенная вместе со свето-поглощающей структурой в виде солнечной батареи, позволяет реализовать не просто оптоэлектронную пару, а именно структуру, имеющую новые свойства и новые качества, которые позволяют не только повысить быстродействие при передаче полезной информации, но и повысить экономичность такой структуры.

В обычном чипе, электронном компоненте, который передает нули или единицы для компьютерной техники используются биполярные и полевые транзисторы с высоким быстродействием на основе транзисторно-транзисторной логики, логики металл-диэлектрик-полупроводник или эмиттерно-связанной логики. Но в данном случае логика не имеет значение, а имеет значение исполнение конструктивное светотранзистора для того, чтобы повысить быстродействие передачи сигнала и одновременно повысить мощность передаваемых сигналов. Мощность повышается за счет того, что уменьшаются паразитные тепловыделения в условиях, когда $p-n$ переходы и сами полупроводниковые структуры выполняются в виде тонких пленок.

В этом случае поперечное сечение таких сопротивлений имеет гораздо большее значение, чем толщина такой пленки. И в соответствии с формулой омического сопротивления, оно будет стремиться к нулю, то есть, чем меньше толщина и меньше путь тока и, чем шире размер пленки, тем меньше она обладает сопротивлением и большей проводимостью, что приводит к уменьшению паразитных тепловых выделений. В тоже время на термоэлектрические свойства это никоим образом не влияет. Но в отличие от обычных термоэлектрических модулей, в которых один переход, помимо Джоулевых тепловыделений, ещё выделяет тепло термоэлектрическое, а второй переход помимо того, что создает холод Пельтье, всё равно продолжает выделять

паразитическое тепло за счет эффекта Джоуля, там получается, что в обычном термомодуле количество выделяемого тепла в целом на термоэлектрическое устройство в среднем в три с половиной раза превышает генерируемый устройством холод, и это не позволяет реализовать высокоэффективные экономичные термоэлектрические охладители.

Но, если этот принцип использовать при изготовлении полупроводниковых транзисторов, и этот полупроводниковый биполярный транзистор сделать таким образом, что вместо нагревающегося перехода будет светящийся переход, то в этом случае большая часть энергии будет уходить не на тепло, а на излучение, которое может быть также использовано в самом этом биполярном транзисторе для рекуперации опять в полезный информационный или мощностной сигнал.

Таким образом, реализация такой концепции позволяет не только изменить принципы создания полупроводниковых компонентов с двумя p - n переходами, но и изменить их электрофизические параметры в сторону большей энергоэффективности и меньших паразитных тепловыделений. В результате будет гораздо меньше затрат на охлаждение таких устройств и проблем с инерционностью тепловых процессов, которые в них происходят. Так как нет тепловыделения, то можно игнорировать их инерционность. Кроме того, сам процесс отвода энергии в виде излучения происходит практически мгновенно со скоростью света, а процесс охлаждения будет на том же уровне, на котором он был в обычных термомодулях.

В результате получается, что при таком тепловом балансе уровень тепловыделения будет намного меньше, чем уровень охлаждения такого электронного компонента, так как большая часть энергии будет уноситься наружу в виде излучения либо трансформироваться в полезный сигнал на p - n переходе типа солнечная батарея. Такой переход реализуется за счет того, что в обычной солнечной батарее кванты света генерируют пару электрон-дырка. Если электрон-дырка сгенерированы были в p -зоне, где имеется большой избыток дырок (положительных носителей), то в этом случае в паре электрон-дырка электрон быстро будет уничтожен большим количеством вакантных дырок.

Если генерация фотоном произошла в n -зоне, содержащей избыток электронов, то в этом случае в результате генерации пары электрон-дырка будет дырка уничтожена избытком электронов, но в p - n переходе есть, так называемый, запрещенный слой, в котором отсутствуют основные носители электрического тока и, в котором сопротивление очень велико. А так как там отсутствуют основные носители, то в этом случае при генерации при помощи электромагнитных квантов света в этой зоне пары электрон-дырка не будут ничем скомпенсированы и начинают свой дрейф, положительная дырка дрейфует в сторону отрицательной n -зоны, а отрицательный электрон дрейфует в сторону положительной p -зоны. В результате создается неравновесная концентрация зарядов, которая и вырабатывает электрический ток.

Но этот же принцип один в один может быть использован внутри биполярного транзистора, когда переход база-эмиттер является излучающим, а переход база-коллектор является светопоглощающим. При поглощении фотонов там будет вырабатываться тоже неравновесная концентрация, и это будет равноценно электрическому току, который прошел от эмиттера к коллектору через базу, но движение носителей в виде электронов или ещё более медленных дырок в сторону коллектора несопоставимо по скорости, так как дрейфовая скорость таких зарядов ничтожно мала в пределах миллиметров или доли миллиметров в секунду, а вот скорость света, с которой распространяются электромагнитные кванты, позволяет практически без потерь времени и энергии оказаться на переходе база-коллектор, даже если КПД такого солнечного элемента имеет небольшое значение, после многократных отражений всё равно этот фотон с очень высоким быстродействием превратиться в электрический сигнал, а не в паразитное тепловыделение.

Зеркальные электроды база, коллектор и эмиттер без потерь электрической или тепловой мощности позволяют переотражать этот сигнал внутри самого экономичного светотранзистора до тех пор, пока он не будет полностью поглощен в p - n переходе между базой и коллектором. Таким образом, чуть-чуть растянуто во времени, но практически при незаметном быстродей-

ствии для электронного компонента полезный сигнал будет передан гораздо быстрее в виде фотонов, чем в виде электрического тока, который с большим опозданием добавит незначительную часть энергии в перенос от эмиттера к коллектору через базу.

Такая концепция построения биполярного транзистора позволяет значительно повысить его экономичность, так как потери тепловые исчезают. Кроме того, такой транзистор больше защищен от помех, так как электрические помехи могут влиять на работу чувствительных баз или затворов, а на оптические сигналы эти помехи извне повлиять никак не могут, так как зеркальные электроды не только отражают внутри все эти сигналы, но и препятствуют прохождению электромагнитных помех извне внутрь транзистора. Таким образом, это будет дополнительная защита от помех аддитивного и мультипликативного характера из внешней среды для такого экономичного светотранзистора.

Для изготовления подобных структур целесообразно использовать аддитивные технологии на основе 3D принтеров нового поколения, способные не только работать с пластическими порошками или металлическими, а способные в одном технологическом цикле на одном слове реализовать как керамические структуры, так и металлические. Кроме того, желательно использовать структуры, способные формировать полупроводники n и p типа. В этом случае можно изготавливать целиком электронные компоненты любой степени интеграции. При этом будут получаться готовые изделия с необходимыми функциональными возможностями. Такие структуры могут быть использованы как в гражданском, так и военном аспекте.

Обсуждение результатов. Реализация световых транзисторов в виде мощных переключающих элементов и, наоборот, в виде компактных интегральных микросхем позволит в значительной степени повысить быстродействие современных электронных устройств и позволит реализовать мощные компьютеры с высоким быстродействием и высокой экономичностью, способные работать долгое время без существенных затрат энергии. Энергоэффективная аппаратура является приоритетом в развитии современной электроники. Подобные структуры могут быть реализованы не только в виде n - p - n структур, но и в виде обычных светодиодных структур, оптоэлектронных пар, в виде экранов, в виде тиристоров, в виде полупроводниковых световых лазеров и так далее.

В том числе аппаратура на таких транзисторах будет прекрасно работать в военной аппаратуре, аппаратуре спецназначения в условиях агрессивной внешней среды и даже при активном воздействии техногенными средствами вплоть до ядерного электромагнитного импульса. Подобная электроника имеет значительные преимущества по сравнению с ранее применяемыми аналогами.

Перспективы развития световых экономичных транзисторов позволяют не только повысить степень интеграции, а значит, и увеличить производительность процессоров, но и снизить энергозатраты на системы охлаждения и на систему питания самого устройства. За счет большей эффективности такие устройства будут меньше потреблять энергии и будут в экологическом плане гораздо более престижны. Кроме того для реализации такого полупроводникового компонента достаточно просто металлических зеркальных электродов и арсенид галлиевых полупроводниковых структур.

Вывод. Наиболее целесообразно подобные свето-транзисторы использовать для оптоволоконных линий связи для формирования мощных сигналов при передаче по магистральным линиям на большие расстояния. Так как быстродействие этих структур позволяет реализовать широкие информационные возможности и передавать большие информационные массивы по многожильным оптоволоконным кабелям трансатлантическим через континенты на большие расстояния без дополнительных устройств подпитки. Мощность таких устройств может быть сопоставима с полупроводниковыми лазерами, но быстродействие будет намного выше. При этом безопасность при защите информации также возрастет, а надежность вырастет на несколько порядков.

Кроме того подобные транзисторы могут быть использованы в качестве мощных силовых элементов для управления спутниковыми системами при передаче их по соответствующим

светоотражающим устройствам в пассивном и активном режиме, потому что на орбите отсутствует препятствия для распространения электромагнитных квантов, и всё упирается только в мощность и быстродействие бортовых систем. В связи с тем, что в последнее время реализуется концепция не одиночных автономных устройств, а формирование стаи или роя беспилотных управляемых микроспутников, беспилотников и так далее целесообразно использовать такие оптические системы управления, способные при любой погоде реализовать устойчивую надежную связь при передаче информации.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386с.
2. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолюминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. № 1. С. 158-169.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А. Применение полупроводниковых термоэлектрических устройств для охлаждения тепловыделяющих компонентов цифровых активных фазированных антенных решеток // Неделя науки - 2016. Материалы XXXVII итоговой научно-технической конференции ДГТУ. 2016. С. 56-57.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Магомедова П.А., Челушкин Д.А. Энергоэффективный полупроводниковый термоэлектрический тепловой насос спирального типа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т. 41. № 2. С. 49-60.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Магомедова П.А., Челушкина Т.А. Энергоэффективный теплоотвод на основе многокаскадного термоэлектрического устройства с применением диодов Ганна // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т. 39. № 4. С. 14-20.
6. Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Шкурко А.С. Излучающие полупроводниковые электронные приборы в цифровых активных фазированных антенных решетках // Перспективы модернизации современной науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2015. - С. 14-15.
7. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника, 2005.
8. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
9. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. - Москва: «Академия», 2012. 136 с.
10. Дорохин М. В., Данилов Ю. А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
11. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дроздов Ю. Н., Звонков Б. Н., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Свойства квантово-размерных структур GaAs/InGaAs, содержащих δ -Mn>-легированные слои // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 2. С. 9-12.
12. Патент РФ на изобретение №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 20.02.2014.
13. Патент РФ на изобретение №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 01.06.2009.
14. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
15. Патент РФ на изобретение №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А., опубл. 20.02.2014.
16. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. Vol. 40. No 2. pp. 179-R203.
17. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. N 3. P. 035338-1-5.

References:

1. Anatychuk L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003. 386c.
2. Dmitriyev A. I., Talantsev A. D., Zaytsev S. V., Danilov YU. A., Dorokhin M. V., Zvonkov B. N., Koplak O. V., Morgunov R. B. Fotolyuminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmeneniye magnitnogo polya d-sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs // ZHETF. 2011. T. 140. № 1. pp. 158-169. [Dmitriyev A. I., Talantsev A. D., Zaitsev S. V., Danilov Yu. A., Dorokhin M. V., Zvonkov B. N., Koplak O. V., Morgunov R. B. Photoluminescent QW response to a

change in the magnetic field of the Mn δ layer in InGaAs / GaAs heterostructures // JETP. 2011. T. 140. No. 1. pp. 158-169. (In Russ.)]

3. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Chelushkina T.A. Primeneniye poluprovodnikovyykh termo-elektricheskikh ustroystv dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchikh komponentov tsifrovyykh aktivnykh fazirovan-nykh antennnykh reshetok // Nedelya nauki - 2016. Materialy XXXVII itogovoy nauchno-tehnicheskoy konferen-tsii DGTU. - 2016. - S. 56-57. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Chelushkina T.A. The use of semiconductor thermoelectric devices for cooling the heat-generating components of digital active phased antenna arrays // Science Week - 2016. Materials of the XXXVII final scientific and technical conference of DSTU. - 2016. -- S. 56-57. (In Russ.)]

4. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A. Energoeffektivnyy po-luprovodnikovyy termoelektricheskiy teplovoy nasos spiral'nogo tipa // Vestnik Dagestanskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - 2016. - T. 41. - № 2. - S. 49-60. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A. Energy-efficient semiconductor thermoelectric heat pump of spiral type //Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. - 2016. T. 41. No. 2. pp. 49-60. (In Russ.)]

5. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Magomedova P.A., Chelushkina T.A. Energoeffektivnyy tep-lootvod na osnove mnogokaskadnogo termoelektricheskogo ustroystva s primeneniyyem diodov Ganna // Vest-nik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - 2015. - T. 39. - № 4. - S. 14-20. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Magomedova P.A., Chelushkina T.A. Energy-efficient heat sink based on a multi-stage thermoelectric device using Gunn diodes // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. - 2015. - T. 39. - No. 4. pp. 14-20. (In Russ.)]

6. Gadzhiyev KH.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. Izluchayushchiye poluprovodnikovyye elektron-nyye pribory v tsifrovyykh aktivnykh fazirovannykh antennnykh reshetkakh // Perspektivy modernizatsii sovre-mennoy nauki. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. - 2015. - S. 14-15. Gadzhiev H.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. Radiating semiconductor electronic devices in digital active phased antenna arrays // Prospects for the modernization of modern science. Collection of articles of the International scientific-practical conference. 2015 pp. 14-15. (In Russ.)]

7. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivifikatory teploperedachi. - SPb.: Politehnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - St. Petersburg: Polytechnic, 2005. (In Russ.)]

8. Ismailov T.A., Gadzhiyev 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.)]

9. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye teplovydelyayushchikh kompo-nentov mikroelektronnoy tekhniki. - Moskva: «Akademiya», 2012. - 136 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Thermoelectric cooling of the fuel components of microelectronic technology. - Moscow: "Academy", 2012. - 136 p. (In Russ.)]

10. Dorokhin M. V., Danilov YU. A. Izmereniye polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostruktur: uchebno-metodicheskoye posobiye. - Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2011 [Dorokhin MV, Danilov Yu. A. Measurement of the polarization characteristics of the radiation of nanoheterostructures: a training manual. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2011. (In Russ.)]

11. Vikhrova O. V., Danilov YU. A., Drozdov YU. N., Zvonkov B. N., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Svoystva kvantovo-razmernyykh struktur GaAs/InGaAs, soderzhashchikh d<Mn>-legirovannyye sloi // Poverkh-nost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya. - 2007. - № 2. - S. 9-12. [Vikhrova O. V., Danilov Yu. A., Drozdov Yu. N., Zvonkov B. N., Iikawa F., Brasil MJSP Properties of quantum-dimensional GaAs / InGaAs structures containing δ <Mn> -doped layers // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. 2007. No. 2. pp. 9-12. (In Russ.)]

12. Patent RF na izobreteniyе №2507613. Kaskadnoye svetoizluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for the invention No. 2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 02/20/2014. (In Russ.)]

13. Patent RF na izobreteniyе №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektron-nykh komponentov v vide izlucheniya / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Che-lushkina T.A., opubl. 01.06.2009. [RF patent for the invention No. 2405230. The method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 06/01/2009. (In Russ.)]

14. Patent RF №2487436. Svetotranzistor/ Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Opubl. 10.07.2013. [RF patent No. 2487436. Svetotransistor / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Publ. 07/10/2013. (In Russ.)]

15. Patent RF na izobreteniyе №2507632. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviyem / Is-mailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov SH.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for the invention No. 2507632. High-speed light transistor / Ismail T.A., Gadzhiev H.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A., publ. 02/20/2014. (In Russ.)]

16. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2007. Vol. 40. No 2. pp. 179-R203.

17. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a sin-gle magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. No 3. pp. 035338-1-5. [Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a sin-gle magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. No 3. pp 035338-1-5. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Гаджиев Хаджимурат Магомедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Ахмедов Магомед Эминович, доктор технических наук, доцент кафедры технологии пищевых производств, общественного питания и товароведения; e-mail: akhmag49@mail.ru

Гаджиева Солтанат Магомедовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Курбанова Патимат Арсланалиевна, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Information about the authors:

Hadzhimurat M. Gadzhiev, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Magomed E. Akhmedov, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technology of Food Production, Catering and Commodity Science; e-mail: akhmag49@mail.ru

Soltanat M. Gadzhieva, Cand.Sci. (Physical and Mathematical), Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Patimat A. Kurbanova, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.06.2019.

Принята в печать 26.08.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.06.2019.

Accepted for publication 26.08.2019.

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Рагимова Т.А., Магомадов Р.А.-М. Термоэлектрическое устройство для внутриполостной гипотермии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):20-31. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-20-31

For citation: T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.A. Hazamova, T.A. Ragimova, R.A.-M. Magomadov. Thermoelectric Device for Intracavitary Hypothermia. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3):20-31.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-20-31

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-20-31

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВНУТРИПОЛОСТНОЙ ГИПОТЕРМИИ

Исмаилов Т.А.¹, Евдулов О.В.¹, Хазамова М.А.¹, Рагимова Т.А.¹, Магомадов Р.А.-М.²

¹Дагестанский государственный технический университет,
¹367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет
им.М.Д. Милионищикова,

² 364051 г. Грозный, проспект им. Х.А. Исаева, 100, Россия

Резюме. Цель Целью статьи является разработка термоэлектрического устройства (ТЭУ) для внутриполостной гипотермии, его экспериментальные исследования, а также создание методик проведения лечебных процедур с помощью данного прибора. **Метод** Разработана конструкция термоэлектрического устройства для внутриполостной гипотермии, состоящая из двух термоэлектрических батарей (ТЭБ), соединенных между собой посредством цельнометаллического теплопровода, снабженная воздействующим аппликатором и жидкостным теплообменником. Проведены экспериментальные исследования прибора на специально разработанном стенде, включающем в себя климатическую камеру, источник электрической энергии, измеритель температуры, подключаемый к ПЭВМ. **Результат** Получены данные об изменении температуры в контрольных точках устройства во времени. Рассмотрено изменение во времени температуры наконечника устройства, теплопровода, теплоотводящей системы при различных токах питания термоэлектрических батарей. Описаны методики лечения некоторых ЛОР заболеваний с помощью разработанного прибора. **Вывод** Установлено, что без нагрузки температура аппликатора стабилизируется приблизительно через 4-4,5 минуты. При этом увеличение силы тока дополнительной ТЭБ с 5 до 12 А при токе питания основной ТЭБ 23 А снижает значение температуры с 237 К до 224 К. В процессе проведения процедур необходимого уровня снижения температуры биологического объекта удается достичь при токе питания основной и дополнительной термоэлектрических батарей, соответственно равном 23 и 12 А через 2,5 мин. Методики лечения ЛОР заболеваний позволяют в полной мере реализовать возможности ТЭУ.

Ключевые слова: гипотермия, внутренняя полость, термоэлектрическое устройство, термоэлектрическая батарея, охлаждающее воздействие, теплообмен, экспериментальный стенд, натурные испытания, измерение, лечебные процедуры

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC DEVICE FOR INTRACAVITARY HYPOTHERMIA

T.A. Ismailov¹, O.V. Evdulov¹, M.A. Hazamova¹, T.A. Ragimova¹, R.A.-M. Magomadov²

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

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

² 100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 2364051, Russia

Abstract Objectives In this research, we aimed to develop a thermoelectric device (TED) for intracavitary hypothermia, to carry out experimental studies into its functional characteristics, as well as to develop treatment procedures using this device. **Method** A TED design for intracavitary hypothermia was developed, consisting of two thermoelectric batteries (TEBs) interconnected using an all-metal heat pipeline equipped with an influencing applicator and a liquid heat exchanger. Experimental studies of the device were carried out on a designed bench, which included a climatic chamber, a source of electrical energy and a temperature meter connected to a PC. **Results** Temperature changes at the control points of the device were recorded over time. Changes in the time taken to stabilise temperatures of the device tip, heat pipe and heat sink system at different TEB supply currents were investigated. Possible methods for treating some ENT diseases using the developed device are described. **Conclusion** It is shown that the temperature of the applicator is stabilised after approximately 4-4.5 minutes without load. At the same time, an increase in the current of the additional TEB from 5 to 12 A at the main TEB current of 23 A reduces the temperature from 237 K to 224 K. In the process of carrying out the procedures, the necessary level of a decrease in the temperature of a biological object can be reached at the supply current of the main and additional TEBs equal to 23 and 12 A, respectively, after 2.5 minutes. The full potential of the TED device will be realised through the developed of methods for treating ENT diseases.

Keywords: hypothermia, internal cavity, thermoelectric device, thermoelectric battery, cooling effect, heat exchange, experimental bench, field tests, measurement, therapeutic procedures

Введение. На сегодняшний день в медицинской практике широко применяются немедикаментозные методы проведения лечебных процедур [1-6]. Одной из их разновидностей является метод теплового воздействия на отдельные зоны человеческого организма, связанный с их локальным охлаждением (гипотермией). Локальная гипотермия активно используется при воздействии на внутренние полости, что широко применяется в оториноларингологии, гинекологии, проктологии, урологии, стоматологии, косметологии и т.п. [7-12].

Применяемые на сегодняшний день средства для внутриполостной гипотермии подразумевают использование жидкого теплоносителя и представляют собой металлические стержни, предварительно охлажденные в жидком азоте или кислороде, так называемые пассивные криозонды, а также системы с открытой и закрытой циркуляцией жидкого хладагента [13-17]. Данные технические средства не всегда отвечают требованиям безопасности в связи с возможностью разгерметизации компрессионных систем, биологической агрессивностью используемых хладагентов, инерционностью рабочих процессов и низкой точностью дозирования охлаждающего воздействия. Использование жидких хладагентов в таких устройствах усложняет их конструкцию и обслуживание, сокращает время работы в связи с ограниченным объемом хладагента, не позволяет достичь необходимого уровня регулировки и контроля температуры воздействия, не решает проблему адгезивного эффекта, что требует наличия дополнительных устройств нагрева. Указанные недостатки препятствуют широкому внедрению эффективных методик внутриполостной гипотермии.

В данных условиях целесообразным является использование в качестве источника холода в системах для гипотермии внутренних полостей ТЭБ. Их применение имеет следующие пре-

имущества: исключает использование жидких хладагентов, что делает устройство независимым от центров производства и доставки криогенных жидкостей; обеспечивает неограниченный ресурс работы, экологичность, бесшумность прибора; повышает точность дозировки и контроля воздействия; предполагает организацию режима реверса путем переключения направления тока питания прибора [18-22].

Постановка задачи. Целью работы является разработка термоэлектрического устройства (ТЭУ) для внутриполостной гипотермии, его экспериментальные исследования, а также создание методик проведения лечебных процедур с помощью данного прибора.

Методы исследования. Объектом исследований является опытный образец ТЭУ для внутриполостной гипотермии, схематическое исполнение которого в составе экспериментального стенда показано на рис.1, а внешний вид на рис.2. Прибор содержит две ТЭБ, основную 2 и дополнительную 3, контактирующие с торцевыми поверхностями медного теплопровода 1. Отвод тепла от горячих спаев ТЭБ 2 осуществляется с помощью жидкостного теплообменного аппарата 4, а дополнительная ТЭБ 3 холодными спаями приведена в контакт с воздействующим аппликатором. Для исключения нежелательного влияния температуры окружающей среды на процесс охлаждения аппликатора теплопровод 1, ТЭБ 2 и 3 имеют теплоизоляцию 5 по боковой поверхности.

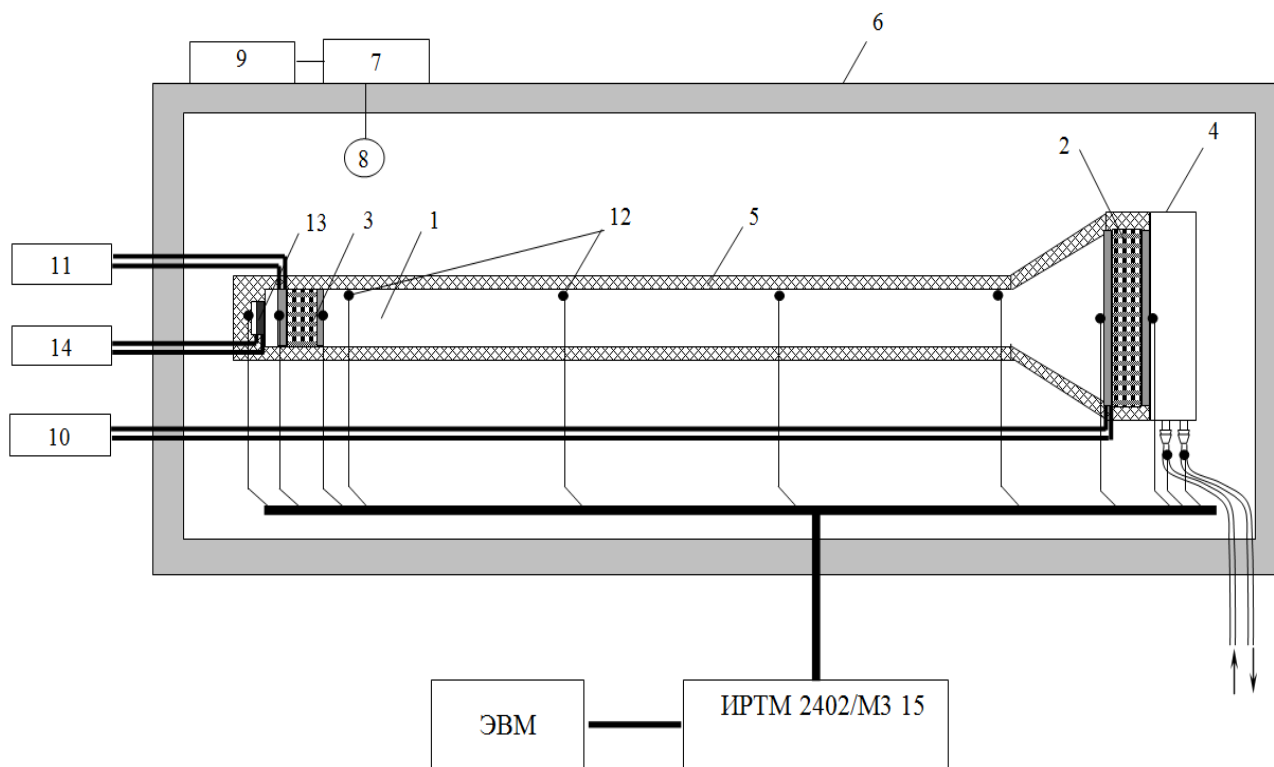


Рис.1. Структурная схема экспериментального стенда устройства для внутриполостной гипотермии

Fig. 1. Block diagram of the experimental stand of the device for intracavitary hypothermia



Рис. 2. Внешний вид термоэлектрического прибора для внутриспостного теплового воздействия с дополнительной термоэлектрической батареей
Fig. 2. Appearance of a thermoelectric device for intracavitary thermal exposure with an additional thermoelectric battery

Экспериментальные исследования прибора проводились в теплоизолированной климатической камере 6 (рис.1), температура и влажность в которой определяются датчиками температуры 7 и влажности 8 и выводятся на дисплей 9. Питание ТЭБ осуществлялось источниками электрической энергии 10 и 11. Нагрузка на аппликатор моделировалась намотанной на него нихромовой проволокой 13, подключенной к индивидуальному источнику питания 14. Сбор экспериментальных данных осуществлялся автоматически с помощью измерителя температуры ИРТМ 2402/М3 15 посредством термопар 12.

В ходе эксперимента определялись напряжения и ток на ТЭБ, температура окружающей среды, температуры в различных точках опытного образца устройства. Термопары размещались на наконечнике, горячих и холодных спаев ТЭБ, на входе и выходе жидкостного теплообменного аппарата, на поверхности теплопровода. Опрос датчиков и регистрация снимаемых данных осуществлялась 1 раз в 2 секунды с записью в текстовый файл и регистрацией текущего времени каждого измерения.

Исследовалась работа прибора с одной (основной) и с двумя ТЭБ (основной и дополнительной). Для каждой из модификаций устройства измерения проводились для случая холостой работы прибора, с тепловой нагрузкой. В соответствии со значением максимального тока питания для используемой основной и дополнительной ТЭБ, работу устройства тестировали для четырех значений питающего тока (10 А; 15 А; 20 А и 23 А) основной батареи и трех значений питающего тока дополнительной ТЭБ (5 А; 10 А; 15 А).

Исходя из технических требований, предъявляемых к устройству при его эксплуатации, в процессе эксперимента задавались следующими исходными данными: температурный диапазон воздействия – от 223 до 248 К; температура окружающей среды – от 298 до 300 К; точность поддержания температуры – 0,5 К; охлаждение опорных спаев основной ТЭБ производилось жидкостным теплообменным аппаратом.

Обсуждение результатов. Результаты экспериментальных исследований.

Для оценки продолжительности выхода ТЭС на рабочий режим были проведены исследования при холостом ходе прибора. На рис.3 изображены графики зависимости изменения температуры наконечника во времени при различных токах питания ТЭБ без нагрузки.

Согласно указанным зависимостям продолжительность выхода устройства в стационарный режим составляет 4,5-5 минут. При этом с увеличением силы тока, температура наконечника снижается. На рис.3, а представлены зависимости изменения температуры наконечника во времени для различных токов питания при использовании в ТЭУ только основной ТЭБ. В соответствии с полученными данными максимальный уровень снижения температуры в данном случае составляет 237 К при максимальном токе в 23 А и повышается на 2, 4 и 8 К для токов питания соответственно 20 А, 15 А и 10 А.

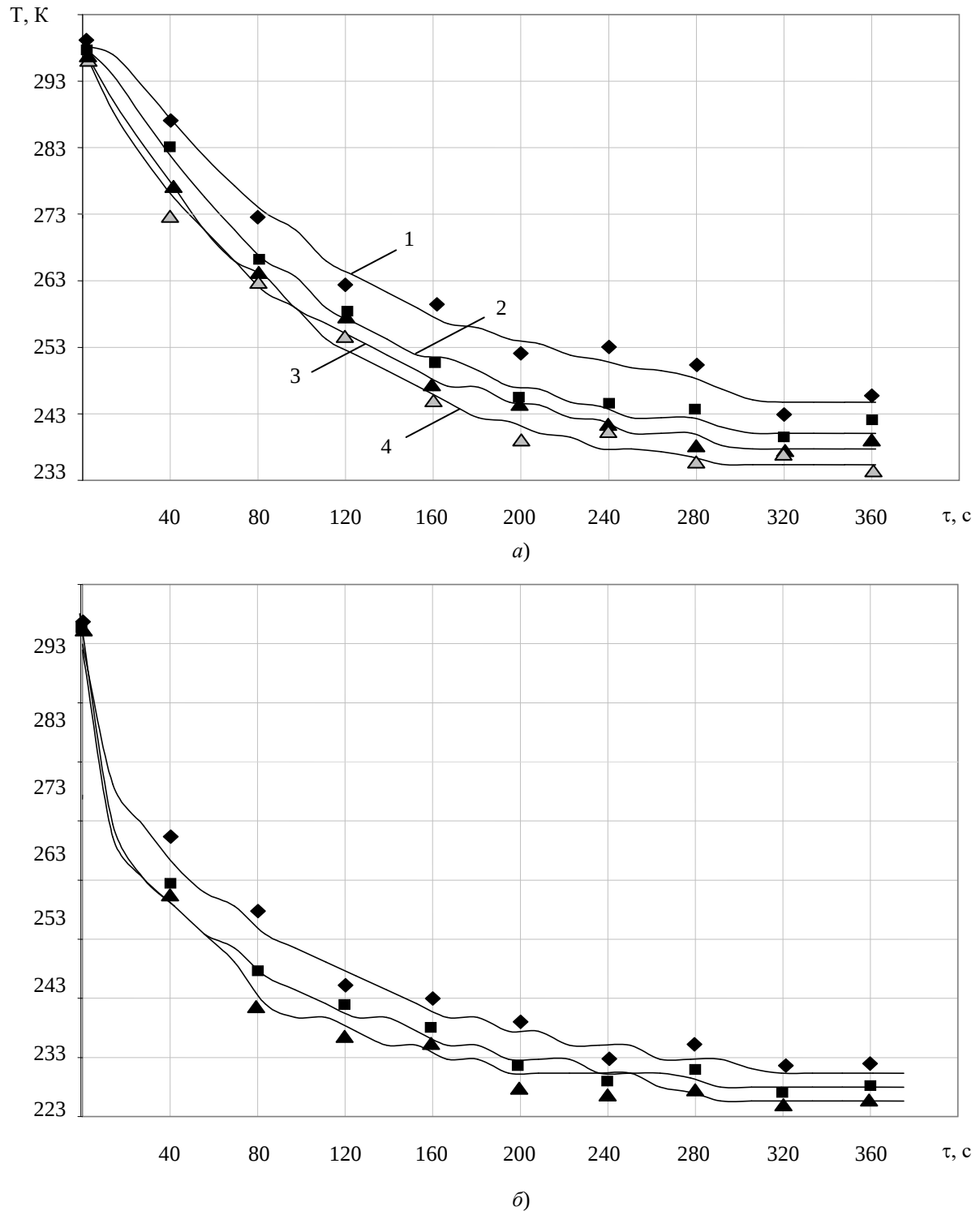


Рис.3. Изменение температуры наконечника во времени при различных значениях тока питания ТЭБ, без нагрузки а) конструкция системы с одной ТЭБ: 1 – 30 А, 2 – 40 А, 3 – 45 А, 4 – 50 А; б) конструкция системы с двумя ТЭБ, ток питания основной ТЭБ 50 А, дополнительной ТЭБ: 1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 – 12 А
Fig. 3. Changing the temperature of the tip over time at various values of the thermopile power supply current, without load a) system design with one thermopile: 1 - 30 A, 2 - 40 A, 3 - 45 A, 4 - 50 A; b) the design of the system with two thermopiles, the supply current of the main thermopile is 50 A, the additional thermopile: 1 - 5 A, 2 - 10 A, 3 - 12 A

На рис.3, б представлены зависимости изменения температуры наконечника во времени для различных токов питания при использовании в устройстве основной и дополнительной ТЭБ.

Графики показывают, что при использовании дополнительной ТЭБ увеличение силы тока окончного каскада с 5 А до 12 А при питании основного каскада оптимальным для данного типа ТЭБ током (23 А) температура наконечника снижается с 237 К до 224 К.

Одним из важных факторов стабильной и надежной работы устройства является эффективный съем тепла с горячих спаев ТЭБ.

Для оценки надежности теплосъема устройства регистрировалось изменение температуры горячих спаев основной ТЭБ во времени, которое представлено на рис.4.

Для рассмотренного случая, соответствующего токам питания основной и дополнительной ТЭБ 23 А и 10 А величина температуры горячего спаев не превышает 302 К при температуре охлаждающей жидкости 291 К и скорости течения 0,07 л/с.

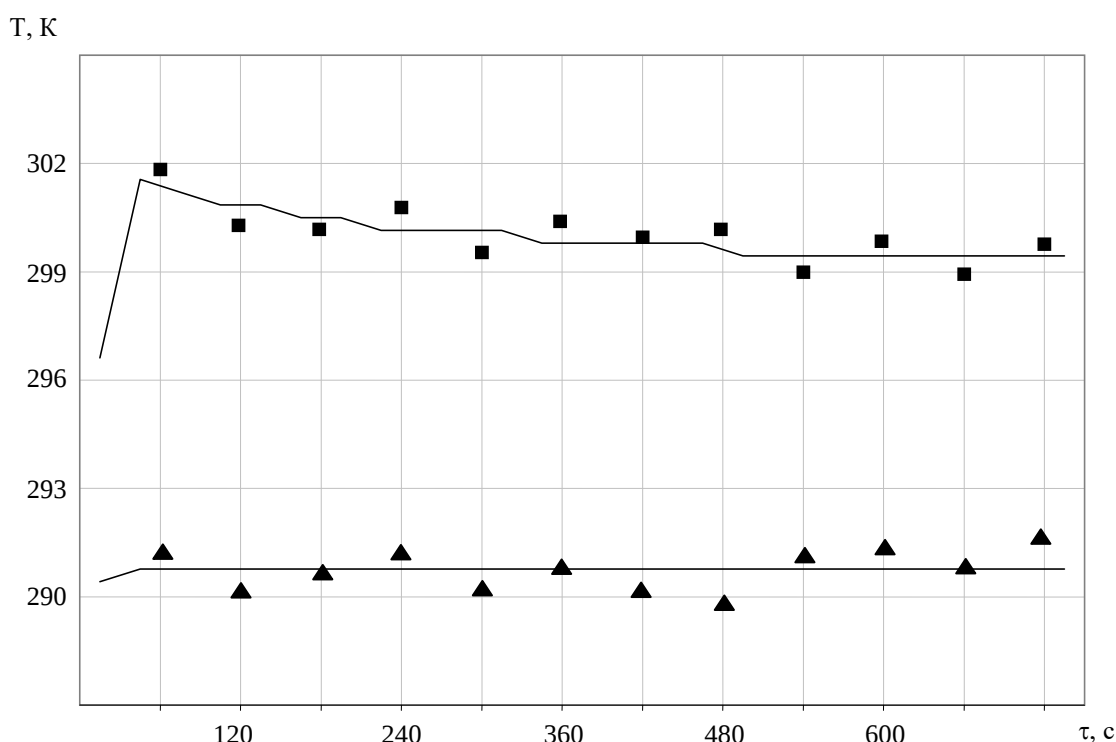


Рис.4. Изменение температуры горячих спаев основной ТЭБ во времени без нагрузки, ток питания ТЭБ - 23 А, дополнительной ТЭБ – 10 А. 1 – охлаждающая жидкость, 2 – горячий спай основной ТЭБ

Fig. 4. The temperature change of the hot junctions of the main thermopile in time without load, the thermopile supply current is 23 A, the additional thermopile is 10 A. 1 - coolant, 2 - hot junction of the main thermopile

Для оценки изменения температуры вдоль теплопровода, имеющего длину 150 мм, получены зависимости изменения температуры по его длине для различных моментов времени без нагрузки, которые изображены на рис.5.

Согласно приведенным графикам максимальный перепад температуры по длине теплопровода при токах питания основной и дополнительной ТЭБ соответственно 23 А и 10 А, составляет 14 К и приходится на начальный момент включения устройства.

По выходу прибора в стационарный режим этот перепад не превышает 3 К и указывает на относительную равномерность распределения температуры по длине теплопровода.

На рис.6-7 представлены графики изменения температуры аппликатора во времени при наличии тепловой нагрузки. В соответствии с [10] величина тепловой нагрузки принята равной

1 Вт, что соотносится со средним уровнем тепловыделений ткани живого человека.

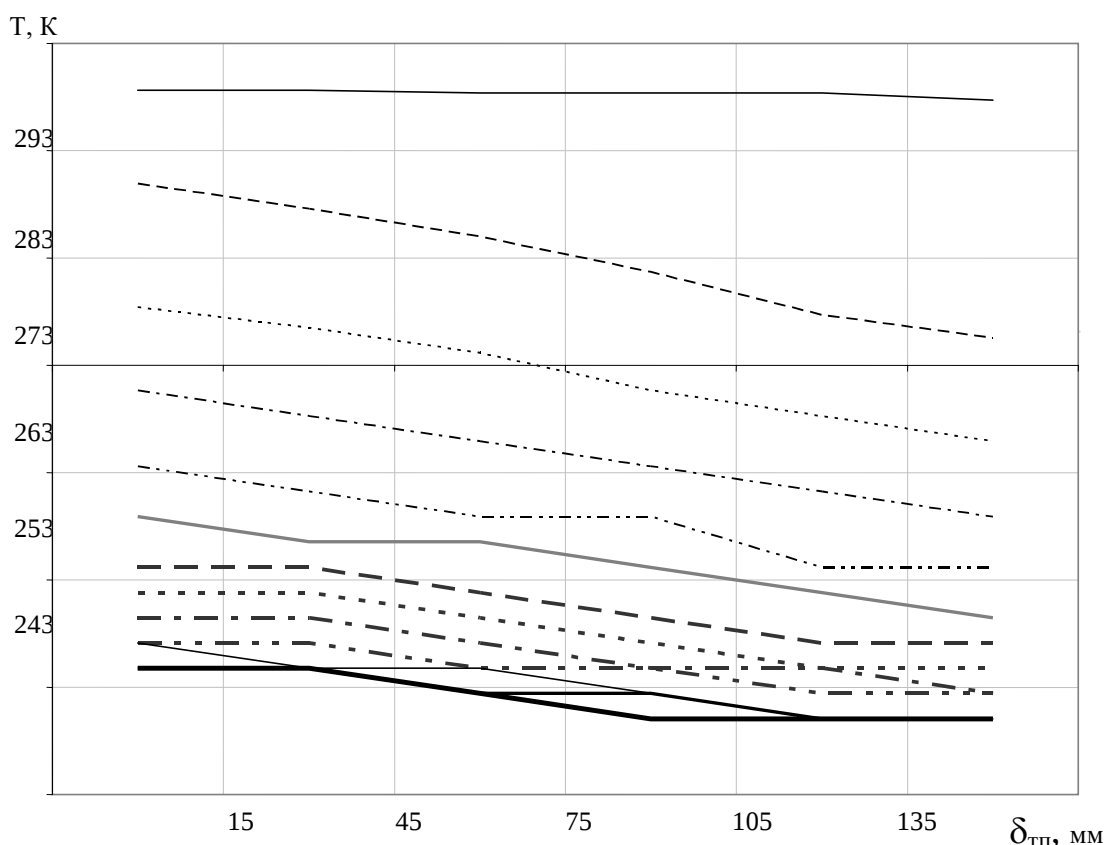


Рис.5. Распределение температуры по длине теплового мостика без нагрузки, ток питания основной ТЭБ - 23 А, ток питания дополнительной ТЭБ - 10 А 1 - $\tau=0$, 2 - $\tau=2$ мин., 3 - $\tau=4$ мин., 4 - $\tau=6$ мин., 5 - $\tau=8$ мин., 6 - $\tau=10$ мин., 7 - $\tau=12$ мин., 8 - $\tau=14$ мин., 9 - $\tau=16$ мин., 10 - $\tau=18$ мин., 11 - $\tau=20$ мин., 12 - $\tau=22$ мин.

Fig. 5. The temperature distribution along the length of the thermal bridge without load, the main thermopile power supply current is 23 A, the secondary thermopile power supply current is 10 A 1 - $\tau=0$, 2 - $\tau=2$ min., 3 - $\tau=4$ min., 4 - $\tau=6$ min., 5 - $\tau=8$ min., 6 - $\tau=10$ min., 7 - $\tau=12$ min., 8 - $\tau=14$ min., 9 - $\tau=16$ min., 10 - $\tau=18$ min., 11 - $\tau=20$ min., 12 - $\tau=22$ min.

Согласно полученным данным при токах питания дополнительной ТЭБ 5 А, 10 А и 12 А температура наконечника по достижению стационарного режима без тепловой нагрузки составляет 224 К, 227 К и 239 К, что соответствует температурам наконечника на графиках в начальный момент времени.

Как показывают зависимости на рис.6, действие нагрузки на систему повышает температуру аппликатора примерно на 6 К, для каждого тока, соответственно ее значение для этих случаев составляет 230 К, 233 К и 245 К. При этом продолжительность выхода на стационарный режим не превышает 2,5 минут.

Аналогичная зависимость была получена и для модификации системы с одной основной ТЭБ.

Повышение температуры по отношению к начальной составило 2,5 К и достигло значения 245 К для оптимального тока питания используемой ТЭБ 23 А. Указанные данные проиллюстрированы на рис.7.

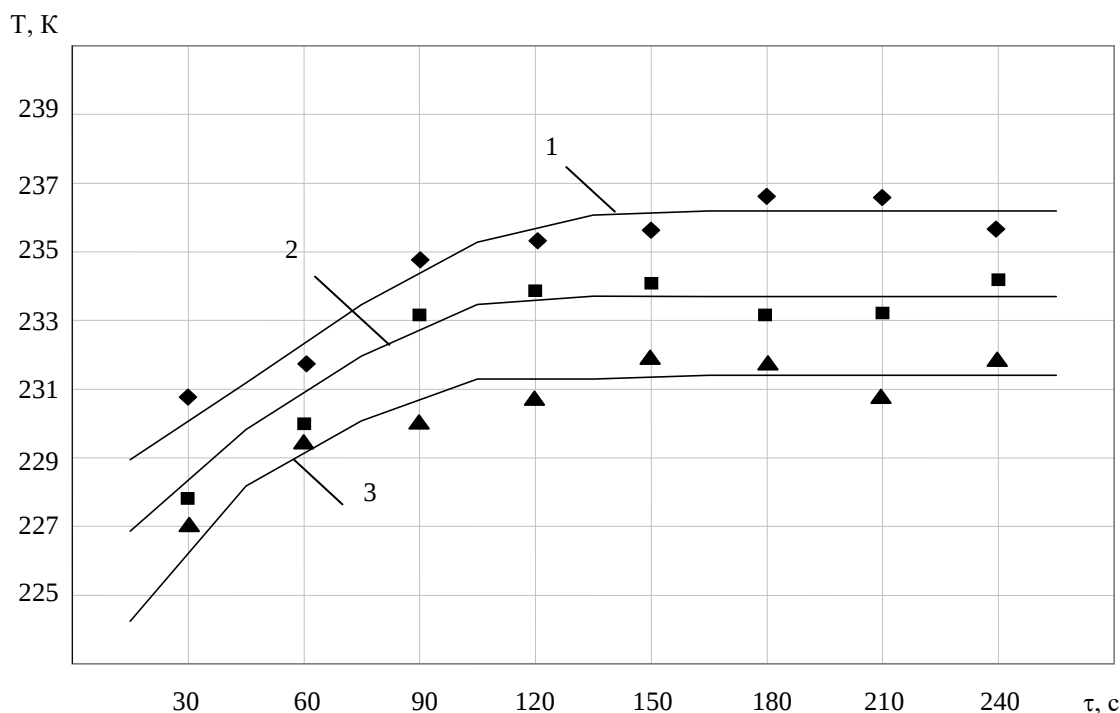


Рис.6. Изменение во времени температуры наконечника при различных значениях тока питания дополнительной ТЭБ с нагрузкой; ток питания основной ТЭБ 23 А 1 – 5 А, 2 – 10 А, 3 -12 А
Fig. 6. Change in time of the tip temperature at various values of the supply current of the additional thermopile with load; supply current of the main fuel and energy complex 23 А 1 - 5 А, 2 - 10 А, 3 -12 А

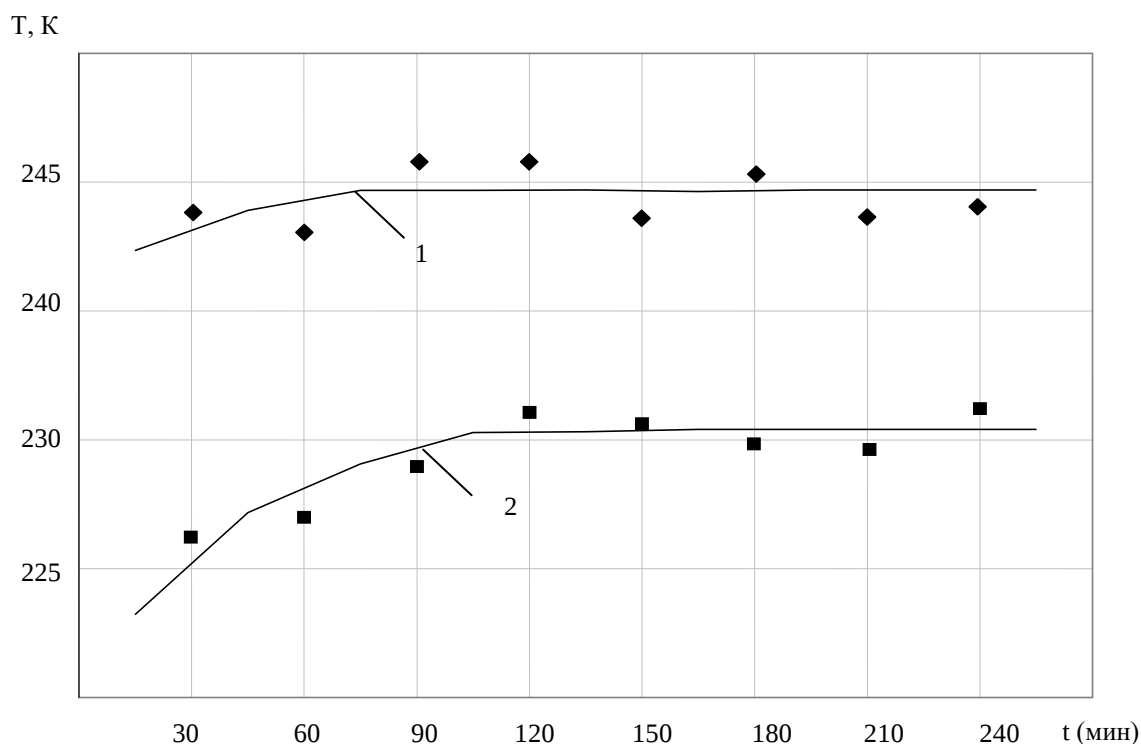


Рис.7. Изменение во времени температуры наконечника с одной (1) и двумя ТЭБ (2), с нагрузкой, ток питания основной ТЭБ – 23 А; ток питания дополнительной ТЭБ – 10 А
Fig. 7. Change in time of the temperature of the tip with one (1) and two thermopiles (2), with a load, the supply current of the main thermopile is 23 А; additional thermopile power supply current - 10 А

Описание методик проведения лечебных процедур с помощью ТЭУ. Общая методика проведения процедур с помощью разработанного устройства следующая. Перед началом сеанса больного усаживают в больничное кресло, где он может принять удобное положение. Предварительно перед воздействием проводят легкую местную анестезию той зоны, в которой будет проводиться лечение 10% раствором лидокаина. Необходимость такой обработки связана с риском механических повреждений внутриполостных тканей при вводе прибора в организм человека.

С помощью регулировки блока контроля и управления задается необходимая величина тока питания ТЭБ, соответствующая температурному режиму проведения процедур. ТЭУ устанавливается на подставку, врач запускает прибор в работу. При выходе прибора на режим, в подставке загорается сигнальная лампочка и подается звуковой сигнал. После чего устройство извлекается из подставки, вводится в полость человека и осуществляется криовоздействие по заданному тепловому режиму в соответствии с лечебной методикой. Месторасположение прибора, продолжительность, температурный уровень и кратность теплового воздействия зависит от разновидности заболевания. Лечение может производиться амбулаторно. Перед эксплуатацией ТЭУ стерилизуется. При проведении процедур после каждого прикосновения аппликатора к слизистой оболочки, производится его обработка салфеткой, смоченной спиртом с целью удаления слюны и слизи. При несоблюдении этих требований возможен риск возникновения нежелательных адгезивных эффектов.

Могут быть предложены следующие методики с использованием разработанного ТЭУ при лечении некоторых ЛОР заболеваний.

Методика криогенного лечения небных миндалин в случае хронического тонзиллита состоит в такой последовательности. Первоначально воспаленная зона небных миндалин промывается антисептиком. Промывание производится ежедневно 3-5 раз перед процедурой. Далее в соответствии с методикой, холодным концом аппликатора прикасаются к поверхности небных миндалин таким образом, чтобы устья крипт не замораживались. Прикосновения холодным аппликатором к небной миндалине производится 2-5кратно, в зависимости от ее морфологии и расстоянием между лакунами в области верхнего, среднего и нижнего полюса с продолжительностью прикосновения порядка 0,5 мин.

Методика лечения локальным охлаждением гипертрофического фарингита и микоза зависит от анатомических особенностей больного. При проведении сеанса выполняется от 3-4 до 12-15 прикосновений аппликатором, охлажденным до температуры -40°C с экспозицией в 0,5 мин. При воздействии на гипертрофированную лимфоидную ткань ротоглотки экспозиция составляет порядка 1-2 мин. После лечения описанным методом регенеративной криотерапии в случае фарингита в течение 4-6 недель идет циклическая реакция с существенной активизацией регенеративных процессов. Сеанс повторяется 3-8 раз с интервалом в 2-3 месяца.

В случае лечения синдрома надгортанника (состоящего в возникновении механического контакта корня языка и надгортанника, сопровождающегося ощущением комка в горле, в хронических случаях приводящего к деформации вестибулярного отдела гортани, а также перекрытию дыхательных путей) осуществляют криовоздействие с использованием выпуклого аппликатора на зону небных миндалин, боковых валиков, корня языка и задней стенки глотки. Процедура повторяется 5-7кратно с интервалом 2-4 раза в месяц.

При профилактической иммуностимулирующей криотерапии сначала проводят легкую местную анестезию путем обрызгивания оболочки глотки 10% лидокаином, а уже затем осуществляют криовоздействие на эту зону. Для большинства пациентов осуществляют локальное замораживание лимфоидных гранул, боковых валиков, сосуда задней стенки глотки. Указанная процедура представляет собой разновидность профилактических мероприятий для снижения количества простудных заболеваний, ОРВИ и гриппа и проводится в среднем два раза в год.

Методика регенеративной криотерапии при синдроме апноэ и храпе состоит в локальном охлаждающем воздействии на мышцы мягкого неба и небного язычка аппликатором, охлажденным до температуры -40°C с минутной экспозицией. Охлаждение этих зон активизирует реге-

неративные процессы в них и улучшает сократительную способность мышечных волокон. Проведение регенеративной криотерапии легко реализуется в поликлиниках, дополнительной квалификации за исключением освоения методики криогенного лечения для практикующего врача не требуется. К противопоказаниям по применению ТЭУ относятся острые воспалительные процессы в верхних дыхательных путях.

Вывод. Одним из эффективных методов лечения заболеваний в оториноларингологии, гинекологии, проктологии, урологии, стоматологии является внутриполостная гипотермия. Реализация данной методики может быть осуществлена за счет использования в качестве источника холода ТЭБ.

Разработана конструкция ТЭУ для внутриполостной гипотермии, состоящая из двух ТЭБ, соединенных между собой посредством цельнометаллического теплопровода, снабженная воздействующим аппликатором и жидкостным теплообменником. Проведены натурные испытания ТЭУ на экспериментальном стенде. Установлено, что без нагрузки температура аппликатора стабилизируется приблизительно через 4-4,5 минуты. При этом увеличение силы тока дополнительной ТЭБ с 5 до 12 А при токе питания основной ТЭБ 23 А снижает значение температуры с 237 К до 224 К. В процессе проведения процедур необходимого уровня снижения температуры биологического объекта удается достичь при токе питания основной и дополнительной ТЭБ соответственно равном 23 и 12 А через 2,5 мин. Разработаны и описаны методики проведения физиотерапевтических процедур для лечения некоторых ЛОР заболеваний.

Библиографический список:

1. Баранов А.Ю. Искусственный холод на службе здоровья // Вестник Международной академии холода. - 2006. - № 1. - С. 15-18.
2. Баранов А.Ю. Разработка техники и технологии криотерапии // Холодильная техника. - 2006. - № 12. - С. 42-47.
3. Баранов А.Ю., Малышева Т.А. Моделирование процесса охлаждения поверхности кожного покрова пациента // Вестник Международной академии холода. - 2017. - № 1. - С. 84-88.
4. Боголюбов В.М., Улащик В.С. Комбинирование и сочетание лечебных физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2004. - № 5. - С. 4-11.
5. Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 4. - С. 33-36.
6. Tiffany Field. Massage therapy research review // Complementary therapies in clinical practice. - 2016. - № 24. - P. 19-31.
7. Баранов А.Ю., Малышева Т.А. О выборе методики исследования эффектов общего криотерапевтического воздействия // Биомедицина. - 2015. - № 2. - С. 37-46.
8. Баранов А.Ю., Малышева Т.А. Экспериментальная проверка результатов измерения температуры поверхности кожного покрова пациента до и после общего криотерапевтического воздействия // Лечебная физкультура и спортивная медицина. - 2016. - № 4 (136). - С. 40-46.
9. Буренина И.А. Современные методики криотерапии в клинической практике // Вестник современной клинической медицины. - 2014. - т. 7. - С. 57-61.
10. Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 6. - С. 3-10.
11. Hua Zhang, Hong Chen, Hao Wang, Duoduo Li, Baolin Jia, Zhongjian Tan, Bin Zheng, Zhiwen Weng. Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain // Journal of traditional Chinese medical sciences. - 2015. - №2. - P.32-38.
12. Miroslav Savic, Borut Fonda, Nejc Sarabon, Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // Journal of thermal biology. - 2013. - № 38. - P. 186-191.
13. Verhagen John. Massage therapy has short-term benefits for people with common musculoskeletal disorders compared to no treatment: a systematic review // Journal of physiotherapy. - 2015. - № 61. - P. 106-116.
14. Даниченко М.Ю. Разработка криогенной системы и инструментов для хирургии и терапии // Медицинская техника. - 2007. - №6. - С.24-27.
15. Кузнецов О.Ф. Криомассаж – эффективная технология восстановительной терапии // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2003. - № 5. - С.39-46.
16. Savic Miroslav, Borut Fonda, Nejc Sarabon Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // Journal of thermal biology. - 2013. - № 38. - P.186-191.

17. Ходарев Н.В., Жемчужнова Н.Л., Олемпиева Е.В., Жинко М.Н., Нешин С.Г. Влияние общей воздушной криотерапии на антиоксидантный статус крови // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 1. - С.32-35.
18. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Магомадов Р.А.-М. Математическая модель термоэлектрической системы для локального теплового воздействия на руку человека // Термоэлектричество. - 2014. - № 1. С. 77-86.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Рагимова Т.А. Исследование термоэлектрической системы для локального замораживания тканей гортани // Термоэлектричество. - 2015. - № 2. - С. 86-94.
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Рагимова Т.А. Экспериментальный стенд для измерения рабочих характеристик термоэлектрического устройства для локального замораживания тканей гортани // Ползуновский вестник. - 2010. - №2. - С. 167-170.
21. Булат, Л.П. Термоэлектричество - вчера, сегодня, завтра // Холодильная техника. - 2016. - № 4. - С.14-18.
22. Булат Л.П., Сергиенко О.И., Савоскула В.А. Термоэлектрические преобразователи энергии: экологические аспекты // Физика и техника полупроводников. - 2017. - №7. - С.970-974.

References:

1. Baranov A.YU. Iskusstvennyy kholod na sluzhbe zdorov'ya // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. - 2006. - № 1. - S. 15-18. [Baranov A.Yu. Artificial cold in the service of health // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2006. No. 1. pp 15-18. (In Russ.)]
2. Baranov A.YU. Razrabotka tekhniki i tekhnologii krioterapii // Kholodil'naya tekhnika. - 2006. - № 12. - S. 42-47. [Baranov A.Yu. Development of equipment and technology for cryotherapy // Refrigeration equipment. - 2006. No. 12. pp. 42-47. (In Russ.)]
3. Baranov A.YU., Malysheva T.A. Modelirovaniye protsessa okhlazhdeniya poverkhnosti kozhnogo pokrova patsiyenta // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. - 2017. - № 1. - S. 84-88. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A. Modeling the process of cooling the surface of the patient's skin // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2017. No. 1. pp. 84-88. (In Russ.)]
4. Bogolyubov V.M., Ulashchik V.S. Kombinirovaniye i sochetaniye lechebnykh fizicheskikh faktorov // Fizio-terapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2004. - № 5. - S. 4-11. [Bogolyubov V.M., Ulashchik V.S. Combination and combination of therapeutic physical factors // Physio-therapy, balneology and rehabilitation. 2004. No. 5. pp. 4-11 (In Russ.)]
5. Yezhov V.V. Fizioterapiya i fizioprafilaktika kak metody i sredstva sokhraneniya i vosstanovleniya zdorov'ya // Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2011. - № 4. - S. 33-36. [Yezhov V.V. Physiotherapy and physioprophy-laxis as methods and means of maintaining and restoring health // Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2011. No. 4. pp. 33-36. (In Russ.)]
6. Tiffany Field. Massage therapy research review // Complementary therapies in clinical practice. 2016. No. 24. pp. 19-31.
7. Baranov A.YU., Malysheva T.A. O vybore metodiki issledovaniya effektivnosti obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya // Biomeditsina. - 2015. - № 2. - S. 37-46. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A. On the choice of methods for studying the effects of general cryotherapeutic exposure // Biomedicine. 2015. No. 2. pp. 37-46. (In Russ.)]
8. Baranov A.YU., Malysheva T.A. Eksperimental'naya proverka rezul'tatov izmereniya temperatury poverkhnosti kozhnogo pokrova patsiyenta do i posle obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya // Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina. - 2016. - № 4 (136). - S. 40-46. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A. Experimental verification of the results of measuring the temperature of the surface of the skin of a patient before and after general cryotherapeutic exposure // Physiotherapy and Sports Medicine. 2016. No. 4 (136). pp. 40-46. (In Russ.)]
9. Burenina I.A. Sovremennyye metodiki krioterapii v klinicheskoy praktike // Vestnik sovremennoy klinicheskoy meditsiny. - 2014. - T. 7. - S. 57-61. [Burenina I.A. Modern methods of cryotherapy in clinical practice // Bulletin of modern clinical medicine. 2014. Vol. 7. pp. 57-61. (In Russ.)]
10. Zubkova S.M. Rol' teplovoy komponenty v lechebnom deystvii fizicheskikh faktorov // Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2011. - № 6. - S. 3-10. [Zubkova S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors // Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2011. No. 6. pp. 3-10. (In Russ.)]
11. Hua Zhang, Hong Chen, Hao Wang, Duoduo Li, Baolin Jia, Zhongjian Tan, Bin Zheng, Zhiwen Weng. Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain // Journal of traditional Chinese medical sciences. 2015. No. 2. pp.32-38.
12. Miroslav Savic, Borut Fonda, Nejc Sarabon, Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // Journal of thermal biology. 2013. No. 38. pp. 186-191.
13. Verhagen John. Massage therapy has short-term benefits for people with common musculoskeletal disorders compared to no treatment: a systematic review // Journal of physiotherapy. 2015. No. 61. pp. 106-116.
14. Danichenko M.YU. Razrabotka kriogennoy sistemy i instrumentov dlya khirurgii i terapii // Meditsin-skaya tekhnika. - 2007. - №6. - S.24-27. [Danichenko M.Yu. Development of a cryogenic system and instruments for surgery and therapy // Medical Technique. 2007. No. 6. pp.24-27. (In Russ.)]

15. Kuznetsov, O.F. Kriomassazh – effektivnaya tekhnologiya vosstanovitel'noy terapii // Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2003. - № 5. - S.39-46. [Kuznetsov, O.F. Cryomassage - an effective technology of rehabilitation therapy // Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2003. No. 5. pp.39-46. (In Russ.)]
16. Savic Miroslav, Borut Fonda, Nejc Sarabon Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // Journal of thermal biology. 2013. No. 38. pp.186-191.
17. Khodarev N.V., Zhemchuzhnova N.L., Olempiyeva Ye.V., Zhinko M.N., Neshin S.G. Vliyaniye obshchey vozdushnoy krioterapii na antioksidantnyy status krovi // Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2012. - № 1. - S.32-35. [Khodarev N.V., Zhemchuzhnova N.L., Olempiyeva E.V., Zhinko M.N., Neshin S.G. The effect of general air cryotherapy on the antioxidant status of blood // Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2012. No. 1. pp.32-35. (In Russ.)]
18. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Khazamova M.A., Magomadov R.A.-M. A mathematical model of a thermoelectric system for local heat exposure on a human hand // Thermoelectricity. - 2014. - No. 1. S. 77-86.
19. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Ragimova T.A. Study of a thermoelectric system for local freezing of laryngeal tissues // Thermoelectricity. 2015. No. 2. pp. 86-94.
20. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Eksperimental'nyy stend dlya izmereniya rabochikh kharakte-ristik termoelektricheskogo ustroystva dlya lokal'nogo zamorazhivaniya tkaney gortani // Polzunovskiy vestnik. - 2010. - №2. - S. 167-170. [Ismailov T.A., Evdulov O.V., Ragimova T.A. An experimental bench for measuring the working characteristics of a thermoelectric device for local freezing of laryngeal tissues // Polzunovsky Bulletin. 2010. No. 2. pp. 167-170. (In Russ.)]
21. Bulat, L.P. Termoelektrichestvo - vchera, segodnya, zavtra // Kholodil'naya tekhnika. - 2016. - № 4. - S.14-18. [Bulat, L.P. Thermoelectricity - yesterday, today, tomorrow // Refrigeration. 2016. No. 4. pp.14-18. . (In Russ.)]
22. Bulat L.P., Sergiyenko O.I., Savoskula V.A. Termoelektricheskiye preobrazovateli energii: ekologicheskiye aspekty // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. - 2017. - №7. - S.970-974. [Bulat L.P., Sergiyenko O.I., Savoskula V.A. Thermoelectric energy converters: environmental aspects // Physics and technology of semiconductors. 2017. No. 7. pp.970-974. (In Russ.)]

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

Евдулов Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Хазамова Мадина Абдулаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: kaftoe2016@yandex.ru

Рагимова Тамила Арслановна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: ragimovatamila@yandex.ru

Магоматов Рустам Абу-Муслимович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электропривод»; e-mail: alternativa9372@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

Oleg V. Evdulov, Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Madina A.Khazamova, Cand.Sci.(Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: kaftoe2016@yandex.ru

Tamila A.Ragimova, Cand.Sci.(Technical), Assoc.Prof., Department Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: ragimovatamila@yandex.ru

Rustam A.-M.Magomadov, Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Head of the Department «Electrical Engineering and Electric Drive»; e-mail: alternativa9372@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.06.2019.

Принята в печать 06.09.2019.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.06.2019.

Accepted for publication 06.09.2019.

Для цитирования: Татаренко Ю.В., Мизин В.М., Рачковский Н.О. Прогнозирование применения холодильных агентов в низкотемпературной технике. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(3): 32-42. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-32-42

For citation: Y.V. Tatarenko, V.M. Misin, N.O. Rachkovsky. Prediction of the use of Refrigerants in Low-temperature Equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 32-42. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-32-42

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.57

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-32-42

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКЕ

Татаренко Ю.В., Мизин В.М., Рачковский Н.О.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (ИТМО),
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49, Россия

Резюме. Цель. Определение перспектив применения различных холодильных агентов, а также потенциал их взаимозаменяемости в низкотемпературной технике исходя из условий Кигалийской поправки к Монреальской конференции. **Метод.** Произведено компьютерное моделирование процессов теплообмена на основе общепринятых зависимостей и получены данные для построения характеристик элементов холодильной машины. **Результат.** R717 и R410A рекомендованы для использования в средне- и низкотемпературных машинах. Холодильный агент R32 - в высокотемпературных холодильных машинах, особенно, в аппаратах с медными оребренными трубами. Низкое паросодержание хладагента R32 препятствует образованию «запаривания» верхних слоёв пучка труб, что приводит к повышению уровня холодильного агента в испарителе и увеличению площади рабочей области трубного пучка испарителя. Для R32 необходимо провести дополнительные исследования по поиску его альтернативной замены. Наиболее высокие значения коэффициента теплоотдачи получены при работе на холодильных агентах R410A и R717. **Вывод.** С помощью реализованных алгоритмов возможно получать характеристики элементов парокомпрессорной холодильной машины в широком диапазоне изменения температур кипения и конденсации с учетом различных факторов и процентного состава смесового рабочего вещества, что весьма актуально при переводе машин на альтернативные холодильные агенты.

Ключевые слова: холодильный агент, холодильная машина, эффективность, характеристика, кожухотрубный испаритель

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

PREDICTION OF THE USE OF REFRIGERANTS IN LOW-TEMPERATURE EQUIPMENT

Y.V. Tatarenko, V.M. Misin, N.O. Rachkovsky

St. Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics, and Optics (ITMO University),
49, Kronverk Ave., St. Petersburg 197101, Russia

Abstract Objectives Determination of prospects for the use of various refrigerants, as well as the potential for their interchangeability in low-temperature equipment in accordance with the conditions of the Kigali Amendment to the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. **Method** A computer simulation of heat exchange processes based on generally accepted dependencies was carried out and data for the construction of refrigeration machine elements obtained. **Results** R717 and R410A are recommended for use in medium- and low-temperature machines. R32 refrigerant is used in high-temperature refrigeration machines, especially in units with finned copper tubes. The low vapour content of R32 refrigerant prevents steaming of the upper layers of the tube bundle, leading to an increase in the level of the refrigerant in the evaporator and in the working area of the evaporator tube bundle. For R32, it is necessary to conduct additional research to find an alternative refrigerant. The highest values of the heat transfer coefficient are obtained when working on refrigerants R410A and R717. **Conclusion** The implemented algorithms can be helpful for obtaining the characteristics of the steam-compressor refrigerator elements across a wide range of boiling and condensing temperatures taking various factors and the percentage composition of the mixed working substance into account. This is a highly important consideration when converting the machines to run on alternative refrigerants.

Keywords: Refrigerant, refrigeration machine, efficiency, characteristic, shell-and-tube evaporator

Введение. В XX веке мир столкнулся с проблемой уменьшения озонового слоя Земли. Ученые всего мира стали говорить об опасности применения различных групп холодильных агентов, которые ведут к нежелательному изменению климата. В последние два десятилетия холодильная техника уже прошла «первую волну» отказа от озоноразрушающих (озоноопасных) рабочих веществ. Результатом этого является переход на альтернативные холодильные агенты.

В настоящее время в бытовой, полупромышленной и промышленной холодильной технике наиболее распространены такие рабочие вещества как R134a, R404A, R410A. Указанные холодильные агенты относятся к группе гидрофторуглеродных холодильных агентов. Они являются заменой хлорфторуглеродных и гидрохлорфторуглеродных холодильных агентов. Основное преимущество применяемых холодильных агентов заключается в низком озоноразрушающем потенциале. Однако стоит отметить, что данные холодильные агенты имеют высокие значения потенциала глобального потепления.

С 1 января 2019 г. вступила в действие Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу. Согласно Монреальской конференции принято решение об отказе от хлорфторсодержащих холодильных агентов [1, 2]. Данная поправка ограничивает использование в системах кондиционирования и охлаждения следующих холодильных агентов: R134a, R404A, R410A, R507A. Согласно [3], в настоящее время ведётся разработка синтетических холодильных агентов с низким потенциалом глобального потепления и нулевым значением потенциала разрушения озонового слоя (R1234yf, R1234ze) [4-6].

Необходимо отметить, что параллельно ведётся работа по применению природных холодильных агентов, таких как R717, R744, R290 [7-9]. Страны Европейского союза приняли решение переходить на природные рабочие вещества.

Не теряет своей актуальности проблема снижения массогабаритных показателей и энергетических затрат в низкотемпературной технике. Эту проблематику необходимо рассматривать в нескольких направлениях - возможно совершенствование холодильной машины как в части элементов (компрессоров, теплообменных аппаратов, применение новых материалов), так и применение новых холодильных агентов. Для многих применяемых озонобезопасных холодильных агентов отсутствуют существенные массивы экспериментальных и эксплуатационных данных о процессах теплообмена.

На практике, марка применяемого холодильного агента выбирается исходя из его термодинамических свойств и характеристик компрессора [10]. При этом не учитываются массогабаритные и энергетические показатели холодильных машин, которые в значительной степени зависят от теплоэнергетической эффективности самих аппаратов, входящих в состав. В связи с этим, производить оценку эффективности работы холодильных машин необходимо в комплексе: следует учитывать эффективность всех элементов, входящих в состав холодильной машины, а также свойства применяемого холодильного агента циркуляционного контура холодильной машины.

Теплообмен при кипении зависит от таких факторов, как термодинамические и теплофизические параметры рабочей среды, формы поверхности теплообмена. Необходимо отметить, что в значительной степени на теплообменные характеристики холодильных агентов влияют гидродинамические свойства, при которых проходит процесс кипения. Предлагаемая оценка гидродинамических условий протекания процесса теплообмена позволит качественно оценить эффективность применения рабочих веществ в низкотемпературной технике.

Постановка задачи. С целью исследования влияния термодинамических и теплофизических параметров холодильного агента, циркулирующего в системе, на гидродинамические характеристики были математически реализованы алгоритмы, с помощью которых рассматриваются отдельные элементы одноступенчатой холодильной машины с водяным кожухотрубным конденсатором и испарителем затопленного типа при работе на следующих рабочих веществах: R717, R32 и R410A. На выбор рассматриваемых рабочих агентов существенно повлияла упомянутая выше информация о Кигалийской поправке. Рассматриваемые диапазоны температур: температура кипения изменялась от $t_0 = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре конденсации $t_k = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методы исследования. Характеристику всей холодильной машины можно получить, используя графо-аналитический метод построения характеристик, описанный в работе [15]. Достоинством графо-аналитического метода является не только определение характера характеристики всей холодильной машины в целом, но и возможность последовательного рассмотрения влияния характеристик теплообменных аппаратов (испаритель или конденсатор) на совместную характеристику парокомпрессионной холодильной машины в целом.

Данные для построения характеристик элементов одноступенчатой холодильной машины с поршневым компрессором можно получить при помощи реализованных программ, а именно характеристик компрессора – программа ХАР_КМ, характеристики конденсатора – программа ХАР_KD и характеристики испарителя ХАР_ISP. Основные термодинамические и теплофизические свойства реальных рабочих веществ рассчитываются в программах ХАР_КМ, ХАР_KD и ХАР_ISP по уравнению Бенедикта – Вебба – Рубена (ВБР). Большим плюсом данного уравнения является то, что имея данные о составе смеси, мы можем рассчитать или предсказать ее свойства. Посредством реализуемых ХАР_КМ, ХАР_KD и ХАР_ISP программ можно получить значения параметров элементов парокомпрессионной холодильной машины для любого рабочего вещества [15, 16]. Основные уравнения, входящие в математическую модель элементов парокомпрессионной холодильной машины основаны на материале, изложенном в работе [15].

Программы для расчета параметров элементов холодильной машины с целью улучшения визуализации реализованы в оболочке *Microsoft EXCEL* на языке программирования *Visual Basic for applications (VBA)*, ранние версии реализованы на языке программирования высокого уровня *Fortran*, но не имели удобного интерфейса и возможности «мгновенного» построения характеристик.

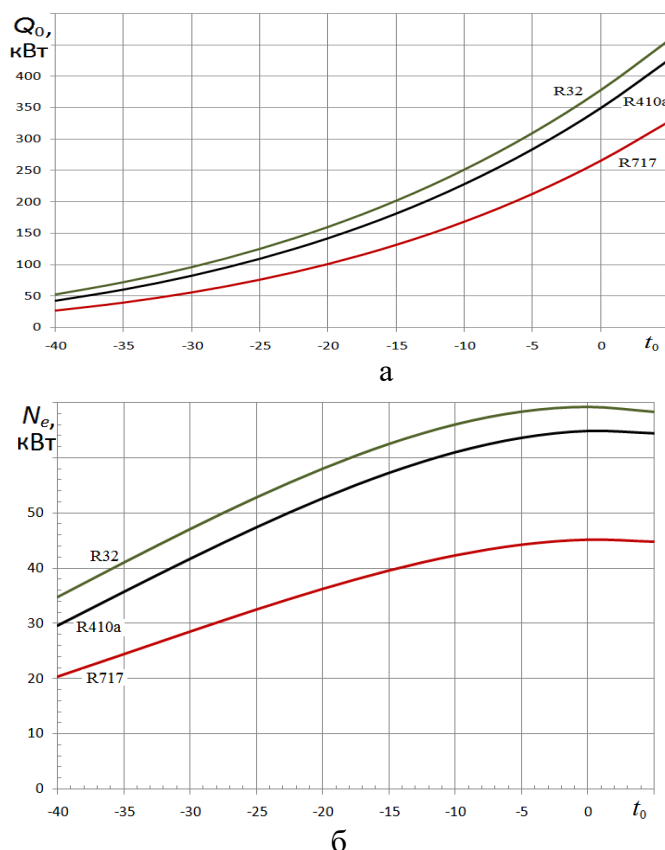
В качестве примера на рис.1. приводится интерфейс программы ХАР_КМ для получения параметров поршневого компрессора и в дальнейшем на их основании построения характеристики. На рис.1. можно увидеть, что имеется возможность выбрать холодильный агент для расчета характеристик (подключена библиотека термодинамики свойств рабочих веществ), задается диапазон исследуемых температур кипения при постоянной температуре конденсации, которая также должна быть задана, перегрев на всасывании в компрессор, величина относительного мертвого пространства и относительные потери на всасывании и нагнетании. Заложена возможность выбора шага рассмотрения исследования по температуре кипения. Предусмотрен выбор цикла работы исследуемой холодильной машины - с регенеративным теплообменником или без него. Аналогично выглядят интерфейсы для ввода данных теплообменных аппаратов, где реализована возможность выбора труб в качестве теплопередающей поверхности и тип оребре-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Расчёт характеристик поршневого компрессора									
2										
3	Минимальная температура кипения, T _{0MIN} :					-25.00 °C				
4										
5	Максимальная температура кипения, T _{0MAX} :					0.00 °C				
6										
7	Шаг по температуре кипения, DELT ₀ :					5.00 °C				
8										
9	Температура конденсации, T _K :					35.00 °C				
10										
11	Перегрев на всасывании, DT _{BC} :					20.00 °C				
12										
13	Переохлаждение после конденсатора, DT _K :					0.00 °C				
14										
15	Относительное мертвое пространство, C:					0.045				
16										
17	Относительные потери на всасывании, KCP1:					0.06				
18										
19	Относительные потери на нагнетании, KCP2:					0.09				
20										
21	Теоретическая объемная производительность компрессора, VT:					0.01145 м ³ /с				
22										
23	Холодильный агент:				R410A.mix			Рассчитать	Удалить расчёт	
24										

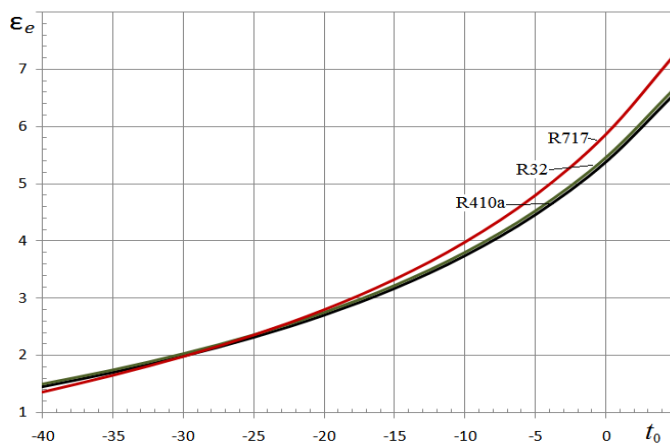
Рис.1. Изображение интерфейса ввода исходных данных в программе ХАР_КМ
Fig. 1. Image of input data input interface in the program HAR_KM

Ввиду содержания большого объема выходных параметров итоговая таблица в настоящей статье не приводится, а полученные данные будут представлены в виде характеристик элементов холодильной машины. В качестве допущения при реализации указанных выше программ было принято, что в трубопроводах, соединяющих элементы холодильной системы, не происходит изменение состояния рабочего вещества, так как целью данного исследования не являлось исследование потерь давления на всасывании и нагнетании и в клапанной группе. Перегрев холодильного агента на всасывании является постоянной величиной для всех рассматриваемых режимов работы холодильной машины. Через все элементы холодильной машины проходит постоянный массовый расход рабочего вещества [15].

Обсуждение результатов. Характеристики компрессора, представленные на рис. 2 и 3, получены благодаря данным полученным в результате работы программы ХАР_КМ. Как видно из рис.2.а, наилучший результат условная холодопроизводительность имеет при работе компрессора на хладагенте R32, хотя наибольший холодильный коэффициент, если обратить внимание на рис.3, достигается при работе - на R717, затрачивая при этом наименьшую мощность (рис.2,б).



**Рис. 2. Характеристики холодильного компрессора
объемного принципа действия: а – $Q_0 = f(t_0, t_k)$, б – $N_e = f(t_0, t_k)$**
**Fig. 2. Characteristics of the refrigeration compressor
volumetric principle of action: а – $Q_0 = f(t_0, t_k)$, б – $N_e = f(t_0, t_k)$**



**Рис. 3. Характеристика зависимости холодильного коэффициента
от температуры кипения: $\epsilon_e = f(t_0, t_k)$**

**Fig. 3. Characterization of the dependence of the refrigeration coefficient on the boiling point:
 $\epsilon_e = f(t_0, t_k)$**

Если рассматривать холодильную систему в комплексе с теплообменными аппаратами, то в этом случае необходимо учесть гидромеханические условия процессов, происходящих в этих аппаратах [17, 18].

Анализируя влияние характеристик теплообменных аппаратов на совместную характеристику всей холодильной машины в целом видно, что наибольшее влияние идет со стороны

испарителя, а не конденсатора. Это подтверждается, приведенными характеристиками, представленными в работе [15].

В связи с этим проведено более детальное рассмотрение процессов теплообмена, происходящих в испарителе. Данные для данного исследования получены в результате работы программы XAP_ISP.

Рассмотрим основные уравнения, которые были внесены в математическую модель для исследования влияния гидродинамических условий протекания процесса теплообмена в испарителе.

Интенсивность теплоотдачи при процессе кипения в плотных пучках труб испарителя определяется следующим выражением:

$$\alpha = \alpha_{\text{кип}} + \alpha_{\text{конв}},$$

где $\alpha_{\text{кип}}$ – теплоотдача за счёт пузырькового кипения на стенке трубы;

$\alpha_{\text{конв}}$ – конвективная составляющая.

К основным характеристикам двухфазного потока относятся среднее истинное объемное паросодержание $\bar{\phi}$ и объемное расходное паросодержание $\bar{\beta}$, которые можно определить по следующим формулам:

$$\bar{\phi} = \frac{A''}{A},$$

где A'' – сечение, занимаемое паровой фазой, A – сечение трубы

$$\bar{\beta} = \frac{1}{1 + \frac{V'}{V''}},$$

где V' – объемный расход рабочего вещества по жидкой составляющей, V'' – объемный расход рабочего вещества по паровой составляющей.

Истинное паросодержание $\bar{\phi}$ холодильного агента, при работе на гладких трубах, зависит от начального и конечного паросодержания, плотности теплового потока, свойств рабочего вещества, и от геометрических размеров пучка труб в аппарате и определяется следующим образом:

$$\bar{\phi} = 1,809 \frac{(x_k + x_0) q_n \left[(0,57 \cdot z + 1) + 0,866(z - 1) \frac{s'}{d_n} \right]}{(x_k - x_0) r \rho'' \left(\frac{s_1^2}{d_n^2 \cdot \psi} - 0,904 \right) \cdot w_{\text{под}}},$$

где x_0 – начальное паросодержание, x_k – конечное паросодержание, q_n – плотность теплового потока, d_n – наружный диаметр трубы, r – теплота парообразования, ρ'' – плотность пара рабочего вещества, $w_{\text{под}}$ – величина подъема пузырьков пара.

Для определения подъема пузырьков пара $w_{\text{под}}$ применялась формула Франца-Каменецкого, что правомерно, так как в нашем случае диаметр канала существенно выше размера крупных пузырей [19, 20]:

$$w_{\text{под}} = 1,54 \sqrt{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'') / \rho'^2},$$

где g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ' – плотность жидкости рабочего вещества при температуре кипения t_0 , ρ'' – плотность пара холодильного агента при температуре кипения t_0 .

При рассмотрении зависимости $\bar{\phi} = f(q, t_0)$, представленной на рис. 4, видно, что с ростом плотности теплового потока q происходит рост паросодержания холодильных агентов. Наиболее высокие значения $\bar{\phi}$ имеют холодильные агенты R410A и R717.

В связи с этим R717, как и R410A, могут быть рекомендованы для использования в средне и низкотемпературных машинах, на что и указывают в отношении R717 авторы [21, 22].

Холодильный агент R32 лучше всего применять в высокотемпературных холодильных машинах, особенно в аппаратах с медными оребренными трубами. В этом случае низкое паросодержание хладона R32 препятствует образованию «запаривания» верхних слоёв пучка труб, что приводит к повышению уровня холодильного агента в испарителе и увеличению площади рабочей области трубного пучка испарителя. Для данного холодильного агента необходимо провести дополнительные исследования по поиску его альтернативной замены.

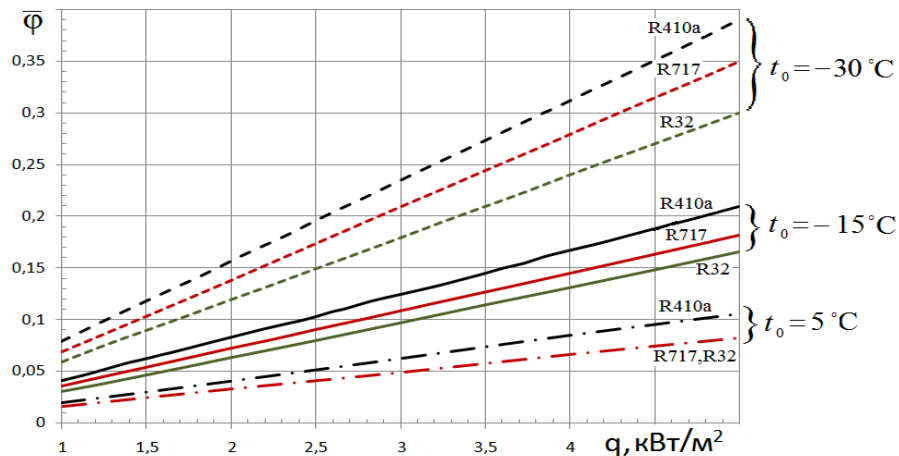


Рис. 4. Зависимость истинного объемного паросодержания от плотности теплового потока
 Fig. 4. The dependence of the true volumetric steam content on the heat flux density

Отношения объемных расходов (пар-жидкость) зависят от истинного объемного паросодержания:

$$\frac{V'}{V''} = \frac{1}{\bar{\phi}} - 1$$

При анализе характеристики $\frac{V'}{V''} = f(q, t_0)$ рис. 5, видно, что в межтрубном пространстве испарителя эти величины имеют высокие значения. Таким образом, зная значения $\bar{\phi}$, можно определить соотношение объемных расходов жидкости и пара, при этом, чем меньше величина истинного объемного паросодержания, тем выше объемный расход жидкости, от которого зависит конвективная составляющая общего теплового потока q .

Это можно объяснить тем, что в межтрубном пространстве теплообменного аппарата имеет место рециркуляция холодильного агента, то есть при кипении холодильного агента происходит подъем пара и жидкости. Значительное превышение расхода жидкости ведет к увеличению скорости парожидкостной смеси и, следовательно, увеличивается конвективная составляющая теплоотдачи.

Наибольшие значения $\frac{V'}{V''}$ наблюдаются у R717 и R410A, что говорит о более высоких скоростях обтекания поперечного пучка труб парожидкостным потоком по сравнению с хладон R32. Коэффициенты теплоотдачи у холодильных агентов R410A и R717 также выше.

Интенсивность теплообмена при кипении, связанная с конвективным переносом тепла за счет движения снизу вверх пара и жидкости определяется как

$$\bar{w}_0 = \frac{\bar{G}''}{\rho'' f} \left[\left(\frac{1}{\Phi} - 1 \right) + \frac{\rho''}{\rho'} \right]$$

где $\bar{G}''$ – массовый расход пара, f – сечение канала.

В затопленных испарителях массовый расход пара, а вместе с ним движение жидкости по высоте трубного пучка увеличивается, следовательно, возрастает расходная скорость, с повышением которой усиливается влияние конвективного теплообмена.

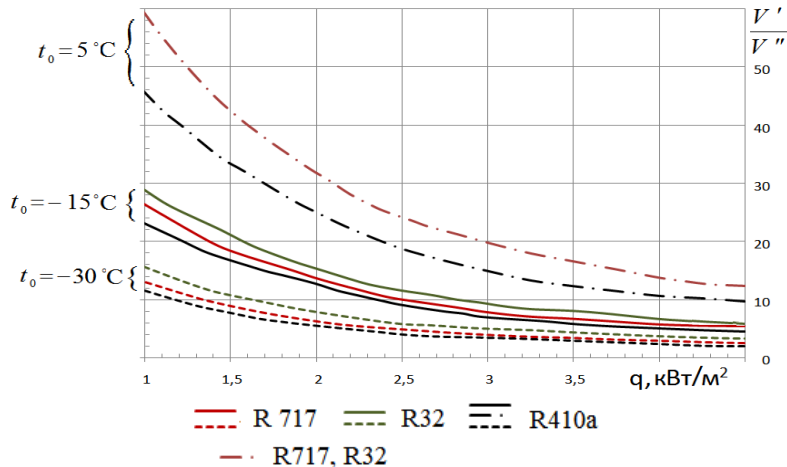


Рис. 5. Зависимость отношения объемных расходов (пар-жидкость) от плотности теплового потока

Fig. 5. The dependence of the ratio of volumetric flow (vapor-liquid) on the density of the heat flux

Расчеты показывают, что в диапазоне плотностей тепловых потоков $q = 1 - 5 \text{ кВт/м}^2$ и температур кипения $t_0 = -30 \text{ °C}$; -20 °C ; -10 °C расходная скорость R717 превышает $\bar{w}_0$ R32 в 1,5 раза, а R410A в 1,7 раза. Коэффициент теплопроводности R717 λ в 4 – 5 раз выше, чем у других рассматриваемых холодильных агентов, что естественно ведет к существенному увеличению конвективной составляющей.

Все вышесказанное подтверждается зависимостями, представленными на рис.6, показывающими изменение коэффициента теплоотдачи α_a в испарителе от плотности теплового потока q . Как видно из рис. 6, коэффициент теплоотдачи со стороны R717 превышает значения других рассматриваемых холодильных агентов.

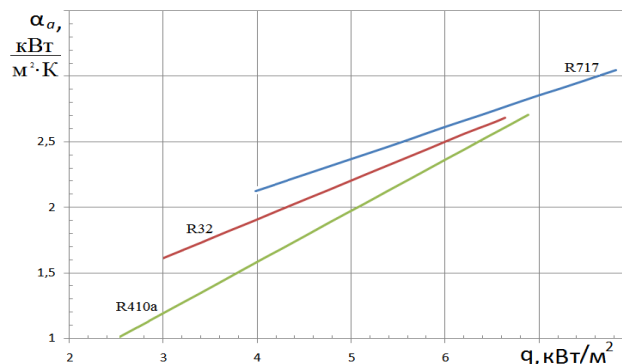


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи в испарителе от плотности теплового потока

Fig. 6. The dependence of the heat transfer coefficient in the evaporator from heat flux density

Экспериментальными исследованиями было подтверждено, что холодильные машины производительностью до 300 кВт, в которых в качестве рабочего вещества применялся R717, а теплообменные аппараты (испаритель и водяной конденсатор) были усовершенствованы, могут конкурировать с агрегатами, имеющими пластинчатые аппараты [11, 12]. Это обусловлено непревзойденными характеристиками R717, что отмечается многими авторами в работах [13, 14].

Вывод. Посредством созданных программ возможно проводить компьютерное моделирование элементов парокомпрессорной холодильной машины, а именно – поршневого компрес-

сора, горизонтального кожухотрубного конденсатора и горизонтального испарителя, затопленного типа. Учитывая гидромеханические условия процессов и проанализировав их, имеется возможность прогнозировать эффективность применения различных холодильных агентов в парокомпрессорных холодильных машинах.

С помощью реализованных алгоритмов возможно получать характеристики элементов парокомпрессорной холодильной машины в широком диапазоне изменения температур кипения и конденсации с учетом различных факторов и процентного состава смесового рабочего вещества, что весьма актуально при переводе машин на альтернативные холодильные агенты.

Следует отметить, что R717, как холодильный агент, обращает на себя внимание своей экологической безопасностью, массовым производством и низкой стоимостью и может быть альтернативной заменой рабочих веществ, работающих в средне- и низкотемпературных машинах. Но стоит помнить, что R717 опасен для человека и его применение в холодильной технике должно быть доказано в каждом конкретном случае.

Библиографический список:

1. Хозяинова Е.Л. Охрана Озонового слоя: Россия и Европа // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. 2017. №2. С. 12-39.
2. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А. Посткиотские тенденции и синдромы устойчивого развития техники низких температур. //Холодильный бизнес. 2015. № 3. С. 22-27.
3. Zhuli Sun, Qifan Wang и др. Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system. Energy 170 (2019), 1170 – 1180
4. Mota-Babiloni A, Makhnatch P, Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: focus on energetic performance and environmental impact. Int J Refrig 2017;82:288e301.
5. Lee SJ, Shon BH, Jung CW, Kang YT. A novel type solar assisted heat pump using a low GWP refrigerant (R-1233zd(E)) with the flexible solar collector. Energy 2018;149:386e96.
6. Boyaghchi FA, Chavoshi M, Sabeti V. Optimization of a novel combined cooling, heating and power cycle driven by geothermal and solar energies using the water/CuO (copper oxide) nanofluid. Energy 2015;91:685e99.
7. Harby K. Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: an updated overview. Renew Sustain Energy Rev 2017;73:1247e64.
8. Yari M, Mahmoudi SMS. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO₂) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO₂ cycle). Energy 2011;36(12):6839e50.
9. Gullo P, Elmegaard B, Cortella G. Advanced exergy analysis of a R744 booster refrigeration system with parallel compression. Energy 2016;107:562e71.
10. Бабакин Б.С., Воронин М., Белозеров А.Г., Бабакин С.Б., Данилин В.И. Хладагенты и их воздействие на окружающую среду // Молочная промышленность. 2016. №6. С.12-14.
11. Испаритель затопленного типа: А.С. №1143945 / Мизин В.М., Малявко Д.П., Сысоев В.Л. и др.; ЛТИХП и Черкасский завод холодильного машиностроения–№3551155/23–06; заявл. 09.02.83; опубл. 07.03.85., Бюл. №9(72).
12. Мизин В.М., Цветков А.А. Инновационные методы повышения эффективности существующих типов кожухотрубных аппаратов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. №3. С. 71-77.
13. Братуа Э.Г., Шерстюк В.Г. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиака в холодильной промышленности // Интернет-газета Холодильщик.RU. 2009. № 3(51).
14. Zahid H. Ayub Current and future prospects of enhanced heat transfer in ammonia systems //International Journal of Refrigeration. 2008. № 31(4). P.652-657.
15. Татаренко Ю.В. Введение в математическое моделирование характеристик паровых компрессорных холодильных машин. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 100 с.
16. Маркова К.М., Татаренко Ю.В. Математическая модель паровой холодильной машины, работающая на различных рабочих веществах // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г.): Материалы конференции. 2015. Часть 1. С. 175-178.
17. Мизин В.М. Влияние гидродинамических условий на кипение различных рабочих веществ в испарителях затопленного типа // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г.): Материалы конференции. 2015. Часть 1. С. 165-168.
18. Мальшев А. А., Мамченко В. О., Мизин В.М. , Потанина А.В., Девятов Т.И., Прошин С. И. Перспективные типы испарителей холодильных машин // Вестник МАХ. 2013. №2 (47). С. 13-19.
19. Ciconkov R. Refrigeration: Solved Examples, Skopje, 2016. 280 p.
20. Kakac S. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. Taylor Francis Inc, United States, 2012. 491 p

21. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Книга по требованию, 2012. 415с.
22. Bolaji B.O., Akintaro A.O., Alamu O.J., Olayanju, T.M.A Design and performance of a cooler refrigeration system working with ozone friendly refrigerant//The Open Thermodynamics Journal.2012. №6. pp. 25-32.

References:

1. Khozyainova Ye.L. Okhrana Ozonovogo sloya: Rossiya i Yevropa // Akademiya pedagogicheskikh idey Novatsiya. Seriya: Studencheskiy nauchnyy vestnik. 2017. №2. S. 12-39. [Khozyainova E.L. Protection of the Ozone Layer: Russia and Europe // Academy of Pedagogical Ideas Novation. Series: Student Scientific Herald. 2017. No2. S. 12-39. (In Russ.)]
2. Tsvetkov O.B., Laptev YU.A. Postkiotskiye tendentsii i sindromy ustoychivogo razvitiya tekhniki nizkikh temperatur. //Kholodil'nyy biznes. 2015. № 3. S. 22-27. [Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A. Post-Kyoto trends and syndromes of sustainable development of low temperature technology. // Refrigeration business. 2015. No. 3. P. 22-27. (In Russ.)]
3. Zhuli Sun, Qifan Wang et al. Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system. Energy 170 (2019), 1170 - 1180
4. Mota-Babiloni A., Makhnatch P, Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: focus on energetic performance and environmental impact. Int J Refrig 2017; 82: 288e301.
5. Lee SJ, Shon BH, Jung CW, Kang YT. A novel type solar assisted heat pump using a low GWP refrigerant (R-1233zd (E)) with the flexible solar collector. Energy 2018; 149: 386e96.
6. Boyaghchi FA, Chavoshi M, Sabeti V. Optimization of a novel combined cooling, heating and power cycle driven by geothermal and solar energies using the water / CuO (copper oxide) nanofluid. Energy 2015; 91: 685e99.
7. Harby K. Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: an updated overview. Renew Sustain Energy Rev 2017; 73: 1247e64.
8. Yari M, Mahmoudi SMS. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO₂) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO₂ cycle). Energy 2011; 36 (12): 6839e50.
9. Gullo P, Elmegaard B, Cortella G. Advanced exergy analysis of a R744 booster refrigeration system with parallel compression. Energy 2016; 107: 562e71.
10. Babakin B.S., Voronin M., Belozarov A.G., Babakin S.B., Danilin V.I. Khladagenty i ikh vozdeystviye na okruzhayushchuyu sredu // Molochnaya promyshlennost'. 2016. №6. S.12-14. [Babakin B.S., Voronin M., Belozarov A.G., Babakin S.B., Danilin V.I. Refrigerants and their impact on the environment // Dairy industry. 2016. No.6. S.12-14.
11. Isparitel' zatoplennoy tipa: A.S. №1143945 / Mizin V.M., Malyavko D.P., Sysoyev V.L. i dr.; LTIKHP i Cherkasskiy zavod kholodil'nogo mashinostroyeniya–№3551155/23–06; zayavl. 09.02.83; opubl. 07.03.85., Byul. №9(72). [The flooded type evaporator: A.S. No. 1143945 / Mizin V.M., Malyavko D.P., Sysoyev V.L. and etc.; LTIHP and Cherkasy Refrigeration Engineering Plant — No. 3551155 / 23–06; 02/09/83; publ. 03/07/85., Bull. No. 9 (72). (In Russ.)]
12. Mizin V.M., Tsvetkov A.A. Innovatsionnyye metody povysheniya effektivnosti sushchestvuyushchikh tipov kholodil'nykh apparatov // Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye. 2014. №3. S. 71-77. [Mizin V.M., Tsvetkov A.A. Innovative methods to improve the efficiency of existing types of shell-and-tube apparatuses // Scientific journal NRU ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning. 2014. No3. S. 71-77. (In Russ.)]
13. Bratua E.G., Sherstyuk V.G. Osnovnyye aspekty kompleksnogo podkhoda k rasshireniyu primeneniya ammiaka v kholodil'noy promyshlennosti // Internet-gazeta Kholodil'shchik.RU. 2009. № 3(51). [Bratua EG, Sherstyuk VG The main aspects of an integrated approach to the expansion of the use of ammonia in the refrigeration industry // Internet newspaper Kholodil'shchik.RU. 2009.No 3 (51). (In Russ.)]
14. Zahid H. Ayub Current and future prospects of enhanced heat transfer in ammonia systems // International Journal of Refrigeration. 2008. No. 31 (4). R.652-657.
15. Tatarenko YU.V. Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye kharakteristik parovykh kompressornykh kholodil'nykh mashin. SPb.: Universitet ITMO, 2015. 100 s. [Tatarenko Yu.V. Introduction to mathematical modeling of the characteristics of steam compressor refrigeration machines. St. Petersburg: ITMO University, 2015. 100 p. (In Russ.)]
16. Markova K.M., Tatarenko YU.V. Matematicheskaya model' parovoy kholodil'noy mashiny, rabotayushchaya na razlichnykh rabochikh veshchestvakh // VII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke» (Cankt-Peterburg, 17–20 noyabrya 2015 g.): Materialy konferentsii. 2015. Chast' 1. S. 175-178. [Markova K.M., Tatarenko Yu.V. A mathematical model of a steam refrigeration machine operating on various working substances // VII International Scientific and Technical Conference "Low-temperature and food technologies in the XXI century" (St. Petersburg, November 17–20, 2015): Conference proceedings. 2015. Part 1. S. 175-178. (In Russ.)]
17. Mizin V.M. Vliyaniye gidrodinamicheskikh usloviy na kipeniye razlichnykh rabochikh veshchestv v isparitelyakh zatoplennoy tipa // VII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke» (Cankt-Peterburg, 17–20 noyabrya 2015 g.): Materialy konfer-

- entsii. 2015. Chast' 1. S. 165-168. [Mizin V.M. The influence of hydrodynamic conditions on the boiling of various working substances in flooded type evaporators // VII International Scientific and Technical Conference "Low-temperature and Food Technologies in the XXI Century" (St. Petersburg, November 17–20, 2015): Conference proceedings. 2015. Part 1. S. 165-168. (In Russ.)]
18. Malyshev A. A., Mamchenko V. O., Mizin V.M. , Potanina A.V., Devyatov T.I., Proshin S. I. Perspektivnyye tipy ispariteley kholodil'nykh mashin//Vestnik MAKH. 2013. №2 (47). S. 13-19. [Malyshev A. A., Mamchenko V. O., Mizin V. M. , Potanina A.V., Devyatov T.I., Proshin S.I. Promising types of evaporators for refrigerating machines // Vestnik MAX. 2013. No2 (47). S. 13-19. (In Russ.)]
19. Ciconkov R. Refrigeration: Solved Examples, Skopje, 2016. 280 p.
20. Kakac S. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. Taylor Francis Inc, United States, 2012. 49 p
21. Kutateladze S.S., Borishansky V.M. Spravochnik poteploperedache. Kniga potrebvaniyu, 2012. 415s. [Kutateladze S.S., Borishansky V.M. Handbook of heat transfer. The book on consumption, 2012. 415s. (In Russ.)]
22. Bolaji B.O., Akintaro A.O., Alamu O.J., Olayanju, T.M. A Design and performance of a cooler refrigeration system working with ozone friendly refrigerant//The Open Thermodynamics Journal. 2012. No. 6. pp. 25-32.

Сведения об авторах:

Татаренко Юлия Валентиновна, кандидат технических наук, доцент, факультет низкотемпературной энергетики; e-mail: lavrtat@mail.ru

Мизин Валерий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, факультет низкотемпературной энергетики; e-mail: Valeriy-Mizin@yandex.ru

Рачковский Никита Олегович, аспирант, факультет низкотемпературной энергетики; e-mail: rachkovskiy.nikita@mail.ru

Information about the authors:

Julia V. Tatarenko, Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Faculty of Low Temperature Energy; e-mail: lavrtat@mail.ru

Valeriy M. Mizin, Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Faculty of Low Temperature Energy; e-mail: Valeriy-Mizin@yandex.ru

Nikita O. Rachkovskiy, Aspirant, Faculty of Low Temperature Energy; e-mail: rachkovskiy.nikita@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.07.2019.

Принята в печать 10.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.07.2019.

Accepted for publication 10.09.2019.

Для цитирования: Хазамова М.А., Магомедов Д.А., Кобзаренко Д.Н. Моделирование работы термоэлектрического устройства для теплового воздействия на стопу в нестационарных условиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 43-52. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-43-52

For citation: M.A. Khazamova, D.A. Magomedov, D.N. Kobzarenko. Modelling the effect of a Thermoelectric Device on the Foot under Ambulatory conditions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 43-52. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-43-52

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-43-52

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТОПУ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Хазамова М.А.¹, Магомедов Д.А.¹, Кобзаренко Д.Н.²

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Институт проблем геотермии,

²367000, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 39А, Россия

Резюме. Цель Целью исследования является изучение теплофизических процессов, происходящих при тепловом воздействии на рефлекторные зоны человеческого организма, в частности рефлексогенные зоны стопы человека, в условиях нестационарного режима. **Метод** Разработана модель теплового воздействия на рефлекторные зоны человеческого организма на основе полупроводникового термоэлектрического устройства. Предложена упрощенная физическая модель, не рассматривающая теплообмен в термоэлектрических батареях (ТЭБ) и элементах сопряжения ТЭБ с отдельными рефлекторными зонами. **Результат** Получены графики распределения температуры по толщине ступни при различных значениях теплового потока, графики изменения температуры во времени. Влияние теплового воздействия ТЭБ, приведенной в тепловой контакт с противоположной поверхностью стопы, незначительно, что является следствием низкой теплопроводности тканей стопы, а также незначительными тепловыми потоками на ее поверхности (для процедур используются маломощные ТЭБ). **Вывод** Разработанная модель полупроводникового термоэлектрического устройства для воздействия на рефлекторные зоны человеческого организма, в частности на область стопы, позволяет исследовать теплофизические процессы, происходящие при тепловом воздействии на биологически активные точки подошвы стопы человека. Установлено, что при локальном температурном воздействии на биологический объект не наблюдается существенного перепада температуры по его толщине.

Ключевые слова: термоэлектричество, термоэлектрическое устройство, рефлексогенные зоны, тепловое воздействие, стопа, модель, нестационарный

MODELLING THE EFFECT OF A THERMOELECTRIC DEVICE ON THE FOOT UNDER AMBULATORY CONDITIONS

M.A. Khazamova¹, D.A. Magomedov¹, D.N. Kobzarenko²

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Institute of Geothermal Problems,

²39 A I. Shamilya Ave., Makhachkala 367000, Russia

Abstract Objectives This work was devoted to the research of thermal processes that occur in the reflex areas of the human body, in particular, in reflexogenic areas of the human foot, under the thermal influence under ambulatory conditions. **Method** A model of thermal impact on the reflex areas of the human body was developed on the basis of a semiconductor thermoelectric device. A simplified physical model was studied, which does not consider heat exchange in thermoelectric batteries (TEBs) and elements of TEBs pairing with separate reflex zones. **Results** Diagrams for temperature distribution throughout the foot at different values of heat flow and diagrams of temperature changes over time were obtained. The thermal influence of a TEB brought in thermal contact with the opposite surface of the foot is negligible in this case; this is due to the low thermal conductivity of foot tissues, as well as insignificant thermal flows on its surface (low-power TEBs were used for such procedures). **Conclusion** The developed model of a semiconductor thermoelectric device for treating the reflex areas of the human body – in particular, the foot – allows an investigation of thermal processes occurring during the thermal treatment of biologically active points of the human sole. It is established that local temperature impact on a biological object does not result in significant temperature difference over its thickness.

Keywords: thermoelectricity, thermoelectric device, reflexogenic zones, thermal impact, foot, model, ambulation

Введение. Одним из отличительных свойств современной медицины является непрерывное появление новых лекарственных средств. Однако, это, в общем, положительное явление имеет и обратную сторону, так как мало кто из врачей анализирует отдаленные негативные последствия их применения, к которым следует отнести различные аллергические реакции. В настоящее время широко известны примеры негативного побочного действия синтетических лекарств, в связи с чем, возрастает роль немедикаментозных методов лечения, которые становятся все более и более востребованными пациентами, обращающимися за медицинской помощью. Немедикаментозные лечебные воздействия занимают достойное место среди других методов и приобретают особую актуальность в современных условиях, когда отмечается повышенная частота непереносимости многих лекарственных веществ, а иногда и их недоступность. Среди немедикаментозных методов особое место занимают естественные физические факторы, обладающие адаптогенным, успокаивающим, болеутоляющим, антисептическим действием [4,5,9,15].

Одним из наиболее широко применяемых средств является локальное тепловое воздействие, как эффективный метод медицинской реабилитации. Факторы теплового воздействия применяются в период реконвалесценции для стимуляции жизнедеятельности организма, травматических поражениях опорно-двигательного аппарата, в период заживления ран, при артритах, заболеваниях суставов и т.п. Преимущество методик в медицинской реабилитации, связанной с тепловым воздействием, состоит в том, что они стимулируют собственные силы организма, то есть процессы саногенеза, практически не имеют противопоказаний и не приводят к осложнениям при применении [7,9].

Особенно эффективно тепловое воздействие на рефлекторные зоны человеческого организма. К таким зонам относятся ладонная поверхность кисти, подошвенная поверхность стопы, ушная раковина, зона области носа и т.д. [1]. Лечебная эффективность теплового воздействия на стопу обусловлена тем, что на ее подошве сконцентрирована масса кожных рецепторов с нервными окончаниями, через которые организм связан с внешней средой [13,19]. Стимуляция этих зон приводит к определённым реакциям со стороны внутренних органов. Именно поэтому разработка и исследование термоэлектрической системы для контрастного теплового воздействия на рефлекторные зоны, преимущественно на область подошвы стопы, является актуальной.

Постановка задачи. Наиболее результативным терапевтическим фактором, применяемым в рефлексотерапии, является воздействие теплом и холодом на кожные рецепторы. Использование контрастного теплового воздействия способствует усилению лечебных эффектов, направляет кровоток то к коже, то в глубь организма, улучшает микроциркуляторные процессы [1,2,6,14,15]. Это можно реализовать в термоэлектрических устройствах для воздействия на стопу человека, в которых ТЭБ, выступая в качестве основного исполнительного элемента, работает в режиме нагрева или охлаждения [3,8].

Целью данной статьи является моделирование теплофизических процессов, происходящих при проведении теплового воздействия на область стопы человека посредством термоэлектрического устройства (ТЭУ) в нестационарном режиме.

Методы исследования. В НИИ «Полупроводниковые термоэлектрические приборы и устройства» при ФГБОУ ВО «ДГТУ» разработан ряд ТЭУ для теплового воздействия на область стопы человека [16-18].

Наиболее общая конструктивная схема воздействия реализована в приборе, изображенном на рис.1. В данном случае тепловому воздействию подвергается не только подошва стопы, но и ее тыльная поверхность, также содержащая кожные рецепторы, что усиливает эффективность проводимых процедур.

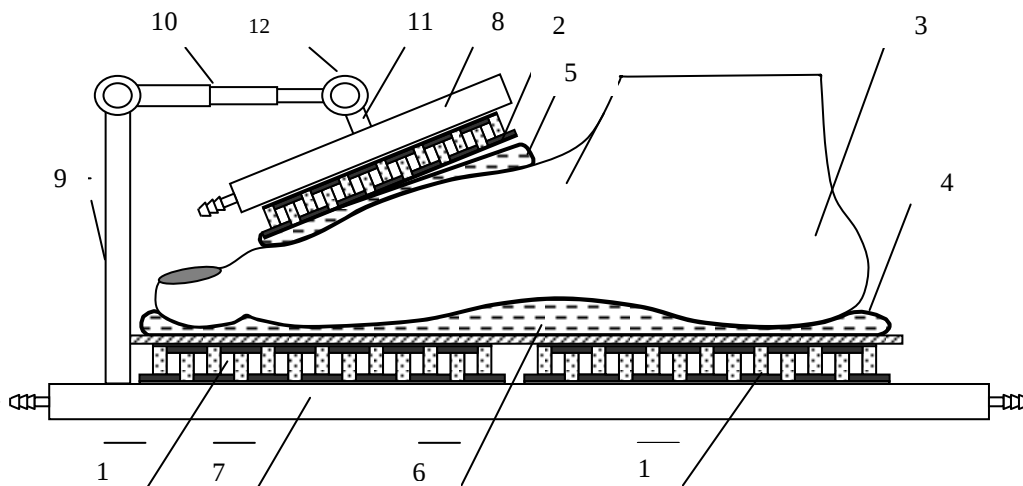


Рис. 1. Структурная схема термоэлектрического устройства для локального теплового воздействия на стопу человека

Fig. 1. The structural diagram of a thermoelectric device for local thermal effects on the foot of a person

Устройство содержит две ТЭБ 1 и 2, первыми спаями, находящиеся в тепловом контакте со стопой человека 3 через прослойки, выполненные в виде герметичных тонкостенных эластичных емкостей из высокотеплопроводного материала 4 и 5, заполненных жидкостью с высоким коэффициентом теплопроводности 6. Отвод тепла со вторых спаев ТЭБ 1 и 2 производится жидкостными теплообменниками 7 и 8 соответственно.

ТЭБ 1 первыми спаями сопряжена через тонкостенную эластичную емкость 4 с нижней поверхностью стопы человека. ТЭБ 2 посредством стойки, состоящей из секций 9, 10, 11, соединенных между собой шарнирами 12, прилегает через тонкостенную эластичную емкость 5 к

верхней поверхности стопы человека. Секция 10 стойки выполнена телескопически. Управление режимами работы ТЭБ 1 и 2 осуществляется двухканальным программируемым источником электрической энергии (на рис.1 не указан). Независимое управление работой ТЭБ 1 осуществляется по одному каналу, ТЭБ 2 – по другому.

Для расчета нестационарной тепловой задачи упрощенной физической модели, не рассматривающей теплообмен в термоэлектрических батареях (ТЭБ) и элементах сопряжения ТЭБ с отдельными зонами конечностей использовалась тепловая схема, приведенная на рис. 2.



Рис. 2. Тепловая схема термоэлектрического устройства для локального теплового воздействия на стопу человека

Fig. 2. Thermal diagram of a thermoelectric device for local thermal effects on the foot of a person

Данная модель (рис. 2) представляет собой систему, состоящую из объекта воздействия (стопа), на нижнюю и верхнюю поверхность которой оказывается температурное воздействие [12]. Биологический объект рассматривается в качестве необходимого условия при исследовании нестационарного режима работы термоэлектрического устройства, что определяется необходимостью попеременного воздействия «тепло» - «холод».

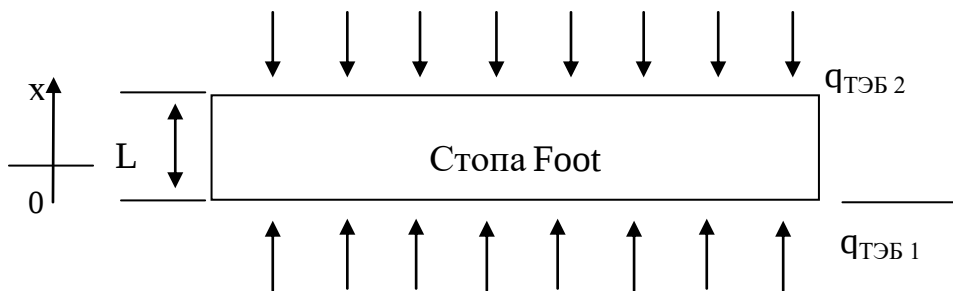


Рис. 3. Физическая модель термоэлектрического устройства для локального теплового воздействия на стопу человека

Fig. 3. Physical model of a thermoelectric device for local thermal effects on the human foot

математическая формулировка задачи имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_{ТЭБ 1}, \quad (1)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

здесь $q_{ТЭБ 1} = \frac{q_{вн}}{c\rho}$;

с граничными условиями

$$T|_{x=0} = T_1, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{ТЭБ 2}, \quad (3)$$

и начальным условием

$$T(x)|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

где $q_{ТЭБ 2}$ - тепловой поток на внутренних спаях ТЭБ, возникающий вследствие поглощения (выделения) теплоты Пельтье; λ - коэффициент теплопроводности стопы; c - теплоемкость

ступни; ρ - плотность объекта воздействия, T_0 - температура участка человеческого организма при отсутствии воздействия (в большинстве случаев $36,6^{\circ}\text{C}$); T_1 - температура на верхней поверхности стопы (предусматривается интенсивный теплообмен с окружающей средой), L - толщина ступни.

Для решения данной задачи воспользуемся методом интегральных преобразований [20]. Для этого произведем следующую замену:

$$T(x, s) = \int_0^{\infty} e^{-st} T(x, t) dt \quad (5)$$

Тогда выражения (1) - (4) переписутся в виде:

$$sT(x, s) - T_0 = a \frac{d^2 T(x, s)}{dx^2} + \frac{q_{TЭБ1}}{s} \quad (6)$$

$$T(x=0, s) = \frac{T_1}{s} \quad (7)$$

$$\lambda \left. \frac{dT(x, s)}{dx} \right|_{x=L} = \frac{q_{TЭБ2}}{s}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} T(x, s) - \frac{sT(x, s)}{a} + \frac{1}{a} T_0 + \frac{q_{TЭБ1}}{as} = 0 \quad (8)$$

или введя замену

$$\tilde{T}(x, s) = T(x, s) - \frac{1}{s} T_0 - \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 \tilde{T}(x, s)}{dx^2} - \frac{s}{a} \tilde{T}(x, s) = 0 \quad (10)$$

$$\tilde{T}(0, s) = \frac{T_1 - T_0}{s} - \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} \quad (11)$$

$$\lambda \left. \frac{d\tilde{T}(x, s)}{dx} \right|_{x=L} = \frac{q_{TЭБ2}}{s} \quad (12)$$

Решение уравнения (10) выглядит следующим образом:

$$\tilde{T}(x, s) = A e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} x} + B e^{\sqrt{\frac{s}{a}} x}, \quad (13)$$

где коэффициенты А и В определяются из граничных условий (11)- (12):

$$\left\{ \begin{aligned} A + B &= \frac{T_1 - T_0}{s} - \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} \\ -A e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} L} + B e^{\sqrt{\frac{s}{a}} L} &= \frac{q_{TЭБ2}}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{a}}{s\sqrt{s}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\tilde{T}(x, s) = \frac{\text{sh}\sqrt{\frac{s}{a}} x}{\text{ch}\sqrt{\frac{s}{a}} L} \frac{q_{TЭБ2}}{L} \frac{\sqrt{a}}{s^{3/2}} + \frac{\text{ch}\sqrt{\frac{s}{a}} (x-L)}{\text{ch}\sqrt{\frac{s}{a}} L} \left(\frac{T_1 - T_0}{s} - \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} \right) \quad (15)$$

Окончательно после соответствующих преобразований получим:

$$T(x, s) = \frac{T_0}{s} + \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} + \frac{q_{TЭБ2} \sqrt{a}}{\lambda} \frac{sh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{s^{3/2} ch \sqrt{\frac{s}{a}} L} + \frac{T_1 - T_0}{s} \frac{ch \sqrt{\frac{s}{a}} (x - L)}{ch \sqrt{\frac{s}{a}} L} - \frac{q_{TЭБ1}}{s^2} \frac{ch \sqrt{\frac{s}{a}} (x - L)}{ch \sqrt{\frac{s}{a}} L} \quad (16)$$

По найденному изображению (16) найдем оригинал по формулам:

$$\frac{1}{s} \div 1 \quad (17)$$

$$\frac{1}{s^2} \div t \quad (18)$$

Представим функцию в виде

$$\frac{sh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{\sqrt{\frac{s}{a}} sch \sqrt{\frac{s}{a}} L} = \frac{\phi(s)}{\psi(s)} \quad (19)$$

При этом

$$\phi(s) = \frac{sh \sqrt{\frac{s}{a}} x}{\sqrt{\frac{s}{a}}} = \frac{\sqrt{\frac{s}{a}} x + \frac{1}{3!} (\sqrt{\frac{s}{a}} x)^3 + \frac{1}{5!} (\sqrt{\frac{s}{a}} x)^5}{\sqrt{\frac{s}{a}}} = x + \frac{1}{3!} (\sqrt{\frac{s}{a}} x)^2 + \frac{1}{5!} (\sqrt{\frac{s}{a}} x)^4 + \dots \quad (20)$$

а

$$\psi(s) = sch \sqrt{\frac{s}{a}} L \quad (21)$$

Найдем корни функции $\psi(s)$.

$$\begin{aligned} \psi'(s) &= ch \sqrt{\frac{s}{a}} L + s \left(\sqrt{\frac{s}{a}} \right)' L sh \sqrt{\frac{s}{a}} L = ch \sqrt{\frac{s}{a}} L + \frac{1}{2} \frac{s}{\sqrt{sa}} L sh \sqrt{\frac{s}{a}} L = \\ &= ch \sqrt{\frac{s}{a}} L + \frac{L}{2} \sqrt{\frac{s}{a}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} L \end{aligned} \quad (22)$$

После всех соответствующих преобразований окончательно оригинал изображения (16) имеет вид:

$$\begin{aligned} T(x, t) &= T_0 + q_1 t + \frac{q_2}{\lambda} \left[x - L \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1}}{\mu_n^2} \sin \left(\mu_n \frac{x}{L} \right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \right] + \\ &+ (T_1 - T_0) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1}}{\mu_n} \cos \left(\mu_n \frac{x-L}{L} \right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \right] - \\ &- q_1 \left[t + \frac{x^2 - 2xL}{2a} + \frac{L^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1}}{\mu_n^3} \cos \mu_n \frac{x-L}{L} e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \right] = \\ &= T_0 + q_1 t + \frac{q_2}{\lambda} x + (T_1 - T_0) - q_1 t - q_1 \frac{x^2 - 2xL}{2a} - \\ &- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1}}{\mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \\ &\left[\frac{q_2 L}{\lambda \mu_n} \sin \mu_n \frac{x}{L} + (T_1 - T_0) \cos \left(\mu_n \frac{x-L}{L} \right) + \frac{q_1 L^2}{a \mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x-L}{L} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

После соответствующих преобразований:

$$T(x, t) = T_1 + \frac{q_{TЭБ2}}{\lambda} x - q_{TЭБ1} \frac{x^2 - 2xL}{2a} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (-1)^{n+1}}{\mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{at}{L^2}} \left\{ \frac{q^2 L}{\lambda \mu_n} \sin \mu_n \frac{x}{L} + (T_1 - T_0 + \frac{q_1 L^2}{a \mu_n^2}) \cos \mu_n \frac{x-L}{L} \right\} \quad (24)$$

Обсуждение результатов. На основе предложенной математической модели произведен численный эксперимент. Расчеты проводились в пакете прикладных программ MATHCAD 11 при следующих исходных данных: $\lambda = 0,4$ Вт/(м·К), $L = 0,04$ м, $q_1 = 10^{-6}$ Вт/кг, $q_2 = 1000$ Вт/м², $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$ м²/(К·с), $T_1 = 285$ К; $T_0 = 310$ К, $t = 0 \dots 600$ с. $x = 0 \dots 0,04$.

На рис. 4-6 представлены графики распределения температуры по толщине ступни при разных значениях $q_{TЭБ2}$.

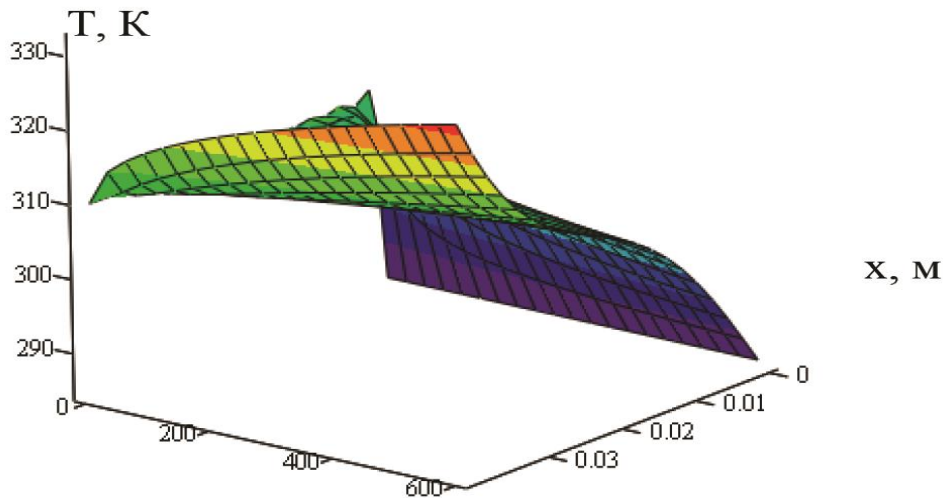


Рис. 4. Распределение температуры по толщине стопы (охлаждение с одной стороны, нагрев - с другой) при $q_2 = 1000$, $T_1 = 285$ К, $T_0 = 310$ К

Fig. 4. Temperature distribution over the thickness of the foot (cooling on the one hand, heating on the other) at $q_2 = 1000$, $T_1 = 285$ К, $T_0 = 310$ К

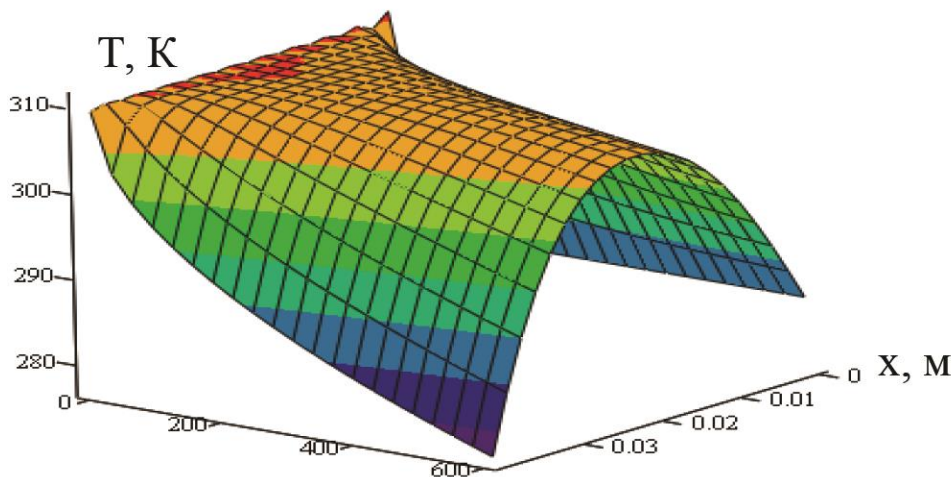


Рис. 5. Распределение температуры по толщине стопы (охлаждение) при $q_2 = -1500$, $T_1 = 285$ К, $T_0 = 310$ К

Fig. 5. Temperature distribution over the thickness of the foot (cooling) at $q_2 = -1500$, $T_1 = 285$ К, $T_0 = 310$ К

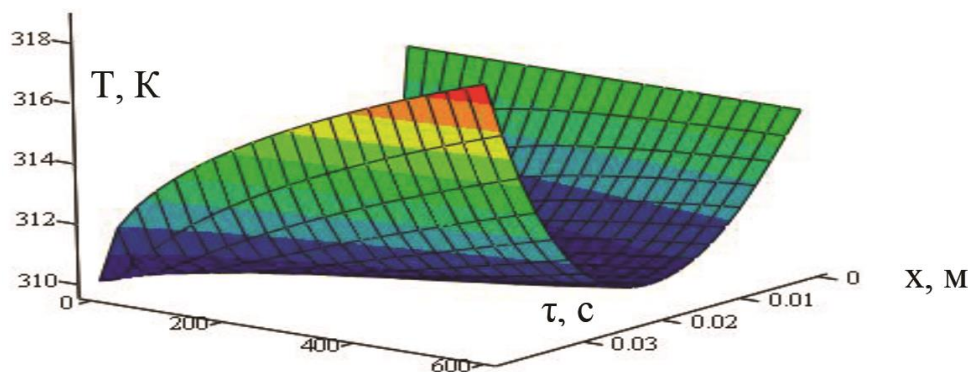


Рис. 6. Распределение температуры по толщине стопы (нагрев) при $q_2=400$, $T_1=315\text{K}$, $T_0=310\text{K}$
Fig. 6. Temperature distribution over the thickness of the foot (heating) at $q_2 = 400$, $T_1 = 315\text{K}$, $T_0 = 310\text{K}$

Согласно приведенным данным, взаимное влияние изменения температуры на противоположных поверхностях стопы незначительно. Понижение (повышение) температуры участков стопы, близлежащих к поверхности (кожного покрова), зависит только от холодопроизводительности (теплопроизводительности) ТЭБ, непосредственно контактирующей с ними. Влияние теплового воздействия ТЭБ, приведенной в тепловой контакт с противоположной поверхностью стопы, незначительно, что является следствием низкой теплопроводности тканей стопы, а также незначительными тепловыми потоками на ее поверхности (для процедур используются маломощные ТЭБ).

Вывод. Приведенные зависимости позволяют произвести количественную оценку интенсивности теплового воздействия при определенных значениях теплового потока на поверхность биологического объекта и определить продолжительность выхода на режим системы: прибор - объект воздействия. Анализ результатов численного эксперимента показал целесообразность и перспективность использования ТЭБ в качестве источников тепла и холода. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового воздействия на стопу человека при различных величинах холодопроизводительности ТЭБ, обладает допустимой инерционностью, что является немаловажным фактором, позволяющим повысить эффективность при проведении терапевтических процедур и применении данного устройства в реабилитационных отделениях и лечебно-профилактических учреждениях широкого профиля [10, 11, 16].

Библиографический список:

1. Krukowska J., Lukasiak A., Czernicki J. Impact of magneto stimulation on nerve and muscle electrical excitability in patients with increased muscle tone. Polish annals of medicine. 2012;19:15-20
2. Ping Y. Approach on thermoelectricity reliability of board - level backplane based on the orthogonal experiment design // International journal of materials and structural integrity. - 2010. - №4.
3. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. – 2012.
4. SennogaTwaha, Jie Zhu, Yuying an, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement / Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 65, November 2016. - P. 698-726.
5. Tiffany Field Massage therapy research review / Complementary Therapies in Clinical Practice, Volume 24, August 2016. pp. 19-31.
6. Tiffany Field, Miguel Diego, Gladys Gonzalez, C.G. Funk Neck arthritis pain is reduced and range of motion is increased by massage therapy / Complementary Therapies in Clinical Practice, Volume 20, Issue 4, November 2014. pp. 219-223.
7. Verhagen John. Massage therapy has short-term benefits for people with common musculoskeletal disorders compared to no treatment: a systematic review / Journal of Physiotherapy.2015. No.61. pp.106-116.
8. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
9. Белик В.Д., Урюков Б.А., Фролов Г.А. Ткаченко Г.В. Численно-аналитический метод решения нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности // Инженерно-физический журнал. - 2008. №6.

10. Боголюбов В.М., Улащик В.С. Комбинирование и сочетание лечебных физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2004. - № 5 –С.39-45.
11. Евдулов О.В., Кадилова Д.К., Магомедова С.Г., Рагимова Т.А., Хазамова М.А. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на стопу человека.// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(1). С. 60-72.
12. Евдулов О.В., Хазамова М.А. Математическая модель полупроводникового термоэлектрического устройства для теплового воздействия на стопу человека // Известия вузов. Приборостроение. - 2004. - №7. - С. 43-49. 20. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. Пер. с англ. М.: Мир. - 1988. - 544 с.
13. Епифанов В. А. Восстановительная медицина [Текст] : учебник / В. А. Епифанов. - М. : ГЭОТАР-Медиа, 2012. - 304 с.
14. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А. Расчет температурного поля зоны человеческого организма при локальном тепловом воздействии устройством на базе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей // Вестник МАХ. 2010. № 1.
15. Олефиренко В.Т. Водотеплолечение. М.:Медицина, 1986. 288с.
16. Патент №2245693 РФ. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для локального температурного воздействия на стопу человека / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Хазамова М.А.- № 2002125785; Оpubл. 10.02.2005, Бюл. № 4 – 3с.
17. Патент №2245694 РФ. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для локального температурного воздействия на стопу человека / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Зарат А., Евдулов О.В., Хазамова М.А.- № 2002125786; Оpubл. 10.02.2005, Бюл. № 4 – 3с.
18. Патент №2299711 РФ. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для локального температурного воздействия на рефлексогенные зоны ноги человека / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А., Хазамова М.А.- № 2003113991; Оpubл. 27.05.2007, Бюл. № 15 – 4с.
19. Физическая реабилитация /под общ. ред. проф. Попова С.М. 2 изд.Ростов н/Д:Феникс, 2004.608 с.
20. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. Пер. с англ. М.: Мир. 1988. 544 с.

References:

1. Krukowska J., Lukasiak A., Czernicki J. the Impact of magneto stimulation on nerve and muscle electrical excitability in patients with increased muscle tone. Polish annals of medicine. 2012;19:15-20
2. Ping Y. Approach on thermoelectricity reliability of board - level backplane based on the orthogonal experiment design // International journal of materials and structural integrity. 2010. No. 4.
3. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012.
4. SennogaTwaha, Jie Zhu, Yuying an, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement / Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 65, November 2016. pp. 698-726.
5. Tiffany Field Massage therapy research review / Complementary Therapies in Clinical Practice, Volume 24, August 2016. pp. 19-31.
6. Tiffany Field, Miguel Diego, Gladys Gonzalez, C. G. Funk Neck arthritis pain is reduced and range of motion is increased by massage therapy / Complementary Therapies in Clinical Practice, Volume 20, Issue 4, November 2014. pp. 219-223.
7. John Verhagen. Massage therapy has short-term benefits for people with common musculoskeletal disorders compared to no treatment: a systematic review // Journal of Physiotherapy. 2015. No. 61. pp. 106-116.
8. Anatychuk L. I. Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters. Kyiv, Chernivtsi: Institute of thermoelectricity, 2003.
9. Belik V.D., Uryukov B.A., Frolov G.A. Tkachenko G.V. Chislenno-analiticheskiy metod resheniya nelineynogo nestatsionarnogo uravneniya teploprovodnosti // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. - 2008. - №6. [Belik V. D., uryukov B. A., Frolov G. A. Tkachenko G. V. Numerical-analytical method for solving nonlinear unsteady heat equation // Engineering physics journal. 2008. No. 6.
10. Bogolyubov V.M., Ulashchik V.S. Kombinirovaniye i sochetaniye lechebnykh fizicheskikh faktorov // Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya. - 2004. - № 5 –С.39-45. [Bogolyubov V. M., ulashchik V. S. Combination and combination of therapeutic physical factors // Physiotherapy, balneology and rehabilitation. 2004. No. 5 pp. 39-45. (In Russ)]
11. Yevdulov O.V., Kadirova D.K., Magomedova S.G., Ragimova T.A., Khazamova M.A. Model' Vestnika Dagestansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018; 45 (1). S. 60-72. [Evdulov O. V., Kadirova D. K., Magomedova S. G., Ragimova T. A., M. A. Hazamova/ Model of a thermoelectric device for thermal exposure on a human foot. // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2018; 45(1). pp. 60-72. (In Russ)]
12. Yevdulov O.V., Khazamova M.A. Matematicheskaya model' poluprovodnikovogo termoelektricheskogo ustroystva dlya teplovogo vozddeystviya na stopu cheloveka // Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye. - 2004. №7.

- S. 43-49. 20. Shi D. Chislennyye metody v zadachakh teploobmena. Per. s angl. M.: Mir. 1988. 544 s. [Evdulov O. V., Hazamova M. A. Mathematical model of a semiconductor thermoelectric device for thermal exposure on the foot of the person // Izvestiyavuzov. Instrument making. 2004. No. 7. pp 43-49. 20. Shi D. Numerical methods in heat transfer problems. Per. from English. M: World. 1988. 544 p. (In Russ)]
13. Yepifanov V. A. Vosstanovitel'naya meditsina [Tekst]: uchebnik / V. A. Yepifanov. - M.: GEOTAR-Media, 2012. - 304 s. [Epifanov V. A. Regenerative medicine [Text]: Textbook / V. A. Epifanov. Moscow: GEOTAR-Media, 2012. 304 p. (In Russ)]
14. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Khazamova M.A. Raschet temperaturnykh poley chelovecheskogo organizma pri lokal'nom teplovom vozdeystviy na baze poluprovodnikovyykh termo-kofeynykh preobrazovateley // Vestnik MAKH. - 2010. - № 1. [T. A. Ismailov, O. V. Evdulov, Hazamova M. A. Calculation of the temperature field of the area of the human body under local thermal stimulation device based on semiconductor thermoelectric converters // Journal of MACH. 2010. No. 1. (In Russ)]
15. Olefirenko V.T. Vodoteplolecheniye. M.: Meditsina, 1986. - 288s. [Olefirenko V. T. Vodoteplosnab. M.: Medicine, 1986. 288c. (In Russ)]
16. Patent №2245693 RF. Poluprovodnikovoye termoelektricheskoye ustroystvo dlya lokal'nogo temnogo i peraturnogo vozdeystviya na cheloveka / Ismailov T.A., Aminov G.I., Yevdulov O.V., Khazamova M.A.- № 2002125785; Opubl. 10.02.2005, Byul. № 4 - 3s. [Patent No. 2245693 of the Russian Federation. Thermoelectric semiconductor device for local temperature influence on the human foot / Ismailov T. A., Aminov G. I., Evdulov O. V., Hazamova M. A. No. 2002125785; Publ. 10.02.2005, Bull. No. 4 – 3. (In Russ)]
17. Patent №2245694 RF. Ismailov T.A., Aminov G.I., Zarat A., Yevdulov O.V., Khazamova M.A.- № 2002125786; Poluprovodnikovoye termoelektricheskoye ustroystvo dlya lokal'nogo temnogo i peraturnogo vozdeystviya na cheloveka. Opubl. 10.02.2005, Byul. № 4 - 3s. [Patent No. 2245694 of the Russian Federation. Thermoelectric semiconductor device for local temperature influence on the human foot / Ismailov T. A., Aminov G. I., Zarat A., Evdulov O. V., Hazamova M. A. No. 2002125786; Publ. 10.02.2005, Bull. No. 4 – 3. (In Russ)]
18. Patent №2299711 RF. Ismailov T.A., Aminov G.I., Yusufov S.H.A., Khazamova M.A.- № 2003113991; Termoelektricheskoye poluprovodnikovoye ustroystvo dlya lokal'nogo temnogo i peraturnogo vozdeystviya na refleksogennyye zony nog cheloveka. Opubl. 27.05.2007, Byul. № 15 - 4s. [Patent No. 2299711 of the Russian Federation. Thermoelectric semiconductor device for local temperature effects on the reflex zones of the feet / Ismailov T. A., Aminov G. I. Yusufov S. A., Hazamova M. A. No. 2003113991; Publ. 27.05.2007, Bull. No. 15 – 4. (In Russ)]
19. Fizicheskaya reabilitatsiya / pod obshch. red. prof. Popova S.M. 2 izd. - Rostov n / D: Feniks, 2004. - 608 s. [Physical rehabilitation / under the General editorship of Professor Popova, S. M. 2nd ed. Rostov n/ A: Phoenix, 2004. – 608 p.(In Russ)]
20. Shi D. Chislennyye metody v zadachakh teploobmena. Per. s angl. M.: Mir. 1988. 544 s. [Shi D. Numerical methods in heat transfer problems. Per. from English. M: World. 1988. 544 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Хазамова Мадина Абдулаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: kaftoe2016@yandex.ru

Магомедов Давуд Ахмеднабиевич, доктор технических наук, профессор кафедры биотехнические и медицинские аппараты и системы; e-mail: admi52@mail.ru

Кобзаренко Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор; e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Information about the authors:

Madina A. Khazamova, Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: kaftoe2016@yandex.ru

Davud A. Magomedov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems; e-mail: admi52@mail.ru

Dmitry N. Kobzarenko, Dr. Sci. (Technical), Prof.; e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 16.07.2019.

Принята в печать 10.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 16.07.2019.

Accepted for publication 10.09.2019.

Для цитирования: Юсуфов Ш.А., Базаев А.Р., Билалов Б.А. Исследование интенсификатора теплопередачи проточного типа в составе термоэлектрической системы опреснения морской воды. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(3): 53-65. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

For citation: Sh.A. Yusufov, A.R. Bazaev, B.A. Bilalov Study of A flowing-type heat transfer intensifier USED as part of A thermoelectric sea water desalination system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3): 53-65. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-53-65

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАТОРА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА В СОСТАВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

Юсуфов Ш.А.¹, Базаев А.Р.², Билалов Б.А.¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Институт проблем геотермии,

²367000, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 39А, Россия

Резюме. Цель Целью исследования является анализ теплофизических процессов в термоэлектрическом интенсификаторе теплопередачи, работающей в составе опреснительной системы на базе полупроводниковых термоэлектрических преобразователей. **Метод.** Предложена математическая модель для конструкции опреснителя, содержащего термоэлектрический теплообменник, в котором предусмотрено использование теплоперетоков естественной теплопроводностью за счет «тепловых мостиков». Предложенный метод использования дополнительных стоков теплоты на теплопоглощающей стороне устройства и дополнительных источников теплоты на тепловыделяющей стороне определяет необходимость в новой математической модели, отличающейся от известных математических моделей, описывающих теплопередачу в интенсификаторе теплопередачи проточного типа. **Результат.** Существенный вклад в температурное поле теплоносителей вносят члены, учитывающие теплопередачу через «тепловые мостики». Причем величина вклада тем больше, чем больше теплопроводность «тепловых мостиков» и разница температур между теплоносителями и поверхностью «тепловых мостиков». В соответствии со своим назначением ТЭИТ проточного типа для схемы использования в опреснителях должны обеспечивать эффективную передачу теплоты от потока охлаждаемого теплоносителя к потоку нагреваемого теплоносителя. Результаты показывают, что при заданной ограниченной длине теплообменника применение термоэлектробатареи совместно с «тепловыми мостиками» позволяет достичь равенства температур теплоносителей на выходе. **Вывод.** Для условия работы термобатареи в режиме интенсификатора длина не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Решение системы относительно длины, дает искомую длину термобатареи, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из режима функционирования ТЭИТ. Уменьшение длины теплообменника, при всех прочих равных условиях дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

Ключевые слова: интенсификатор теплопередачи, опреснение морской воды, термоэлектрический модуль, термоэлектрическая система, температура, математическая модель

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

STUDY OF A FLOWING-TYPE HEAT TRANSFER INTENSIFIER USED AS PART
OF A THERMOELECTRIC SEA WATER DESALINATION SYSTEM

Sh.A. Yusufov¹, A.R. Bazaev², **B.A. Bilalov¹**

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Institute of Geothermal Problems,

²39 A I. Shamilya Ave., Makhachkala 367000, Russia

Abstract Objectives To analyse the thermophysical processes in the thermoelectric heat transfer intensifier operating as part of a desalination system based on semiconductor thermoelectric converters. **Method** A mathematical model for the design of a desalter containing a thermoelectric heat exchanger, which provides for the use of heat flows by natural thermal conductivity due to so-called heat channels, is proposed. The proposed method of using additional heat sinks on the heat-absorbing side of the device and additional heat sources on the fuel side determines the need for a new mathematical model that differs from the known mathematical models describing heat transfer in the heat transfer flowing-type intensifier. **Results** The analysis of modelling results shows that a significant contribution to the temperature field of heat conductors is made when considering the heat transfer over the heat channels. The value of the contribution is the greater, the higher the thermal conductivity of the heat channels and the temperature difference between the heat conductors and the surface of the heat channels. In accordance with their purpose, flow-type thermoelectric heat transfer intensifiers (THTIs) for desalination applications must ensure efficient heat transfer from the cooled fluid flow to the heated fluid flow. The results show that, at a given limited length of the heat exchanger, the use of a thermoelectric battery together with heat channels allows equality of temperatures of heat conductors at the output to be achieved. **Conclusion** The modelling results show that, under the operating conditions of the thermal battery in intensifier mode, the length of the heat exchanger shall not exceed the value, at which the temperature of the heat conductor at the outlet becomes equal. The system solution provides the required length of the thermal battery, which allows equality of coolant temperatures to be achieved at the exit from the THTI operation mode. Following the logic of the desalter scheme under consideration, it is obvious that the reduction in the length of the heat exchanger, with all other things being equal, gives a reduction in the mass and size of the device as a whole.

Keywords: heat transfer intensifier, seawater desalination, thermoelectric module, thermoelectric system, temperature, mathematical model

Введение. Проведение исследований по разработке и усовершенствованию уже известных и поискам новых, перспективных методов опреснения соленых вод является актуальной задачей. В настоящее время в мировой практике накоплен значительный опыт по разработке и созданию опытных и промышленных образцов опреснительных установок, производящих пресную воду для бытового использования. Среди наиболее распространенных способов получения пресной воды можно отметить методы опреснения с изменением агрегатного состояния воды, эти методы достаточно просты и эффективны для бытового применения. Применение термоэлектрических преобразователей в составе тепловых насосов и интенсификаторов теплопередачи дает уникальную возможность создавать малогабаритные бытовые опреснители морской воды с функциональным блоком, служащим одновременно для охлаждения и нагрева или нагрева и конденсации, в зависимости от применяемого способа деминерализации воды [1-4].

Постановка задачи. На рис.1 показана схема опреснителя морской воды содержащего в своем составе термоэлектрические преобразователи и работающего по принципу выпаривания.

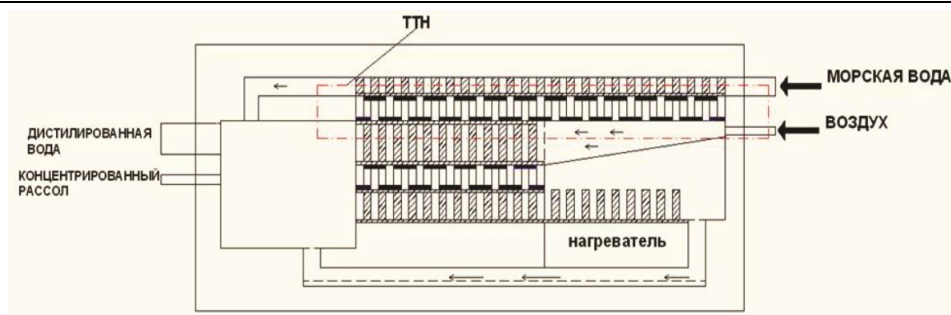


Рис. 1. Схема опреснителя морской воды
Figure 1. Scheme of desalination of sea water

Основными элементами опреснителя являются термоэлектрические модули, в данном конструктивном исполнении все модули соединены последовательно и через них проходит одинаковый ток, однако ввиду того что все батареи находятся в индивидуальных температурных режимах их энергетические характеристики также будут отличаться. Схематически данную конструктивную реализацию можно рассматривать как плоскую перегородку, составленную из идентичных по своим размерам и физическим свойствам термоэлементов, чередующихся с тепловыми мостиками (пластины из высокотеплопроводного материала, с идентичными термоэлектрическим модулям по геометрическим размерам), одна поверхность которой, обтекается паром в камере конденсации, а другая – жидкостью, отбирающей тепло от горячих спаев, и является теплообменником-рекуператором, работающим в режиме интенсификации теплопередачи, в котором на поверхности стенки, разделяющей потоки теплоносителей, происходит дополнительное выделение и поглощение тепла Пельтье, а в объеме стенки выделение джоулева тепла.

Применение полупроводниковых термоэлектрических преобразователей в дистилляционных опреснителях является наиболее надежным и энерговыгодным, ввиду особенностей своего функционирования [5-10]. Также следует учесть, что, если дистилляцию проводить при атмосферном давлении, воду надо нагревать до 100°C, а при более низком давлении температура кипения воды понижается, и, следовательно, дистилляция требует меньших тепловых затрат [11-13].

Методы исследования. В полупроводниковом термоэлектрическом преобразователе в режиме работы интенсификатора теплопередачи направления потока передаваемой модулем теплоты совпадает с направлением передачи теплоты естественной теплопроводностью при располагаемой разности температур потоков теплоносителей. Указанное определяет конструктивные особенности ТЭИТ проточного типа. В отличие от ТЭИТ контактного типа, рассмотренных в опубликованных работах, по ТЭИТ проточного типа данные в литературе рассмотрены недостаточно полно.

В конструкциях теплообменников с термоэлектрическими преобразователями необходимо обеспечение эффективной теплоизоляции в зазорах между ветвями термоэлементов и отдельными термоэлектробатареями с целью снижения необратимых тепловых потерь [14-17]. Однако для ряда технических решений, такие теплоперетоки, наоборот, играют положительную роль, что определяет их конструктивные особенности [18-20]. В [1] предложены конструкции термоэлектрических теплообменников, в которых предусмотрены «тепловые мостики» для обеспечения теплоперетоков естественной теплопроводностью. Наличие дополнительных стоков теплоты на теплопоглощающей стороне устройства и дополнительных источников теплоты – на тепловыделяющей стороне определяет необходимость в новых математических моделях, отличающихся от известных математических моделей, описывающих теплопередачу в интенсификаторе теплопередачи проточного типа.

Обсуждение результатов. Отличительной особенностью термоэлектрических устройств проточного типа является изменение температуры потоков теплоносителей вдоль спаев термо-

электробатарей, что определяет индивидуальные режимы работы термоэлементов на каждом элементарном участке длины батареи.

В работах [1-4] приведены математические модели для прямо- и противоточных термоэлектрических тепловых насосов с учетом изменения температур теплоносителей в виде системы дифференциальных уравнений, включающих уравнения холодо- и теплопроизводительности термобатареи, уравнения теплообмена на теплопоглощающих и тепловыделяющих спаеях и уравнения теплового баланса для потоков теплоносителей.

Система уравнений в этом случае в безразмерной форме имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\Theta_1}{dx} &= N(\Theta_1' - \Theta_1); \\ \frac{d\Theta_2}{dx} &= \frac{\eta}{m} N(\Theta_2' - \Theta_2); \\ \Theta_1 - \Theta_1' &= \beta(v \cdot \Theta_1' - \frac{v^2}{2} - \Delta\Theta'); \\ \Theta_2' - \Theta_2 &= m\beta(v \cdot \Theta_2' + \frac{v^2}{2} - \Delta\Theta');\end{aligned}\tag{1}$$

$$\text{где: } X=x/l; N = \frac{\alpha_1}{W} S; \eta = \frac{W_1}{W_2}; m = \frac{Bi_1}{Bi_2}; \beta = Bi_1^{-1}; ; S = lL; \Delta\Theta' = \Theta_2' - \Theta_1'.$$

$$Bi_{1,2} = \alpha_{1,2} d / \lambda$$

Θ_1, Θ_2 - температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей соответственно;
 x - координата на оси OX, направленной вдоль термобатареи;
 l - длина термобатареи вдоль потока теплоносителей;
 α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи на охлаждаемых и нагреваемых сторонах термобатареи соответственно;
 v - скорость течения жидкости;
 d - высота термоэлемента;
 λ - коэффициент теплопроводности термоэлемента;
 L - ширина термобатареи;
 W_1, W_2 - водяные эквиваленты охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Исключая из выше указанных уравнений значения температур спаев Θ_1' и Θ_2' , получается системы дифференциальных уравнений, определяющих изменение температуры теплоносителей вдоль координаты X.

Решение такой системы для прямоточных ТТН, когда на входе заданы граничные условия

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H;\tag{2}$$

имеет вид:

$$\Theta_1(x) = \frac{1}{\Psi} [\Theta_1^* (\Psi ch \Psi x - v sh \Psi x) + \Theta_2^* b \eta sh \Psi x] e^{Ux} - 1 + \frac{v}{2};\tag{3}$$

$$\Theta_2(x) = \frac{1}{\Psi} [\Theta_2^* (\Psi ch \Psi x + v sh \Psi x) + \Theta_1^* b \eta sh \Psi x] e^{Ux} - 1 - \frac{v}{2}.\tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}\Theta_1^* &= \Theta_1^H + 1 - \frac{\nu}{2}; & \Theta_2^* &= \Theta_2^H + 1 + \frac{\nu}{2}; \\ H_1 &= 1 + \nu - \nu^2 m \beta, & H_2 &= 1 - \nu - \nu^2 \beta; \\ U &= \frac{b}{2}(H_1 + \eta H_2); & \nu &= \frac{b}{2}(H_1 - \eta H_2); \\ \Psi &= \sqrt{\nu^2 + \eta b^2}; & \text{где } b &= \frac{KS}{W_1}.\end{aligned}$$

А решение для случая противотока при граничных условиях

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (5)$$

имеет вид:

$$\Theta_1(x) = \frac{\Theta_2^*[Ush\varphi(1-x) + \varphi ch\varphi(1-x)] + \Theta_2^*be^{\varphi}sh\varphi x}{(Ush\varphi + \varphi ch\varphi)e^{\varphi x}} - (1 - \frac{\nu}{2}); \quad (6)$$

$$\Theta_2(x) = \frac{\Theta_2^*(Ush\varphi x)e^{\varphi} + \Theta_1^*b\eta sh\varphi(1-x)}{(Ush\varphi + \varphi ch\varphi)e^{\varphi x}} - (1 + \frac{\nu}{2}). \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi = \sqrt{U^2 - \eta b^2}; \varphi^2 > 0$$

В вышеприведенной модели не учитываются теплоперетоки через зазоры между полупроводниковыми ветвями, а в случае использования стандартных термоэлектрических батарей, между батареями. В тоже время, для работы термоэлектрического преобразователя в режиме интенсификации возможно усиление вклада в теплопереток через тепловые мостики. В этом случае на элементарном участке dx длины батареи обеспечивается теплопередача, как через термоэлементы, так и через «тепловые мостики» с интенсивностью теплообмена, определяемой числами Био соответственно для полупроводника – $Bi_{1;2}$; для «теплового мостика» – $Bi'_{1;2}$. (рис. 2). Коэффициент заполнения ξ , который в данном случае характеризуется отношением площади полупроводника на элементарном участке к площади элементарного участка. Тогда на элементарном участке длины dx площадь спаев термоэлементов занимает поверхность ξLdx , а площадь поверхности «теплового мостика» – $(1-\xi)Ldx$, где L – ширина термобатареи.

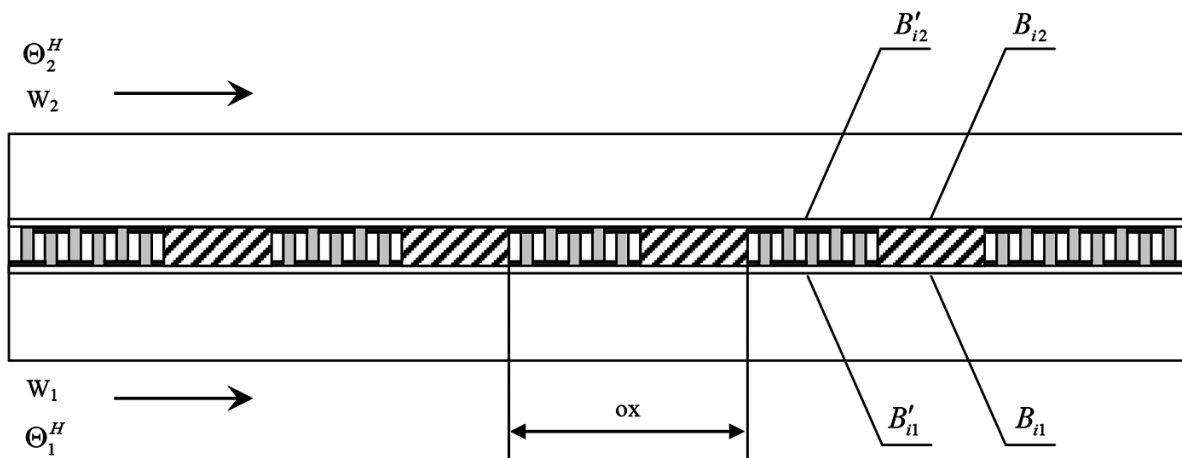


Рис.2. Усиление вклада в теплопереток через тепловые мостики
 Fig. 2. Strengthening the contribution to heat transfer through

Коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и толщину, соответственно, для полупроводника и «теплового мостика» обозначим через $\alpha_{1;2}$, $\alpha'_{1;2}$, $\lambda_{1;2}$, $\lambda'_{1;2}$, d , d' .

Примем, что температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей на входе в термобатарею соотносятся, как $T_1 > T_2$. остальные допущения соответствуют общепринятым для проточных ТТН: потоки абсолютно перемешиваются в направлении, перпендикулярном направлению движения; свойства теплоносителей и материалов не зависят от температуры; теплопередача через неучтенные элементы конструкции отсутствует.

При таком рассмотрении уравнения теплового баланса по потокам теплоносителей будут иметь вид:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 \xi L (T_{1П} - T_1) + \alpha'_1 (1 - \xi) L (T_{1М} - T_1), \quad (8)$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 \xi L (T_{2П} - T_2) + \alpha'_2 (1 - \xi) L (T_{2М} - T_2), \quad (9)$$

где $T_{1П;2П}$ – температуры спаев термоэлементов,

$T_{1М;2М}$ – температуры поверхностей тепловых мостиков,

$T_{1;2}$ – температуры охлаждаемых и нагреваемых теплоносителей.

Уравнения теплового баланса на поверхностях, омываемых потоками теплоносителей, имеют вид для спаев термоэлементов:

$$\alpha_1 (T_1 - T_{1П}) = \bar{e} j T_{1П} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2П} - T_{1П}), \quad (10)$$

$$\alpha_2 (T_{2П} - T_2) = \bar{e} j T_{2П} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2П} - T_{1П}), \quad (11)$$

где $\bar{e}$ – коэффициент термо-ЭДС,

j – плотность электрического сопротивления «термоэлемента» для «тепловых мостиков»:

$$\alpha'_1 (T_1 - T_{1М}) = K' (T_1 - T_2), \quad (12)$$

$$\alpha'_2 (T_{2М} - T_2) = K' (T_1 - T_2), \quad (13)$$

где $K' = \left(\frac{1}{\alpha'_1} + \frac{1}{\alpha'_2} + \frac{d'}{\lambda'} \right)^{-1}$ – коэффициент теплопередачи через тепловой мостик.

Исключая температуры поверхностей $T_{1П;2П}$ и $T_{1М;2М}$ и приводя выражения к безразмерному виду по аналогии с [20-23], получим выражения для изменения температур потоков теплоносителей вдоль теплообменной поверхности ТЭИТ проточного типа.

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta_1}{dx} = & b \xi \left\{ [m \beta \nu^2 - (1 + \nu)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{\nu^2}{2} [1 + (2 - \nu) m \beta] \right\} + \\ & + b' (1 - \xi) (\Theta_2 - \Theta_1), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta_2}{dx} = & \eta b \xi \left\{ [\beta \nu^2 - (1 - \nu)] \Theta_1 + \Theta_2 + \frac{\nu^2}{2} [1 + (2 + \nu) \beta] \right\} + \\ & + \eta b' (1 - \xi) (\Theta_1 - \Theta_2), \end{aligned} \quad (15)$$

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

где

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

Эти уравнения отличаются от приведенных в с [2-3] членами с b' .

Граничные условия запишем в виде –для прямотока

$$\Theta_1|_{x=0} = \Theta_1^H; \quad \Theta_2|_{x=0} = \Theta_2^H. \quad (16)$$

Решая полученную систему дифференциальных уравнений с граничными условиями, получим следующие выражения для определения температур теплоносителей вдоль термобатареи для прямотока [191]:

$$\begin{aligned} \Theta_1 = C_1(\Psi_1 - b_2) \frac{e^{\Psi_1 X}}{b_1} + C_2(\Psi_2 - b_2) - \\ - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} (\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1} (\Psi_2 - b_2), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Theta_1 = C_1 e^{\Psi_1 X} + C_2 e^{\Psi_2 X} - \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad C_1 &= [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_2 - b_2) V - b_1 \delta] / (\Psi_1 - \Psi_2); \\ C_2 &= [\Theta_1^H b_1 - (\Psi_1 - b_2) \Theta_2^H + (\Psi_1 - b_2) V - b_1 \delta] / (\Psi_2 - \Psi_1); \\ P_1 &= (a_3 b_1 - b_3 \Psi_2 + b_3 b_2) / (\Psi_1 - \Psi_2); \\ P_2 &= (a_3 b_1 - b_3 \Psi_1 + b_3 b_2) / (\Psi_2 - \Psi_1); \\ \delta &= \frac{P_1}{\Psi_1 b_1} (\Psi_1 - b_2) - \frac{P_2}{\Psi_2 b_1} (\Psi_2 - b_2); \quad V = -\frac{P_1}{\Psi_1} - \frac{P_2}{\Psi_2}; \\ \Psi_{1;2} &= \frac{b_2 + a_1 \pm \sqrt{(b_2 - a_1)^2 + 4a_2 b_1}}{2}; \\ a_1 &= b\xi [\nu^2 m\beta - (1 + \nu)] - b'(1 - \xi); \quad a_2 = b\xi + b'(1 - \xi); \\ a_3 &= b\xi \frac{\nu^2}{2} [1 + (2 - \nu)m\beta]; \quad b_1 = \eta b\xi + \eta b'(1 - \xi) \\ b_2 &= \eta b\xi [\nu^2 \beta - (1 - \nu)] - b'\eta(1 - \xi); \quad b_3 = \eta b\xi \frac{\nu^2}{2} [1 + (2 + \nu)\beta]. \end{aligned}$$

Как видно из выражений (8) – (18), существенный вклад в температурное поле теплоносителей вносят члены, учитывающие теплопередачу через «тепловые мостики». Причем величина вклада тем больше, чем больше теплопроводность «тепловых мостиков» и разница температур между теплоносителями и поверхностью «тепловых мостиков».

В соответствии со своим назначением ТЭИТ проточного типа для нашей схемы должны обеспечивать эффективную передачу теплоты от потока охлаждаемого теплоносителя к потоку нагреваемого теплоносителя. При этом применение термоэлектробатареи позволяет при ограниченной длине теплообменника достичь равенства температур теплоносителей на выходе. Чтобы термобатарея работала, как интенсификатор, длина уу не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Таким обра-

зом, одним из характерных режимов работы ТЭИТ проточного типа является режим обеспечения равных температур потоков на выходе, т.е. условие $\Theta_1(l) = \Theta_2(l)$, где l – длина термобатареи. Это означает, что нужно подобрать такое значение l , при котором для случая прямотока соблюдается следующее равенство:

$$\begin{aligned} \Theta_1^H - \frac{C_1}{b_1}(\Psi_1 - b_2)(1 - e^{\Psi_1}) + \frac{C_2}{b_1}(\Psi_2 - b_2)(1 - e^{\Psi_2}) = \\ = \Theta_2^H + C_1(e^{\Psi_1} - 1) + C_2(e^{\Psi_2} - 1); \end{aligned} \quad (19)$$

Решение этого уравнения относительно длины l , дает искомую длину термобатареи, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из данного режима функционирования ТЭИТ. Исходя из логики работы опреснителя, приведенного на рис. 1 очевидно, что снижение данного параметра, при всех прочих равных дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

На рис. 3 представлены графики изменения температур на выходе из теплообменника в зависимости от его длины, по лученные по результатам численного расчета. Анализ полученных зависимостей показывает, что более глубокого охлаждения при равных токах питания термобатарей, конструкция должна предполагать использование более длинных термобатарей с низким коэффициентом заполнения.

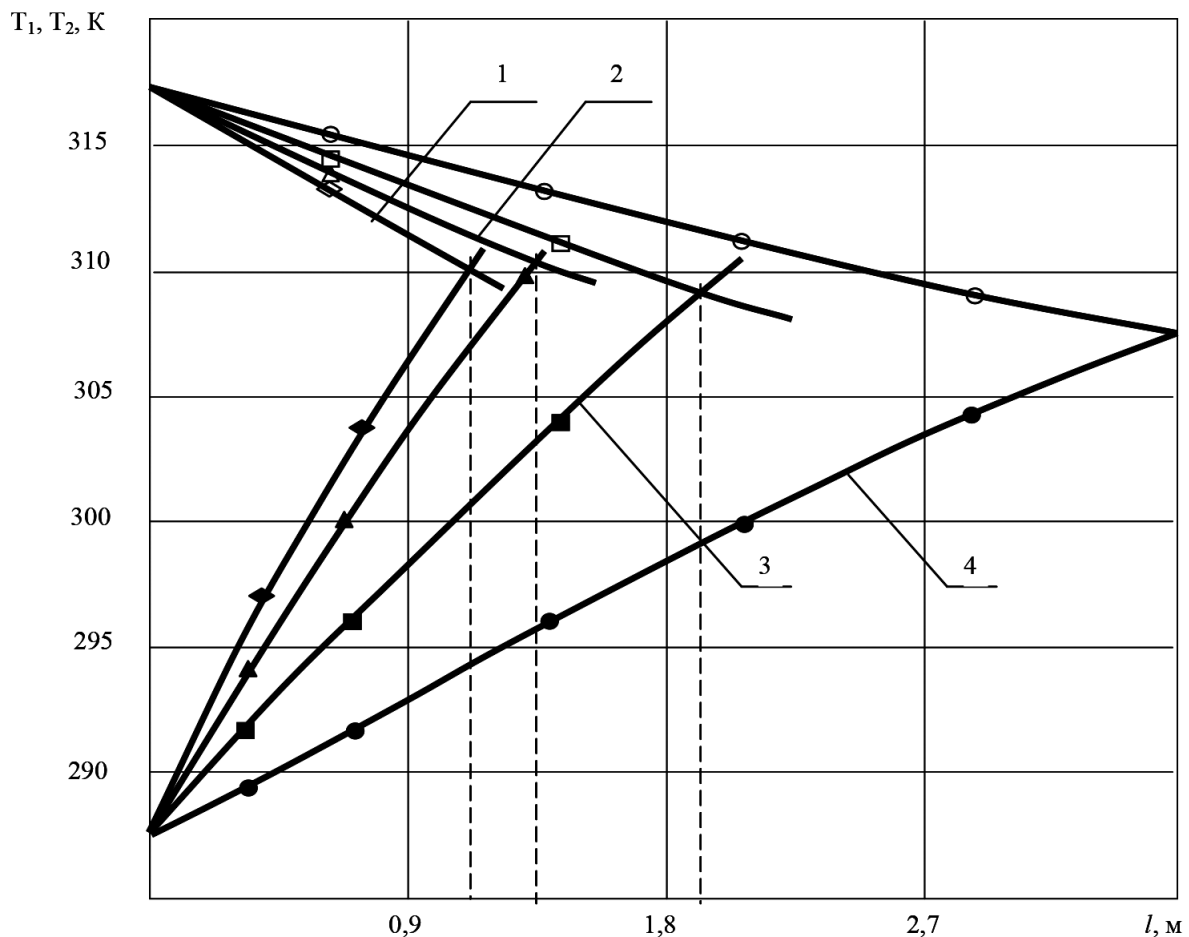


Рис. 3 Изменения температур жидкостей на выходе из теплообменника в зависимости от длины при различных коэффициентах заполнения (1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 0,8$; 3 – $\xi = 0,5$; 4 – $\xi = 0,2$; $I = 10$ А)
Fig. 3 Changes in the temperatures of liquids at the outlet of the heat exchanger as a function of length for different filling factors (1 - $\xi = 1$; 2 - $\xi = 0.8$; 3 - $\xi = 0.5$; 4 - $\xi = 0.2$; $I = 10$ BUT)

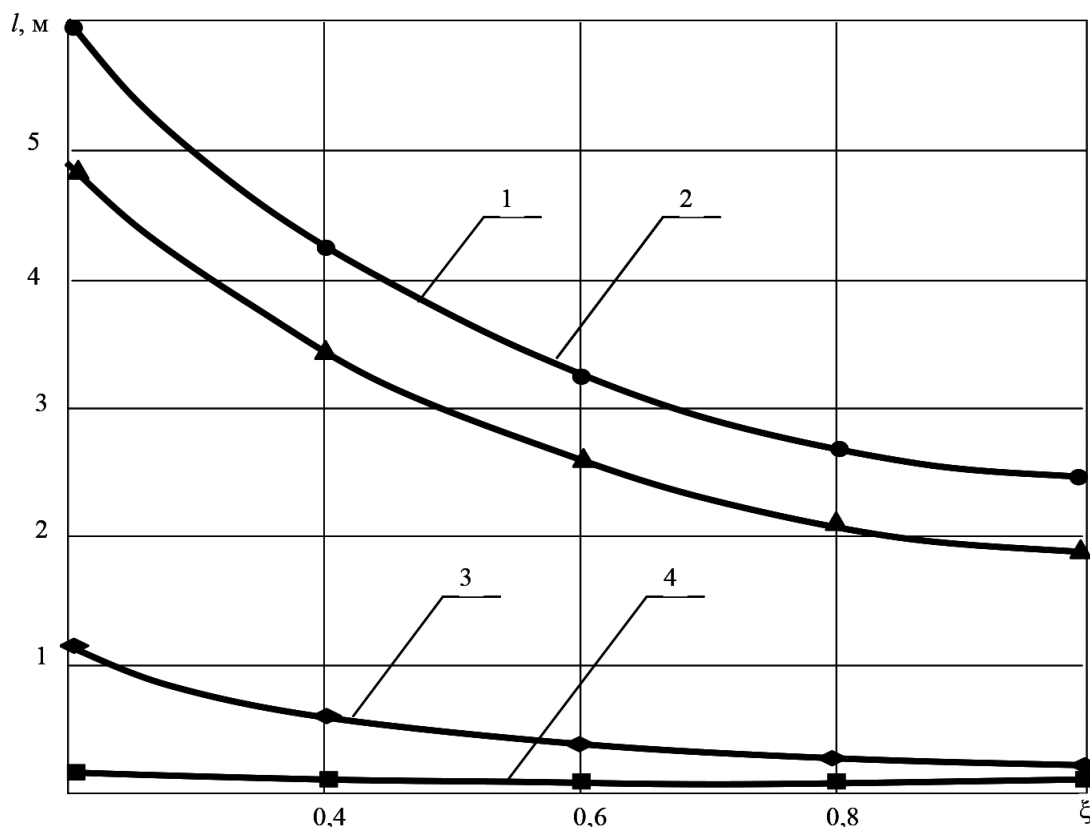


Рис. 4. Зависимости предельных длин термопар в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных температурах (1 - $T^H = 327K$; 2 - $T^H = 318K$; 3 - $T^H = 297K$; 4 - $T^H = 293K$; $T^H_2 = 287K$; $I = 5A$)
 Fig. 4. Dependences of the limiting lengths of thermopiles in the intensification mode on the fill factor at various temperatures (1 - $T^H = 327K$; 2 - $T^H = 318K$; 3 - $T^H = 297K$; 4 - $T^H = 293K$; $T^H_2 = 287K$; $I = 5A$)

На рис. 4 представлены графики зависимости от коэффициента заполнения предельных длин термопар, т.е. тех длин, при которых температуры жидкостей на выходе из теплообменника равны между собой.

Как следует из графиков, чем больше разница температур теплоносителей на входе в теплообменник, тем больше длина термопар, необходимая для удержания режима интенсификации.

Чем больше разница температур теплоносителей на входе, тем резче убывают функции $l=l(\xi)$ при постоянном токе питания $I=5A$.

На рис. 5 приведены графики зависимости предельных длин термопар в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания и постоянной разности температур теплоносителей на входе в теплообменник.

Функции $l=l(\xi)$ носят монотонно убывающий характер. При этом, чем больше значение тока питания, тем меньше длина термопар для удержания режима интенсификации.

В тоже время необходимо отметить, что коэффициент заполнения существенно влияет на область изменения тока для режима интенсификации.

Большее значение коэффициента заполнения ведет уменьшению области изменения тока для режима интенсификации. Более глубокого охлаждения можно добиться в режиме интенсификации меньшими токами, но при больших значениях коэффициента заполнения ξ .

Но при меньших значениях ξ такого охлаждения может вовсе и не быть, так как сильное увеличение тока приводит к дальнейшему нагреванию охлаждаемого теплоносителя. Что касается нагреваемого теплоносителя, то при одном и том же значении тока более высокий нагрев происходит при малых значениях коэффициента ξ .

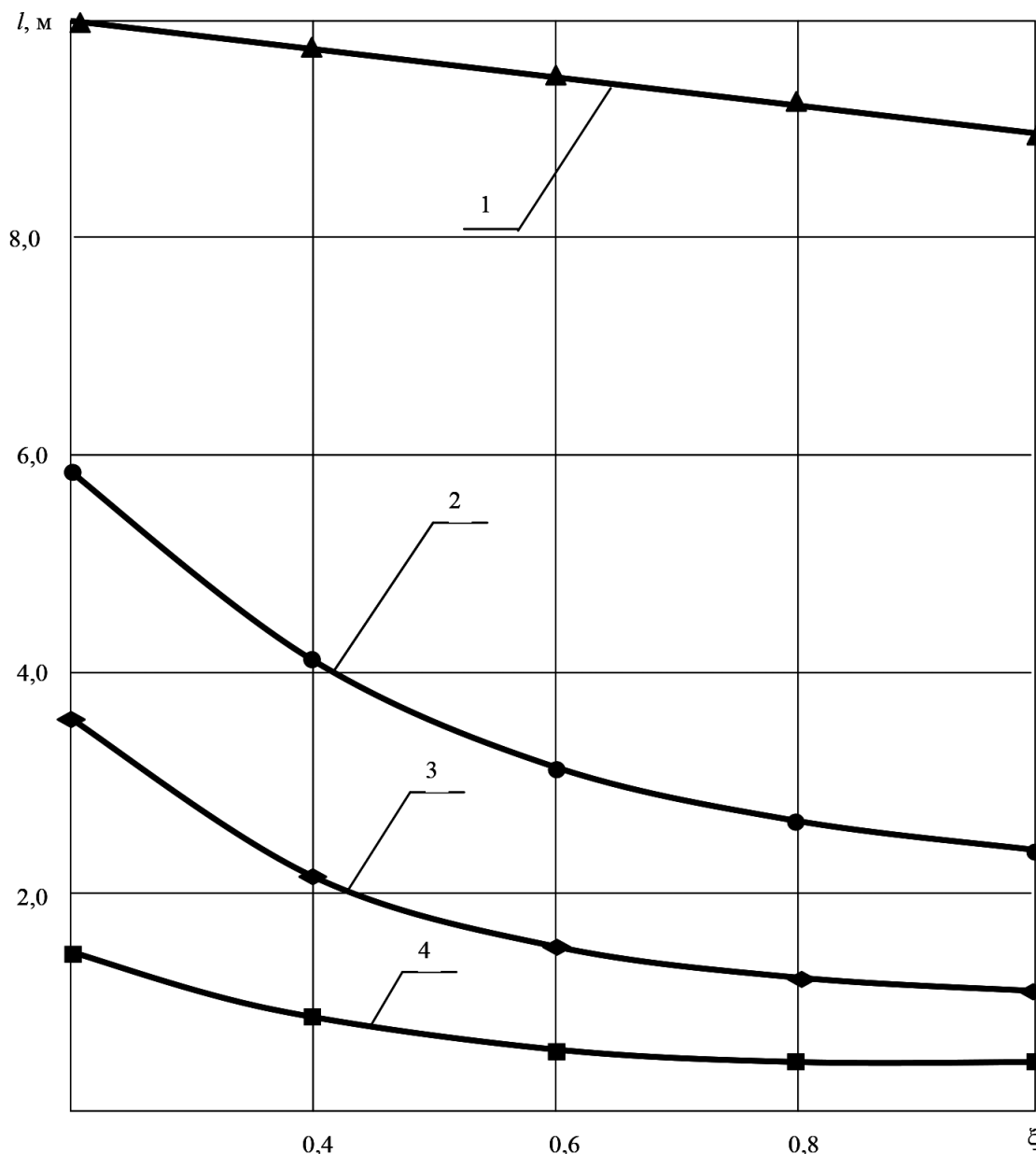


Рис. 5. Зависимости предельных длин термопар в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных токах питания (1 – $I = 1\text{A}$; 2 – $I = 5\text{A}$; 3 – $I = 10\text{A}$; 4 – $I = 20\text{A}$; $T_{H1} = 318\text{K}$; $T_{H2} = 287\text{K}$;) Fig. 5. Dependences of the limiting lengths of thermopiles in the intensification mode on the duty cycle at various supply currents (1 - $I = 1\text{A}$; 2 - $I = 5\text{A}$; 3 - $I = 10\text{A}$; 4 - $I = 20\text{A}$; $T_{H1} = 318\text{K}$; $T_{H2} = 287\text{K}$;)

Вывод. Для условия работы термопары в режиме интенсификатора длина не должна превышать той величины, при которой температуры теплоносителей на выходе становятся равными. Решение системы относительно длины, дает искомую длину термопары, при которой достигается равенство температур теплоносителей на выходе из режима функционирования ТЭИТ. Уменьшение длины теплообменника, при всех прочих равных условиях дает снижение массогабаритных показателей устройства в целом.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника. - 2005. - 534 с.
2. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. - 2009. - №7. - С. 34-37.
3. Дрейцер Г. А., Лобанов И.Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной

- турбулизации потока //ИФЖ. 2003. Т.76, №1. 46—51 с.;
4. Кадилова Д. К. Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи проточного типа // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2017. №2.
 5. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубах с периодическими выступами // Проблемы гидродинамики и теплообмена в энергетических установках. М.: Изд. МЭИ. 2003. Т.1. 57—60 с.;
 6. Осипов М. И., Олесевиц Р. К., Олесевиц К. А. Экспериментальное и численное исследование теплообменных аппаратов шнекового типа //Труды Второй Российской национальной конференции по тепломасообмену. М.: МЭИ. 2002. Т.6. 159—162 с.;
 7. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Под общ. Ред. Ю.Ф. Гортышова / Казань.2012. Изд. дом «Логос» -559с
 8. Гортышов Ю. Ф., Олимпиев В. В., Попов И. А. Эффективность промышленно эффективных интенсификаторов теплопередачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН, Энергетика. 2002. № 3. 102—118 с.;
 9. Shah, R.K. Compact Heat Exchangers - Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap.13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
 10. Zimparov V. D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures //Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. v.43. No 17. P.3137—3150;
 11. Dreitzer G. A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications) //Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London. Kruger Academic Publications. 2003. P.201—220;
 12. Muhammad Sajid, Ibrahim Hassan, Aziz Rahman. 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, Pages 1035-1043
 13. Kazuaki Yazawa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricks. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes// Birck Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA/ NASA - Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. Volume 185, 15 December 2016, Pages 598-602
 14. Ahmed El-Desouky, Michael Carter, Matthieu A. Andre, Philippe M. Bardet, Saniya LeBlanc. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices//Department of Mechanical & Aerospace Engineering, The George Washington University, USA. Progress in Materials Science. Volume 83, October 2016, Pages 330-382
 15. Chhatrasal Gaynera, Kamal K. Kara. Recent advances in thermoelectric materials// Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Materials Science Programme, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India/ Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India. Applied Energy. Volume 168, 15 April 2016, Pages 65-74
 16. T. Zhang. New thinking on modeling of thermoelectric devices//Institute of Northern Engineering, College of Engineering and Mines, University of Alaska Fairbanks, 306 Tanana Drive, Duckering Building, Fairbanks, AK 99775, USA/ Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 38, October 2014, Pages 903-916
 17. Elena Otilia Vijogheb, Diana Enescua, Elena Otilia Vijogheb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance// Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Targoviste, Unirii Avenue 18-20, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania/ Department of Automatics, Informatics and Electrical Engineering, Valahia University of Targoviste, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania. Applied Thermal Engineering. Volume 66, Issues 1-2, May 2014, Pages 15-24
 18. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications// University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering, 1000 E. University Avenue, Dept. 3295, Laramie, WY 82071, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 23, Issue 8, June 2003, Pages 913-935
 19. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications// Institute of Building Technology, School of the Built Environment, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK. Applied Thermal Engineering. Volume 64, Issues 1-2, March 2014, Pages 252-262
 20. J. Steven Browna, Piotr A. Domanskib. Review of alternative cooling technologies// Department of Mechanical Engineering, Catholic University of America, 620 Michigan Avenue, NE, Washington, DC 20064, USA/ National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 63, Issue 1, 5 February 2014, pp. 33-39
 21. Fabio A.S. Mota, Mauro A.S.S. Ravagnani, E.P. Carvalho. Optimal design of plate heat exchangers// Chemical Engineering Graduate Studies Program, State University of Maringa, Av. Colombo, 5790 Maringa, PR, Brazil.
 22. Mazen M. Abu-Hader. Plate Heat Exchangers: Recent Achievements // Faculty of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Technology, Ltd.-Balka Applied University Address: P. O. Box: 9515 Al-weibedah, 11191, Amman, Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 9, December 2011, Pages 4855-4875

23. Павлова, И. Б. Методы термодинамического анализа эффективности теплоэнергетических установок / И. Б. Павлова. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 112 с.

References:

1. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivifikatory teploperedachi. - SPb.: Politehnika. - 2005. - 534 s. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - SPb.: Polytechnic. - 2005. - 534 p. (In Russ)]
2. Bulat L.P. Prikladnyye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii // Kholodil'naya tekhnika. - 2009. - №7. - S. 34-37. [Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration equipment. p2009. pNo. 7. pp. 34-37. (In Russ)]
3. Dreytser G. A., Lobanov I.Ye. Predel'naya intensivifikatsiya teploobmena v trubakh za schet iskusstvennoy turbulizatsii potoka // IFZH. 2003. T.76, №1. 46—51 s. [Dreitser G. A., Lobanov I.E. Extreme intensification of heat transfer in pipes due to artificial flow turbulization // IFZh. 2003. Vol. 76, No. 1. pp. 46-51 (In Russ)]
4. Kadirova D. K. Termoelektricheskiy intensivifikator teploobmena v trubakh s periodi-cheskimi vystupami // Problemy gidrodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh. M.: Izd. MEI. 2003. T.1. 57—60 s. [Kadirova D. K. Thermoelectric intensifier of heat transfer of flow type // Bulletin of DGTU. Technical science. 2017. No2. (In Russ)]
5. Dreytser G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in pipes with periodic protrusions // Problems of hydrodynamics and heat teploperedachi protochnogo tipa // Vestnik DGTU. Tekhnicheskiye nauki. 2017. №2. [Dreytser G. A., Isayev S. A., Lobanov I. Ye. Raschet konvektivnogo transfer in power plants. M.: Publishing. MPEI. 2003.V.1. pp. 57-60 (In Russ)]
6. Osipov M. I., Oleseovich R. K., Oleseovich K. A. Eksperimental'noye i chislennoye issledovaniye teplo-obmennyykh apparatov shnekovogo tipa //Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teplomassoobmenu. M.: MEI. 2002. T.6. 159—162 s.; [Osipov M. I., Oleseovich R. K., Oleseovich K. A. Experimental and numerical study of screw-type heat exchangers // Transactions of the Second Russian National Conference on Heat and Mass Transfer. M.: MPEI. 2002.V.6. pp. 159-162 (In Russ)]
7. Popov I.A., Makhyanov KH.M., Gureyev V.M. Fizicheskiye osnovy i promyshlennoye primeneniye intensivifikatsii teploobmena. Pod obshch. Red. YU.F. Gortyshova / Kazan'.2012. Izd. dom «Logos» -559s [Popov I.A., Makhyanov H.M., Gureev V.M. Physical foundations and industrial application of heat transfer intensification. Under the total. Ed. Yu.F. Gortyshova / Kazan. 2012. Ed. Logos house -559p. (In Russ)]
8. Gortyshov YU. F., Olimpiyev V. V., Popov I. A. Effektivnost' promyshlenno effektivnykh in-tensifikatorov teploperedachi (Obzor. Analiz. Rekomendatsii) // Izvestiya RAN, Energetika. 2002. № 3. 102—118 s.; [Gortyshov Yu. F., Olimpiev VV, Popov I. A. Efficiency of industrially effective heat transfer intensifiers (Review. Analysis. Recommendations) // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Energy. 2002. No. 3. pp.102-118 p (In Russ)]
9. Shah, R.K. Compact Heat Exchangers - Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap. 13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
10. Zimparov V. D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. v. 43. No.17. pp.3137-3150;
11. Dreytser G. A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications) // Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London. Kruger Academic Publications. 2003. pp.201-220;
12. Muhammad Sajid, Ibrahim Hassan, Aziz Rahman. 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. En-ergy. Volume 118, 1 /January 2017, pp. 1035-1043
13. Kazuaki Yazawaa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricksb. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes // Birk Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA / NASA - Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. Volume 185, December 15, 2016, pp. 598-602
14. Ahmed El-Desouky, Michael Carter, Matthieu A. Andre, Philippe M. Bardet, Saniya LeBlanc. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices // Department of Mechanical & Aerospace Engineering, The George Washington University, USA. Progress in Materials Science. Volume 83, October 2016, pp. 330-382
15. Chhatrasal Gaynera, Kamal K. Kara. Recent advances in thermoelectric materials // Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Materials Science Program, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India / Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India. Applied Energy. Volume 168, April 15, 2016, pp. 65-74
16. T. Zhang. New thinking on modeling of thermoelectric devices // Institute of Northern Engineering, College of Engineering and Mines, University of Alaska Fairbanks, 306 Tanana Drive, Duckering Building, Fairbanks, AK 99775, USA / Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 38, October 2014, pp. 903-916

17. Elena Otilia Vijogheeb, Diana Enescua, Elena Otilia Vijogheeb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance // Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Targoviste, Unirii Avenue 18-20, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania / Department of Automatics, Informatics and Electrical Engineering, Valahia University of Targoviste, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania. Applied Thermal Engineering. Volume 66, Issues 1-2, May 2014, pp. 15-24
18. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications // University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering, 1000 E. University Avenue, Dept. 3295, Laramie, WY 82071, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 23, Issue 8, June 2003, pp. 913-935
19. S. B. Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications // Institute of Building Technology, School of the Built Environment, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK. Applied Thermal Engineering. Volume 64, Issues 1-2, March 2014, pp. 252-262.
20. J. Steven Brown, Piotr A. Domanskib. Review of alternative cooling technologies // Department of Mechanical Engineering, Catholic University of America, 620 Michigan Avenue, NE, Washington, DC 20064, USA/ National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 63, Issue 1, 5 February 2014, pp. 33-39.
21. Fabio A.S. Mota, Mauro A.S.S. Ravagnani, E.P. Carvalho. Optimal design of plate heat exchangers // Chemical Engineering Graduate Studies Program, State University of Maringa, Av. Colombo, 5790 Maringa, PR, Brazil.
22. Mazen M. Abu-Hader. Plate Heat Exchangers: Recent Achievements // Faculty of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Technology, Ltd.-Balka Applied University Address: P. O. Box: 9515 Al-weibedah, 11191, Amman, Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 9, December 2011, pp. 4855-4875.
23. Pavlova I. B. Metody termodinamicheskogo analiza effektivnosti teploenergeticheskikh ustanovok / I. B. Pavlova. — M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2011. 112 s. [Pavlova, I. B. Methods of thermodynamic analysis of the efficiency of heat power plants / I. B. Pavlova. M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2011. 112 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

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

Базаев Ахмед Рамазанович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, лаборатория теплофизики геотермальных систем; e-mail: ran_ipg@mail.ru.

Билалов Билал Аругович, доктор технических наук, профессор.

Information about authors:

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

Akhmed R. Bazaev, Dr. Sci. (Technical), Chief Researcher, Laboratory of Thermophysics of Geothermal Systems; e-mail: ran_ipg@mail.ru.

Bilal A.Bilalov, Dr. Sci. (Technical), Prof.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.05.2019.

Принята в печать 22.08.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.05.2019.

Accepted for publication 22.08.2019.

Для цитирования: Асланов Г.К., Казибекров Р.Б., Мирзабеков Т.М., Мусаилов Р.Р. Программные методы повышения надежности аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(3): 66-78. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-66-78

For citation: G.K. Aslanov, R.B. Kazibekov, T.M. Mirzabekov, R.R. Musaibov. Software methods for Increasing the Reliability of Aerodrome quasi-doppler Automatic radio direction finders. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 66-78. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-66-78

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-66-78

ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АЭРОДРОМНЫХ КВАЗИДОПЛЕРОВСКИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ

Асланов Г.К., Казибекров Р.Б., Мирзабеков Т.М., Мусаилов Р.Р.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка программных методов повышения надежности работы аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов (АРП). **Метод.** Приведены математические модели и алгоритмы программного восстановления неисправности аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов. Предложено изменить структуру аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов. **Результат.** Предложены методы и алгоритмы для программного повышения надежности работы аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов. Приведена новая организация структуры аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов. Для обеспечения работоспособности АРП при выходе из строя вибраторов антенной системы предложены новые программные методы: с использованием фазовых соотношений с любых двух пар ортогонально расположенных вибраторов кольцевой антенной решетки; с использованием метода комбинаторики; Предложенная схема организации работы АРП позволяет повысить среднюю наработку на отказ одного канала пеленгования в 4,4 раза. **Вывод.** Разработанные методы обеспечения работоспособности АРП при выходе из строя вибраторов антенной системы позволяют одновременно вычислить пеленг и угол места на источник радиоизлучения. Использование предложенного метода позволяет без аппаратных затрат повысить надежность работы аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов и обеспечивает адекватность измеренных значений инструментальной погрешности аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторов реальным.

Ключевые слова: автоматический радиопеленгатор, математическая модель, алгоритм, надежность, антенная система, инструментальная погрешность, скользящее резервирование

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

SOFTWARE METHODS FOR INCREASING THE RELIABILITY OF AERODROME QUASI-DOPPLER AUTOMATIC RADIO DIRECTION FINDERS

G.K. Aslanov, R.B. Kazibekov, T.M. Mirzabekov, R.R. Musaibov

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives To develop software methods that can improve the reliability of airfield quasi-Doppler automatic direction finders (ADF). **Method.** Mathematical models and algorithms of software fault recovery of aerodrome quasi-Doppler automatic radio direction finders were developed. It is proposed to change the structure of aerodrome quasi-Doppler automatic radio direction finders. **Results.** Methods and algorithms for software improvement of the reliability of airfield quasi-Doppler automatic direction finders are proposed. A novel structural organisation of airfield quasi-Doppler automatic radio direction finders is given. New software methods are proposed for ensuring ADF operability in the event of a failure of the antenna system vibrators, both with the use of phase relations from any two pairs of orthogonally arranged ring antenna vibrators and with the use of the combinatorial method. The proposed organisational ADF scheme allows the average operating time per failure of one direction-finding channel to be increased by 4.4 times. **Conclusion.** The developed methods for ensuring ADF operability in the event of a failure of antenna system vibrators enable a simultaneous calculation of the azimuth and angle of position on the radio emission source. The use of the proposed method increases the potential reliability of airfield quasi-Doppler automatic direction finders without any hardware costs, as well as ensuring the adequacy of the calculated instrumental error values of airfield quasi-Doppler automatic direction finders relative to the real ones.

Keywords: automatic direction finder, mathematical model, algorithm, reliability, antenna system, instrumental error, sliding redundancy

Введение. Радиопеленгаторы находят широкое применение при поиске терпящих бедствие судов и людей, радионавигации, радиоконтроле, радиоразведке [1, 11].

Современный этап развития авиационной техники характеризуется увеличением интенсивности и скорости полетов, ужесточением требований к безопасности полетов, что требует повышения надежности функционирования навигационного оборудования.

Кроме того, повышения надежности АРП продиктовано необходимостью обеспечения превосходства технических характеристик отечественных АРП над зарубежными.

Постановка задачи. В соответствии с нормами годности к эксплуатации аэродромного радиотехнического оборудования автоматические радиопеленгаторы должны обладать высокой надежностью и обеспечивать непрерывную круглосуточную работу одного канала пеленгования в течение 2000 часов [1, 2].

Для обработки информации в составе АРП применяются микропроцессорные устройства. Это позволяет применять новые методы повышения надежности, в частности, устранить неисправности программными методами.

Из-за высоких требований по обеспечению надежности функционирования АРП на аэропортах устанавливались 2 комплекта АРП (один в холодном резерве).

Антенная система АРП является самым низко надежным устройством, что объясняется тем, она работает под открытым небом, под воздействием гидрометеорологических факторов.

Выход из строя любого элемента антенной решетки приводит к аварии АРП. Это связано с тем, что, в этом случае, расстояние между вибраторами становится больше длины волны пеленгуемого сигнала (т.е. фазовое расстояние увеличивается более чем на 2π), что приводит к появлению неоднозначности фазовых измерений.

В эксплуатируемых АРП, расстояние между вибраторами антенной системы АРП выбирают так, чтобы разность фаз сигналов между этими элементами не превышала 360^0 . В связи с этим, для 16 вибраторной антенной системы АРП, расстояние между вибраторами выбрана равной 0,63м, в то время, когда минимальная длина волны пеленгуемого сигнала равна 0,75м, что приводит ограничению уровня шумовой составляющей фазы значением 60^0 .

При этом, при выходе из строя любого вибратора, система контроля АРП блокирует высвечивание пеленга, так как ошибка пеленгования может стать аномальной.

Разрешение неоднозначности фазовых измерений, превышающих 360^0 с помощью программных методов, позволяет устранить этот недостаток.

Методы исследования. Известно, что основной причиной отказа АРП является отказ элементов антенной системы.

Для обеспечения работоспособности эксплуатируемых АРП-75 их устанавливают в аэропортах по два комплекта (при выходе из строя одного, включается второй).

В АРП «Пихта» применялись две антенны, при этом, при неисправности одной из вибраторов антенной системы, вместо него использовалась информация с идентичного вибратора резервной антенны, находящейся в горячем резерве [4].

Отказ АРП, вызванный выходом из строя вибратора антенной системы, может быть восстановлен программным методом, с использованием фазовых соотношений с двух пар ортогонально расположенных элементов кольцевой антенной решетки [6,7,8].

Известно, что для фазового детектора с линейным рабочим диапазоном в пределах $-\pi \div \pi$ действительные значения и значения разностей фаз с неоднозначностью связаны зависимостью

$$\psi_k = \varphi_k - 2\pi n, \text{ если } (2n - 1)\pi < \varphi_k < (2n + 1)\pi \quad (1)$$

где: φ_k – действительные значения разностей фаз,

ψ_k - значения разностей фаз с неоднозначностью,

n -целое число

Для фазового детектора имеющего линейную характеристику в диапазоне $0 \div 2\pi$ эта зависимость будет иметь вид:

$$\psi_k = \varphi_k - 2\pi n, \text{ если } 2\pi n < \varphi_k < 2(n + 1)\pi \quad (2)$$

Для восстановления значений разностей фаз ψ_k нужно произвести операцию:

$$[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N] + 2\pi[n_1, n_2, \dots, n_N] \quad (3)$$

где: $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ – вектор действительных значений разностей фаз;

$[\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k]$ - вектор значений разностей фаз, сформированных фазовым детектором,

$[n_1, n_2, \dots, n_N]$ - неизвестный вектор дополнений целых чисел,

N -число вибраторов антенной системы.

Таким образом, задача разрешения неоднозначности фазовых измерений сводится к определению методом перебора всех возможных значений $[n_1, n_2, \dots, n_N]$.

Для M вариантов вектора дополнений, имеем матрицу размером $N \cdot M$:

$$D = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1N} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{M1} & n_{M2} & \dots & n_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

В соответствии с которой получим матрицу фаз размером (N,M):

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdot & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdot & \varphi_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi_{M1} & \varphi_{M2} & \cdot & \varphi_{MN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Здесь, элементы матрицы φ формируются следующим образом:

$$\varphi_{lk} = \psi_{lk} + n_{lk}2\pi, \quad l = 1, 2 \dots M, \quad k = 1, 2 \dots N$$

Номер вибратора k - ортогонального i - му определяется выражением:

$$k = \left\{ \frac{i + N/4}{N} \right\} N \quad (6)$$

причем, при $k=0$, принимается значение $k=N$.

Разность фаз между центральным и i -м вибраторами антенной решетки определяется выражением

$$\varphi_i = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left(\frac{2\pi(i-1)}{N} - \theta \right) \quad (7)$$

тогда, разность фаз между k - м и центральным вибраторами определяется выражением

$$\varphi_{k+\frac{N}{4}} = m \cos \beta \sin \left(\frac{2\pi(k-1)}{N} - \theta \right) \quad (8)$$

где: R – радиус антенной решетки,

λ – длина волны пеленгуемого сигнала,

β - угол места на источники излучения, θ - пеленг на источник излучения.

В связи с чем, справедливо равенство:

$$\varphi_i^2 + \varphi_{i+\frac{N}{4}}^2 = \left(\left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right) \cos \beta \right)^2 = m^2 \cos^2 \beta, \quad (9)$$

где $m = \frac{2\pi R}{\lambda}$ - индекс фазовой модуляции.

Для двух пар ортогонально расположенных вибраторов в идеальном варианте имеем:

$$\frac{\sqrt{\varphi_i^2 + \varphi_{i+4}^2}}{\sqrt{\varphi_j^2 + \varphi_{j+4}^2}} = 1 \quad (10)$$

Реально условиях, из-за наличия помех, это отношение не будет равно 1. Поэтому, справедливо выражение:

$$\left| \frac{\sqrt{\varphi_i^2 + \varphi_{i+4}^2}}{\sqrt{\varphi_j^2 + \varphi_{j+4}^2}} - 1 \right| \leq \Delta \quad (11)$$

где: Δ - заранее заданная ошибка.

Истинным значениями фаз будут те из них, для которых Δ является минимальным.

Для восстановления работоспособности АРП, вызванной выходом из строя элемента антенной решетки можно использовать метод комбинаторики [12].

Этот метод может обеспечить работоспособность АРП при фактически не менее трех исправных элементах антенной системы.

Будем считать, что работоспособными являются элементы антенной решетки под номерами l, k, n , для которых измеренные разности фаз, равны:

$$\begin{cases} m \cos \beta \cos \left[\frac{2\pi(l-1)}{N} - \theta \right] = a \\ m \cos \beta \cos \left[\frac{2\pi(k-1)}{N} - \theta \right] = b \\ m \cos \beta \cos \left[\frac{2\pi(n-1)}{N} - \theta \right] = c \end{cases} \quad (12)$$

Так как фазы измеряются с неоднозначностью, то они могут принимать любые значения, кратные 2π .

Поэтому, с учетом неоднозначности уравнения (12) могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} m \cos \beta \cos \left(\frac{2\pi(l-1)}{N} - \theta \right) = a + 2k\pi \\ m \cos \beta \cos \left(\frac{2\pi(k-1)}{N} - \theta \right) = a + 2k\pi \\ m \cos \beta \cos \left(\frac{2\pi(n-1)}{N} - \theta \right) = a + 2k\pi \end{cases} \quad (13)$$

При этом,

$$k \in Z[-(k+1); k], \quad k = \left[\frac{R}{\lambda} \right].$$

Для антенной решетки, например, с радиусом $R=1,6$ м., пеленгующего сигнал на частоте $f = 400$ МГц в уравнении (13) разности фаз могут принять значения: $\varphi - 6\pi$, $\varphi - 4\pi$, $\varphi - 2\pi$, φ , $\varphi + 2\pi$, $\varphi + 4\pi$

В связи с этим, вместо каждого уравнения системы (13), будем иметь по шесть уравнений.

В системе уравнений (13) неизвестными являются пеленг θ и угол места β , которые могут быть найдены решением двух любых из трех уравнений. Так как каждое уравнение системы имеет 6 возможных вариантов разностей фаз в правой части, то необходимо вместо двух уравнений решать 36 систем двух уравнений, которые дадут по 36 значений пеленга θ и угла места β .

Для примера, если возьмем два первых уравнения из (12) получим:

$$\cos\beta = \frac{b}{m \cos\left(\frac{2\pi(k-1)}{N} - \theta\right)}, \quad (14)$$

$$\theta = \arctg \frac{b \cos \frac{2\pi(l-1)}{N} - a \cos \frac{2\pi(k-1)}{N}}{a \sin \frac{2\pi(k-1)}{N} - b \sin \frac{2\pi(l-1)}{N}}, \quad (15)$$

Подставляя вместо a и b все возможные комбинации

$$a + 2k\pi, b + 2k\pi, k \in Z[-(k+1), k], k = \left[\frac{2\pi R}{\lambda} \right]$$

получим 36 значений пеленга θ и соответствующие им 36 значений угла места β .

При этом, из рассмотрения исключаются пеленги, для которых абсолютные значения $\cos\beta$ будут превышать $1 \pm \Delta$. Причем Δ должен быть выбран исходя из уровня допустимых значений помех.

Вторая пара уравнений (12) даст еще 36 пар значений пеленга θ и угла места β , из которых только одна пара будет близка по значению одной первой паре. В случае появления большего количества пар с близкими значениями пеленгов θ и углов места β дальнейший анализ может быть выполнен исходя из условия размещения элементов антенной решетки по окружности, т.е. из условия обеспечения равенства:

$$\varphi_i = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\beta \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{N} - \theta\right), \quad (16)$$

т.е. вычисленные разности фаз должны удовлетворять условию равномерного размещения элементов антенной решетки по окружности:

Рассмотренный метод, одновременно с восстановлением работоспособности АРП, дает возможность по выражениям (14) и (15) вычислить пеленг θ и угол места β на источник радиополучения.

Для уменьшения массогабаритных характеристик с одновременным повышением надежности АРП предлагается качественно новое его функциональное построение [5].

В эксплуатируемых многоканальных АРП для каждого частотного канала предназначен свой канал пеленгования, содержащий радиоприемник, устройство обработки пеленгационной информации. При этом максимальное число пеленгационных каналов равно 16.

Для обеспечения надежности в АРП применено скользящее резервирование, суть которого заключается в том, что проверяемый на исправность канал, выводится из режима пеленгования и, вместо него подключается резервный канал, который продолжает пеленгование на рабочей частоте. Выведенный из режима пеленгования канал настраивается на частоту контрольного измерительного генератора (КИГ) с заранее известным азимутом и определяет его пеленг.

Если значение измеренного пеленга соответствует с заранее установленным допуском азимуту на КИГ, то проверяемый канал считается исправным и возвращается на свою рабочую частоту, а резервный канал переходит на проверку следующего рабочего канала. Если же пеленг не находится в пределах допуска, то он выводится из рабочего режима, и резервный канал продолжает работать на рабочей частоте.

При этом в АРП вырабатывается сигнал «Ухудшение состояния АРП», что говорит о том, что один из двух резервных каналов используется в качестве рабочего канала.

После этого в работу по проверке состояния рабочих каналов вступает второй резервный

канал. При выявлении еще одного неисправного канала второй резервный канал начинает работать вместо неисправного, и вырабатывается сигнал «Авария АРП», которая говорит о том, что состояние АРП не контролируется, и он в любой момент может оказаться неисправным.

Известно, что одновременно по всем n каналам пеленгования на связь не выходят. Кроме того, проведенные исследования показали, что средняя длительность выхода на связь на одном частотном канале равна 3 сек и в то же время, имеется реальная возможность создания АРП, пеленгующего сигналы с длительностью 0,05 сек. Это дает возможность предложить, функциональную схему, приведенную на рис. 1.

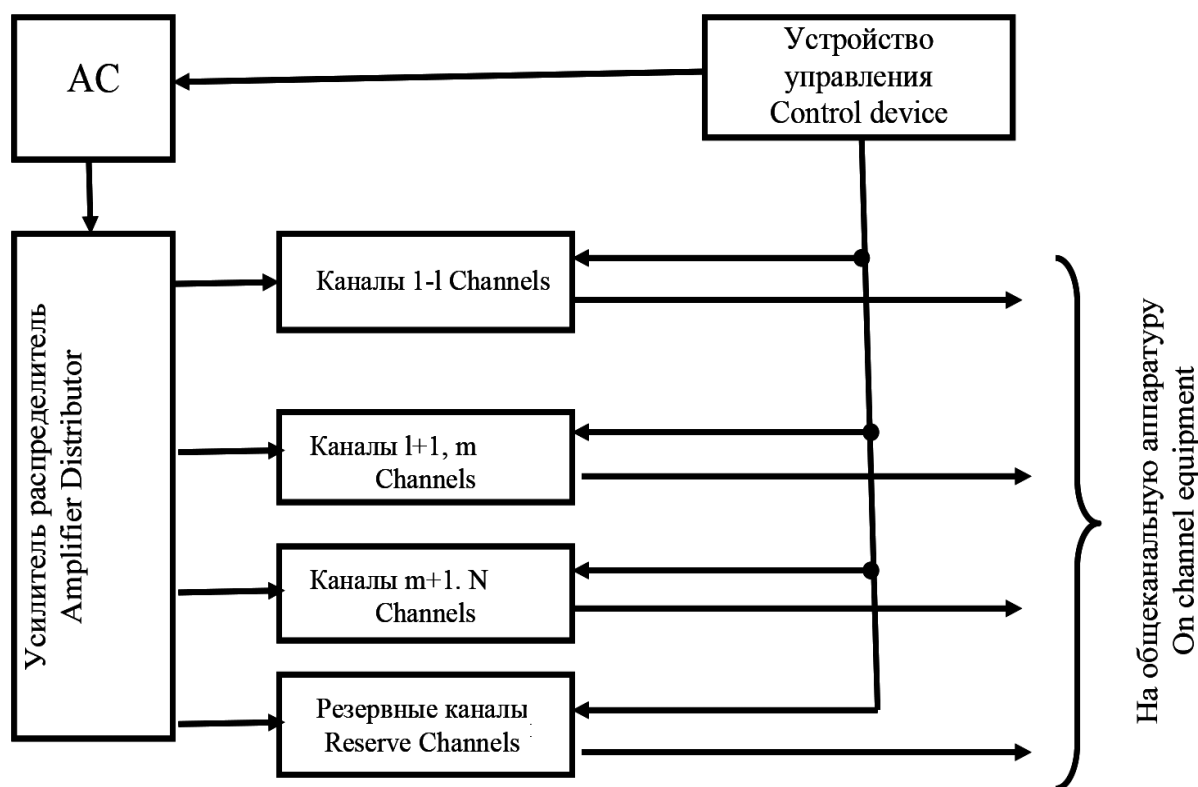


Рис. 1. Аэродромные квазидоплеровские автоматические радиопеленгаторы, где число каналов пеленгования меньше числа частотных каналов

Fig. 1. Aerodrome quasi-Doppler automatic direction finders, where the number of direction finding channels is less than the number of frequency channels

Здесь количество каналов обработки информации меньше числа частотных каналов n . Как видно из структурной схемы, один канал производит пеленгование по нескольким частотным каналам.

В схеме, антенная система и усилитель распределитель работают в обычном режиме. Устройство управления, кроме выработки опорных напряжений, производит сканирование каналов пеленгования по частотам, на которые настроен канал пеленгования. Кроме того, устройство управления осуществляет скользящее резервирование, вышедших из строя каналов пеленгования.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма скользящего резервирования.

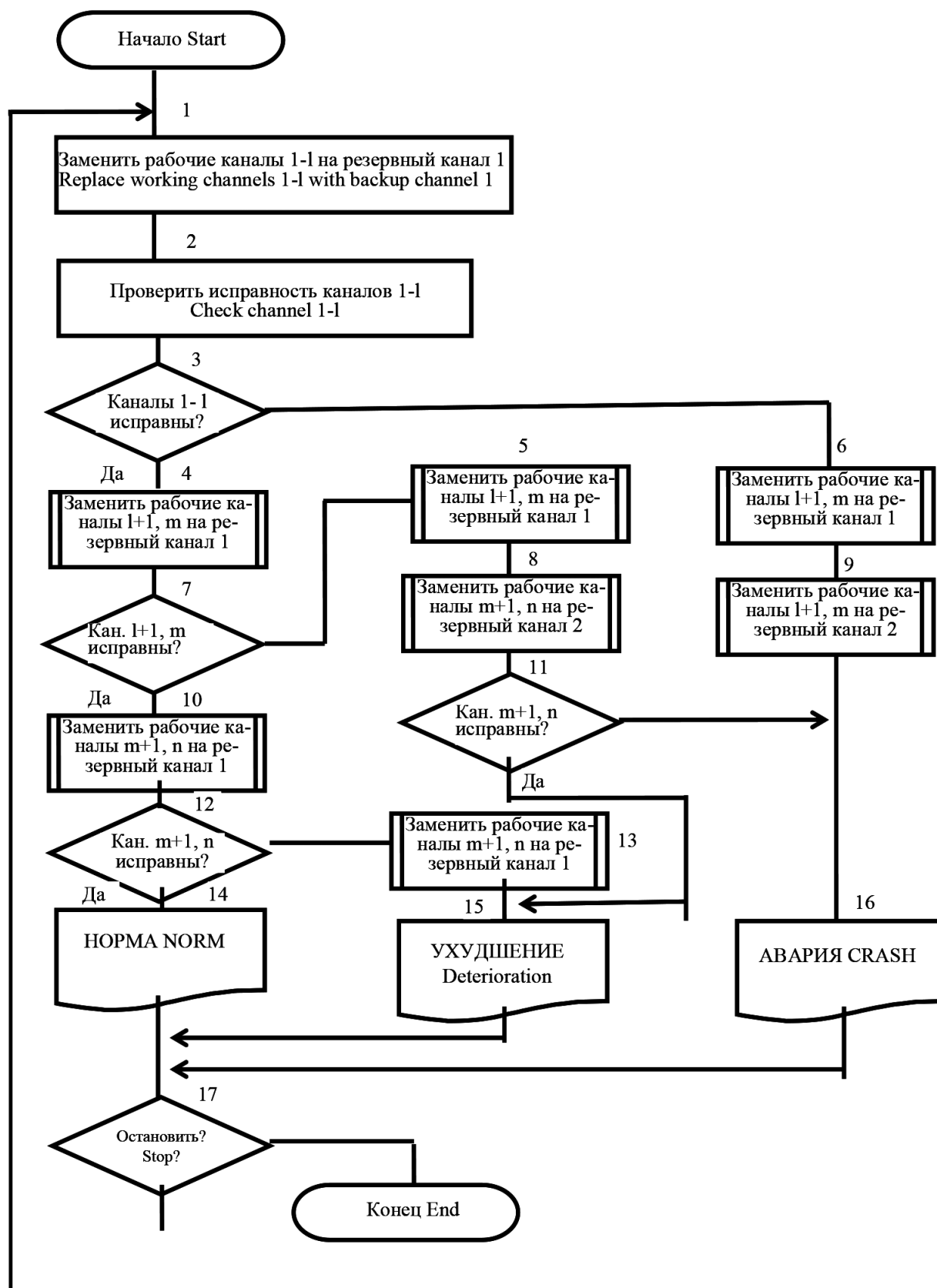


Рис. 2. Блок-схема алгоритма скользящего резервирования
Fig. 2. The block diagram of the rolling reservation algorithm

Система резервирования работает следующим образом.

Вместо канальной части аппаратуры, пеленгующей сигналы на частотных каналах $1 \div 1$, подключается первый резервный канал, который настраивается на частоты рабочего канала $1 \div 1$, что позволяет радиопеленгатору продолжать функционировать в штатном режиме.

Рабочий канал настраивается на частоту контрольно измерительного генератора (КИГ) и определяет пеленг на него. Если погрешность пеленгования КИГ не превышает заранее заданной величины, то рабочий канал считается исправным и переводится в рабочий режим (блоки 1, 2).

В случае неисправности рабочего канала, резервный канал продолжает работать в качестве основного канала (блоки 3, 6). В этом случае, в работу вступает второй резервный канал. При этом, если исправны все рабочие каналы, то система контроля выдает информацию «НОРМА» (блоки 1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14).

Если же неисправен один рабочий канал, то высвечивается информация «УХУДШЕНИЕ» (блоки 1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 15 или 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 15).

В случае неисправности двух рабочих каналов, на табло высвечивается информация «АВАРИЯ» (блоки 1, 2, 3, 5, 7, 8, 11, 16 или 1, 2, 3, 6, 9, 16).

Высвечивание информации «НОРМА», означает, что радиопеленгатор функционирует в штатном режиме.

Информация «УХУДШЕНИЕ» означает, что радиопеленгатор исправен, но может выйти из строя. В нашем случае это означает, что один резервный канал занят и при выходе из строя еще одного рабочего канала второй резервный канал будет работать вместо него, как основной, и прекратится контроль работы АРП.

Такая же информация высвечивается, например, если радиопеленгатор перейдет на работу от резервного источника питания.

«АВАРИЯ» означает, что пеленгатор неисправен, и, эксплуатировать его нельзя. А в нашем случае, когда второй резервный канал работает вместо основного, хотя пеленгатор и продолжает определять пеленги на воздушные суда, но отсутствует контроль состояния АРП, в связи с чем, эксплуатировать его нельзя. Такие жесткие требования к функционированию АРП вызваны высокими требованиями по его надежности. Радиопеленгатор должен обеспечивать непрерывную круглосуточную работу в течение 2000 часов.

Произведем сравнительный анализ выигрыша средней наработки на отказ предложенной структурной схемы АРП, с традиционной.

Предварительный анализ показывает, что в предложенном варианте, один канал пеленгования может осуществлять в сканирующем режиме пеленгование по шести частотным каналам.

Таким образом, для пеленгования по шестнадцати частотным каналам потребуется 3 рабочих канала (по традиционной схеме – 16). Число резервных каналов, для обеих схем, примем равным двум.

Средняя наработка до отказа резервированных каналов пеленгования, при равнонадежных каналах, будет равна:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N+1} + \dots + \frac{1}{N+M} \right) \quad (17)$$

где: λ - интенсивность отказов одного канала пеленгования,

N - число основных каналов пеленгования,

M - число резервных каналов пеленгования.

Тогда, соответственно, для шестнадцати канального АРП и АРП по предлагаемой схеме, получим:

$$T_{cp16} = \frac{433}{2448\lambda}, \quad T_{cp3} = \frac{47}{60\lambda}$$

Обсуждение результатов. Таким образом, при использовании предлагаемой схемы, средняя наработка на отказ канальной части АРП увеличится в 4,4 раза.

В целях повышения надежности АРП может быть изменено время накопления информации в канале обработки в зависимости от мощности пеленгуемого сигнала [13].

В АРП, находящихся в эксплуатации, накопление информации производится за 8 циклов сканирования элементов антенной решетки.

Известно, что уровень сигнала на входе приемника меняется в зависимости от мощности пеленгуемого сигнала. Поэтому, для обеспечения одинакового уровня сигнала, приходится изменять коэффициент усиления радиоприемника с помощью схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) приемника.

Уровень сигнала на выходе АРУ обратно пропорционально мощности пеленгуемого сигнала. Таким образом, в зависимости от уровня сигнала на выходе АРУ можно изменить количество циклов сканирования антенной решетки.

В связи с высокими требованиями по надежности функционирования АРП (2000 часов непрерывной круглосуточной работы) на аэропортах были вынуждены устанавливать по 2 комплекта АРП,

Одним из наименее надежных узлов АРП является антенная система. Это связано тем, что выход из строя любого элемента антенной решетки приводит к выходу из строя АРП.

Для обеспечения работоспособности АРП при выходе из строя вибраторов антенной системы предложены новые программные методы:

- с использованием фазовых соотношений с любых двух пар ортогонально расположенных вибраторов кольцевой антенной решетки;
- с использованием метода комбинаторики;

Разработанные методы обеспечения работоспособности АРП при выходе из строя вибраторов антенной системы позволяют одновременно вычислить пеленг и угол места на источник радиоизлучения.

Предложенная схема организации работы АРП позволяет повысить среднюю наработку на отказ одного канала пеленгования в 4,4 раза.

Вывод. Предложенные методы обработки информации позволяют обеспечить работоспособность АРП при выходе из строя вибраторов антенной системы программными методами, без аппаратных затрат.

Новая схема организации работы АРП позволяет повысить среднюю наработку на отказ одного канала пеленгования в 4,4 раза.

Библиографический список:

1. Асланов Г.К. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: "Прикладные методы обеспечения точностных характеристик АРП и АРПС". Московский государственный технический университет гражданской авиации. Москва 1998г.
2. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ причин возникновения аномальных ошибок в квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Информатика Телекоммуникации Управление, №2. СПб: 2009.
3. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Выход из строя элементов антенной системы АРП как причина возникновения аномальной ошибки пеленгования // Сборник тезисов докладов XXX итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ: тезисы докладов. Часть I. Технические науки – Махачкала: ДГТУ, 2009.
4. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ ошибок автоматических радиопеленгаторов, вызываемых выходом из строя элементов антенной системы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2008. №14, С. 91-96.
5. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Улучшение технических характеристик АРП, путем его интеллектуализации // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы IV Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий, 22-25 сент. 2009 г. Махачкала: ДГТУ, 2009.
6. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Казибеков Р.Б., Тетакаев У.Р. Оценка ошибок, вызываемых выходом из строя элементов антенной системы аэродромного автоматического радиопеленгатора // Вестник Дагестанского

технического университета. Технические науки. 2018; 45(2) :94-103. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103>

7. Асланов Г.К., Казобеков Р.Б., Тетакаев У.Р.. Об одном методе обеспечения работоспособности фазовых автоматических радиопеленгаторов при неисправных вибраторах антенной системы // Молодежь, наука, инновации»: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Грозный: ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова, 2013.

8. Казобеков, Р.Б. Обеспечение работоспособности аэродромных автоматических радиопеленгаторов при неисправной антенной системе // Межд. сб. науч. тр. «Smart IT», 2014.

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977.

10. Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. М., "Сов. радио", 1964г.

11. Саидов А.С., Тагилаев А.Р., Алиев Н.М., Асланов Г.К. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. Москва, Радио и связь, 1997 г.

12. Тетакаев У.Р., Казобеков Р.Б. Разрешения фазовой неоднозначности методом комбинаторики / // Сборник тезисов докладов XXXVI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21-25 апреля 2015 г. Махачкала: ДГТУ, 2015.

13. Тетакаев У.Р., Казобеков Р.Б., Мирзабеков Т.М., Шихмагомедова Р.Ф. Повышение надежности автоматического радиопеленгатора за счет оптимизации времени накопления информации в зависимости от уровня пеленгуемого сигнала //Сборник тезисов докладов XXXVIII итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 17-22 апр. 2017 г. Махачкала: ДГТУ, 2017.

14. Direction finding of narrowband autoregressive sources by antenna arrays /Ziskind Ilan, Bar-Ness Yeheskel // Antennas and Propag.: Int. Symp. Dig."Merg. Technol. 90's", Dallas, Tex., May 7-11, 1990. Vol. 4. Piscataway (N.J.),1990.

15. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of unknown noise fields / Wang Fengzhen // Res. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Va, May 7-10, 1990. New York (N. Y.), 1990.

16. Johnson, J.: R&S direction finders for Her Majesty's Coastguard. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp.36-37.

17. Mutual coupling effects on phase-only direction finding / Weiss Anthony J., Friedlander Benjamin // IEEE.Trans. Antennas and Propag. 1992. Vol.40, N5.

18. Performance analysis of direction finding using lag redundancy averaging /Doron Miriam A., Weiss Anthony J., //IEEE Trans. Signal Process. 1993. 41, N3. 15. Precision DF safeguards North-Sea shipping. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp.35-36.

19. F. Quint, J. Reichert and H. Roos. Emitter Detection and Tracking Algorithm for a Wide Band Multichannel. Direction-Finding System in the HF-Band. Proc. MILCOM 1999, vol.1, pp.212-216. 1999.

20. A. Chemarov, "The Signal Detection/Direction Finding Algorithm in a Wide Simultaneous Scan Band", 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, EMC-2009, p. 71-74, St.-Petersburg, Russia, June 16-19, 2009.

21. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of unknown noise fields / Wang Fengzhen // Res. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Va, May 7-10, 1990. New York (N. Y.), 1990.

22. Unsett U. VHF Direction Finders control shipping in North Sea and Atlantic. News from Rohde & Schwarz (1989) No.124, pp.36-37.

References:

1. Aslanov G.K. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk na temu: "Prikladnyye metody obespecheniya tochnostnykh kharakteristik ARP i ARPS". Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet grazhdanskoy aviatsii. Moskva 1998g. [Aslanov G.K. Abstract of dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on the topic: "Applied methods to ensure the accuracy characteristics of ARP and ARPS." Moscow State Technical University of Civil Aviation. Moscow 1998. (In Russ)]

2. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analiz prichin vozniknoveniya anomal'nykh oshibok v kvazidoplerovskikh avtomaticheskikh radiopelengatorakh // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU, seriya Informatika Telekommunikatsii Upravleniye, №2. SPb: 2009. [Aslanov G.K., Hasanov O.I. Analysis of the causes of abnormal errors in quasi-Doppler automatic direction finders // Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University, Series Informatics Telecommunications Management, No. 2. SPb: 2009. (In Russ)]

3. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Vykhod iz stroya elementov antennoy sistemy ARP kak prichina vozniknoveniya anomal'noy oshibki pelengovaniya // Sbornik tezisev dokladov XXX itogovoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU: tezisy dokladov. Chast' I. Tekhnicheskiye nauki – Makhachkala: DGTU, 2009. [Aslanov G.K., Hasanov O.I. Failure of elements of the ARP antenna system as the cause of an abnormal direction finding error // Collection of abstracts of the XXX final scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of DSTU: abstracts. Part I. Technical sciences - Makhachkala: DSTU, 2009. (In Russ)]

4. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analiz oshibok avtomaticheskikh radiopelengatorov, vyzvyvayemykh vy-khodom iz stroya elementov antennoy sistemy // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-versiteta. Tekhnich-

eskiye nauki. – 2008. - №11. [Aslanov G.K., Hasanov O.I. Error analysis of automatic direction finders caused by the failure of the antenna system elements // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2008. No. 11. pp. 91-96. (In Russ)]

5. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Uluchsheniye tekhnicheskikh kharakteristik ARP, putem yego intellektualizatsii // Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v proyektirovani, upravlenii i ekonomike: materialy IV Vserossiyskoy konferentsii po aktual'nyim problemam vnedreniya i razvitiya sektora IT-tekhnologiy, 22-25 sent. 2009 g. - Makhachkala: DGTU, 2009. [Aslanov G.K., Hasanov O.I. Improving the technical characteristics of ARPs through its intellectualization // Modern Information Technologies in Design, Management and Economics: Proceedings of the IV All-Russian Conference on Actual Problems of Implementation and Development of the IT-Technology Sector, September 22-25. 2009 - Makhachkala: DSTU, 2009. (In Russ)]

6. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kazibekov R.B., Tetakayev U.R. Otsenka oshibok, vyzyvayemykh vykhodom iz stroya elementov antennoy sistemy aerodromnogo avtomaticheskogo radiopelengatora // Vestnik Dagestanskogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki 2018; 45(2) :94-103. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103> [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kazibekov R.B., Tetakaev U.R. Evaluation of errors caused by the failure of the elements of the antenna system of an airfield automatic direction finder // Bulletin of the Dagestan Technical University. Engineering 2018; 45(2) :94-103. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103>. (In Russ)]

7. Aslanov G.K., Kazibekov R.B., Tetakayev U.R. Ob odnom metode obespecheniya rabotosposobnosti fazovykh avtomaticheskikh radiopelengatorov pri neispravnykh vibratorakh antennoy sistemy // Molodezh', nauka, innovatsii: Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Groznyy: GGNTU imeni akademika M.D. Millionshchikova, 2013. [Aslanov G.K., Kazibekov R.B., Tetakaev U.R. On a method for ensuring the operability of phase automatic direction finders with faulty vibrators of the antenna system // Youth, Science, Innovation”: Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference. - Terrible: GSTU named after academician M.D. Millionschikova, 2013. (In Russ)]

8. Kazibekov, R.B. Obespecheniye rabotosposobnosti aerodromnykh avtomaticheskikh radiopelengatorov pri neispravnoy antennoy sisteme // Mezhd. sb. nauch. tr. «Smart IT», 2014. [Kazibekov R.B. Ensuring the operability of airfield automatic direction finders with a faulty antenna system // Int. Sat scientific tr Smart IT, 2014. (In Russ)]

9. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov). M.: Nauka, 1977. [Korn G., Korn T. Handbook of mathematics (for scientists and engineers). M.: Nauka, 1977. (In Russ)]

10. Kukes I.S., Starik M.Ye. Osnovy radiopelengatsii. M., "Sov. radio", 1964. [Kukes I.S., Old man M.E. Basics of direction finding. M., "Sov. Radio", 1964. (In Russ)]

11. Saidov A.S., Tagilayev A.R., Aliyev N.M., Aslanov G.K. Proyektirovaniye fazovykh avtomaticheskikh radiopelngatorov. Moskva, Radio i svyaz', 1997. [Saidov A.S., Tagilaev A.R., Aliev N.M., Aslanov G.K. Design of phase automatic radio panglers. Moscow, Radio and Communications, 1997. (In Russ)]

12. Tetakayev U.R., Kazibekov R.B. Razresheniya fazovoy neodnoznachnosti metodom kombinatoriki // Sbornik tezisov dokladov XXKHVI itogovoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 21-25 aprelya 2015. – Makhachkala: DGTU, 2015. [Tetakaev U.R., Kazibekov R.B. Resolutions of phase ambiguity by the combinatorics method // Collection of abstracts of reports XXXVI of the final scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of DGTU, April 21-25, 2015. Makhachkala: DGTU, 2015. (In Russ)]

13. Tetakayev U.R., Kazibekov R.B., Mirzabekov T.M., Shikmagomedova R.F. Povysheniye nadezhnosti avtomaticheskogo radiopelengatora za schet optimizatsii vremeni nakopleniya informatsii v zavisimosti ot urovnya pelenguyemogo signala //Sbornik tezisov dokladov XXKHVIII itogovoy nauchno-tekhnicheskoy konfe-rentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 17-22 apr. 2017. Makhachkala: DGTU, 2017. [Tetakaev U.R., Kazibekov R.B., Mirzabekov T.M., Shikmagomedova R.F. Improving the reliability of the automatic direction-finder by optimizing the accumulation time of information depending on the level of the direction-finding signal // Collection of abstracts XXXVIII of the final scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of DSTU, April 17-22. 2017. Makhachkala: DSTU, 2017.

14. Direction finding of narrowband autoregressive sources by antenna arrays / Ziskind Ilan, Bar-Ness Yeheskel // Antennas and Propag.: Int. Symp Dig. "Merg. Technol. 90's", Dallas, Tex., May 7-11, 1990. Vol. 4. Piscataway (N.J.), 1990.

15. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of un-known noise fields / Wang Fengzhen // Res. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Va., May 7-10, 1990. New York (N. Y.), 1990.

16. Johnson, J.: R&S direction finders for Her Majesty's Coastguard. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp. 36-37.

17. Mutual coupling effects on phase-only direction finding / Weiss Anthony J., Friedlander Benjamin // IEEE.Trans. Antennas and Propag. 1992. Vol. 40, N5.

18. Performance analysis of direction finding using lag redundancy averaging / Doron Miriam A., Weiss Anthony J., // IEEE Trans. Signal Process. - 1993. 41, No. 3. 15. Precision DF safeguards North-Sea shipping. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp. 35-36.

19. F. Quint, J. Reichert and H. Roos. Emitter Detection and Tracking Algorithm for a Wide Band Multichannel. Direction-Finding System in the HF-Band. Proc. MILCOM 1999, vol. 1, pp. 212-216. 1999.

20. A. Chemarov, "The Signal Detection / Direction Finding Algorithm in a Wide Simultaneous Scan Band", 8th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, EMC-2009, pp. 71-74, St.-Petersburg, Russia, June 16-19, 2009.
21. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of unknown noise fields / Wang Fengzhen // Res. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Va., May 7-10, 1990. New York (N. Y.), 1990.
- 22.. Unsett U. VHF Direction Finders control shipping in North Sea and Atlantic. News from Rohde & Schwarz (1989) No.124, pp. 36 - 37.

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Кадырбекович, доктор технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: uits@dstu.ru

Казибеков Рустам Бидирханович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: Kazib.rus11@mail.ru

Мирзабеков Темурихан Мевлюдинович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: Mirzabekov.timur@mail.ru

Мусаилов Рашид Рагимханович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: rashid_musaibov@mail.ru

Information about the authors.

Gaydarbek K. Aslanov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: uits@dstu.ru.

Rustam B. Kazibekov, Graduate Student, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: Kazib.rus11@mail.ru

Temurkhan M. Mirzabekov, Graduate Student, Department of Management and Computer Science in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: Mirzabekov.timur@mail.ru

Rashid R. Musaibov, Graduate Student, Department of Management and Computer Science in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: rashid_musaibov@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.05.2019.

Принята в печать 12.07.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.05.2019.

Accepted for publication 12.07.2019.

Для цитирования: Бизянов Е.Е., Гутник А.А. Метод получения параметров функций принадлежности нечетких множеств на основе реальных данных для систем автоматизированной обработки информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3): 79-86. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86.

For citation: E. E. Bisyanov, A. A. Gutnik. Method for obtaining the parameters of membership functions of fuzzy sets based on real data for automated information processing systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 79-86. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Бизянов Е.Е., Гутник Е.Е.

Донбасский государственный технический университет,
94204, ЛНР, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, Украина

Резюме. Цель. Разработка метода выбора типа функции принадлежности и получения ее параметров, который позволил бы исключить субъективное влияние человека при автоматизированной обработке информации. **Метод.** В работе рассмотрены и проанализированы существующие методы построения функций принадлежности. Исследование основано на методах нечеткой логики и анализа данных. **Результат.** Предложен метод получения параметров функций принадлежности нечетких множеств, использующий реальные данные. Предложено для определения ядра нечеткого числа использовать данные, полученные от исследуемого объекта, а для носителя — теоретические сведения об объекте. Рассматриваются треугольная, трапециевидная, колоколообразная и гауссова функции принадлежности. Внешний вид функции принадлежности предложено определять с помощью критерия – отношения ядра к носителю нечеткого множества. Приведены результаты расчетов при использовании предложенного метода для получения функций принадлежности на основании данных о мощности, потребляемой электродвигателями различного типа. **Вывод.** Разработанный метод может найти применение как в системах поддержки принятия решений, так и в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Предложенные в статье значения критерия могут быть пересмотрены при необходимости учета значений, входящих в множество измеренных реальных данных, или исходя из требования упрощения процедуры автоматизированной обработки. В дальнейших исследованиях планируется применение описанного метода для получения термов лингвистических переменных.

Ключевые слова: данные, нечеткое множество, носитель, ядро, функция принадлежности

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

METHOD FOR OBTAINING THE PARAMETERS OF MEMBERSHIP FUNCTIONS
OF FUZZY SETS BASED ON REAL DATA FOR AUTOMATED INFORMATION
PROCESSING SYSTEMS

E.E. Bisyanov, A.A. Gutnik

Donbas State Technical University,
16 Lenin Ave., LNR, Alchevsk 94204, Ukraine

Abstract Objectives Development of a method for selecting the type of accessory function and obtaining its parameters to allow subjective personal influences in automated information processing to be excluded. **Method.** Existing methods for constructing membership functions were analysed. The research was based on the methods of fuzzy logic and data analysis. **Results.** A method for obtaining the parameters of membership functions of fuzzy sets using real data is suggested. It is proposed to use the data obtained from the object under study to determine the kernel of the fuzzy number, as well as derive theoretical information about the object for the carrier. Triangular, trapezoidal, bell-shaped and Gaussian membership functions are considered. The appearance of the membership function can be defined using the criterion of the relations of the kernel to the carrier of a fuzzy set. The results of calculations for obtaining the membership functions based on data on the power consumption of electric motors of different types are given. **Conclusion.** The developed method can be used both in decision support systems as well as in automated systems for controlling technological processes. If necessary, the values of the criterion proposed in the article can be revised to take the values included in the set of measured real data into account or to simplify the procedure of automated processing. Further research will use the described method to obtain the terms of linguistic variables.

Keywords: data, fuzzy set, medium, kernel, membership function

Введение. Увеличение объемов данных, хранящихся в базах данных информационных систем, приводит к необходимости постоянного совершенствования методов их обработки. В автоматизированных системах обработки информации данные поступают в основном в оцифрованном виде, в то время как человек привык оперировать лингвистическими понятиями.

Однако включение человека в процесс обработки данных вносит субъективность в процесс обработки данных, что может увеличить неопределенность [1], и, как следствие, привести к неверным результатам. В [1] приведены следующие виды неопределенностей информации, которые можно анализировать с использованием теории нечетких множеств: статистическая, субъективная, экспертные оценки, предпочтения, лингвистическая, конфликтующая, недостаточность информации.

Одним из эффективных инструментов для обработки информации в условиях неопределенности является математический аппарат теории нечетких множеств [2].

Нечеткая логика и нечеткая математика в настоящее время используются во многих областях человеческой деятельности: в технике, медицине, экономике, биологии и пр., что обусловлено наличием неопределенностей во входных данных: неточностью или недостаточностью данных, приблизительным характером рассуждений людей при принятии решений, неподтвержденной достоверностью поступающей информации.

Нечеткое множество (НМ) часто представляют в виде функции принадлежности (ФП), которая ставит в соответствие каждому значению из некоторого множества число — степень принадлежности из заданного интервала [2].

Особенностью использования теории нечетких множеств является то, что ФП нечеткого множества должна быть сформирована вне теории, что приводит к сложностям в проверке её адекватности [3].

Постановка задачи. Выбор ФП в значительной мере зависит от объемов и достоверности поступающей на обработку информации [2].

При малом объеме входной информации используют простые ФП [3, 4], для которых требуется небольшое количество параметров: колоколообразную, трапецевидную, треугольную и гауссову, представленные на рис. 1.

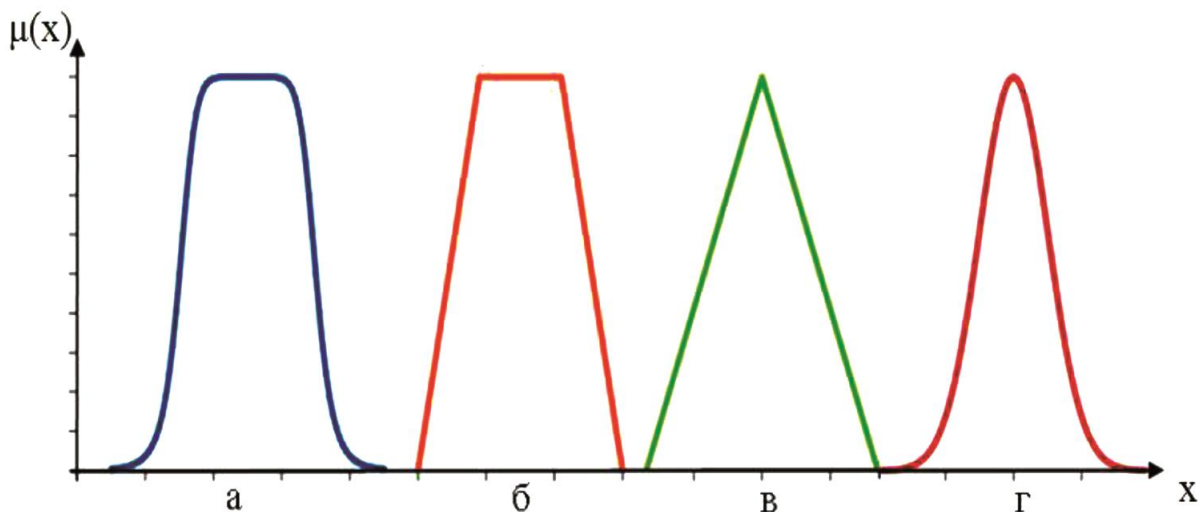


Рис. 1. Внешний вид функций принадлежности

Fig. 1. The form of membership functions

Колоколообразная (рис.1, а) и трапецевидная ФП (рис.1, б) имеют схожую форму, также как треугольная (рис.1, в) и гауссова (рис.1, в) ФП, отличаясь плавностью переходов в точках перелома, что проявляется при их дифференцировании [2].

ФП колоколообразной формы и гауссова хорошо подходят для неопределенности, задаваемой людьми, т.к. соответствуют интервальным значениям, возникающим при поиске решения путем экспертного оценивания [2, 5], а трапецевидная и треугольная ФП наиболее пригодны для использования в системах автоматизированной обработки информации.

При построении функции принадлежности нечеткого множества исследователи используют: метод экспертных оценок [3, 7-8], критериальные оценки [4], кластеризацию [6] и теорию вероятности [7].

Чаще всего для получения функции принадлежности нечеткого множества используют экспертные оценки. Так, в [3] приведен обзор более 10 методов получения ФП, в [8] – еще 4 метода получения ФП на основе экспертных оценок, а в работе [7] предложено совместить экспертные оценки с теорией вероятности.

Ограничением методов, использующих экспертные оценки, является их субъективность, проявляющаяся в проявлении экспертами субъективной тенденции сдвигать оценки объектов в направлении концов оценочной шкалы [3].

При этом возникают догмы согласованности и одномерности, приводящие к необходимости отсеивания экспертов, использования подхода «квалиметрии» [9], а также «размытость» в постановке задачи.

Поэтому задача разработки метода получения функций принадлежности, который позволил бы исключить субъективное влияние человека при автоматизированной обработке информации, является актуальной.

Целью статьи является разработка метода выбора типа функции принадлежности нечеткого множества и расчета ее параметров, пригодного для использования в системах автоматизированной обработки информации в условиях неопределенности.

Методы исследования. Будем рассматривать функции принадлежности, имеющие треугольную и трапецевидную формы, для построения которых требуется минимальное количество данных, они могут быть модифицированы при изменении входной информации, а также

обеспечивают условие разбиения единицы [2], при этом обладая наглядной графической интерпретацией.

Сходность ФП треугольной формы и гауссовой, а также колоколообразной и трапециевидной позволит распространить полученные результаты на все виды ФП, приведенные на рис. 1.

Примем, что все рассматриваемые функции принадлежности – нормированы, т.е. для них соблюдается условие $\mu_{\max} = 1$ [2].

Пусть имеются значения параметра X , полученные в различные моменты времени (интервалы между соседними значениями могут быть различными):

$$X = \{x_1(t_1), x_2(t_2) \dots x_n(t_n)\} \quad (1)$$

Так как все элементы множества X — это реальные значения, для которых уровень возможности всегда равен единице, в качестве границ ядра нечеткого множества примем максимальное $X_{\max}$ и минимальное $X_{\min}$ значения из множества X .

В качестве границ носителя НМ примем теоретические значения минимума $X_{\min}^T$ и максимума $X_{\max}^T$ для анализируемого параметра, которые определим исходя из особенностей предметной области: например, для уровня потребления электроэнергии на предприятии минимальным значением будет 0 (все оборудование выключено), а максимальным — мощность, потребляемая при включении всего оборудования.

В качестве критерия выбора формы ФП примем отношение ядра к носителю нечеткого множества:

$$R = (X_{\max} - X_{\min}) / (X_{\max}^T - X_{\min}^T) \quad (2)$$

Так как ядро всегда меньше или равно носителю нечеткого множества, всегда будет выполняться условие $R \leq 1$. Примем, что при $R < 0.05$ ФП может быть представлена треугольной формой, при $0.05 \leq R \leq 0.2$ — функцией Гаусса, а при $R > 0.2$ — трапециевидной формой.

Предложенные граничные значения для критерия могут быть пересмотрены исследователем исходя из необходимости учета входящих в множество измеренных реальных значений данных X , или исходя из требования упрощения процедуры автоматизированной обработки: треугольные и гауссовы ФП обрабатывать проще, чем трапециевидные или колоколообразные.

Таким образом, при $R > 0.2$, задав значения $X_{\max}$, $X_{\min}$, $X_{\min}^T$ и $X_{\max}^T$, сразу получаем трапециевидную функцию принадлежности.

Для задания треугольной или гауссовой ФП требуются три опорные точки: границы носителя нечеткого числа ($X_{\min}^T$ и $X_{\max}^T$) и ядро.

Ядро НМ для треугольной или гауссовой ФП зададим средним квадратическим $X_{\text{ср.кв}}$ элементов множества X .

Выбор средней квадратической оценки из всех возможных вариантов средних [10] обусловлен тем, что ее значение наиболее приближено к середине интервала $[X_{\min}; X_{\max}]$, особенно при неравномерном разбросе значений внутри множества X .

Обсуждение результатов. Рассмотрим примеры построения функций принадлежности нечетких множеств с использованием предложенного метода.

Представим в форме нечеткого множества ток, потребляемый трехфазным асинхронным двигателем закрытого типа с короткозамкнутым ротором МЗВР 400 ЛКВ [11]. Значения тока, измеренные в произвольные моменты времени в стационарном режиме работы двигателя, приведены в табл. 1.

Найдем параметры ФП для представления тока, потребляемого двигателем МЗВР 400 ЛКВ, в виде нечеткого множества:

- максимальное значение потребляемого тока $I_{\max} = 1,1$ кА;
- минимальное значение потребляемого тока $I_{\min} = 1$ кА;
- теоретический максимум (значение пускового тока) $I_{\max}^T \approx 8,2$ кА [11];
- теоретический минимум (ток холостого хода) $I_{\min}^T = 0,22$ кА [11];

Рассчитаем критерий R по формуле (2):

$$R = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max}^T - I_{\min}^T) = (1,1 - 1) / (8,2 - 0,22) = 0,01.$$

Таблица 1. Потребляемый ток двигателя МЗВР 400 LKB
Table 1. Current consumed by the motor — МЗВР 400 LKB

Время Time	Значение тока Current, кА	Время Time	Значение тока Current, кА
t ₁	1,00	t ₉	1,08
t ₂	1,05	t ₁₀	1,06
t ₃	1,03	t ₁₁	1,04
t ₄	1,06	t ₁₂	1,04
t ₅	1,00	t ₁₃	1,03
t ₆	1,01	t ₁₄	1,02
t ₇	1,07	t ₁₅	1,00
t ₈	1,10	t ₁₆	1,04

Так как значение критерия $R < 0.05$, выбираем треугольную функцию принадлежности, после чего находим ядро нечеткого множества — среднее квадратическое потребляемого тока $I_{\text{ср.кв.}} = 1,039$ кА.

Полученная функция принадлежности для тока, потребляемого двигателем МЗВР 400 LKB, приведена на рис. 2.

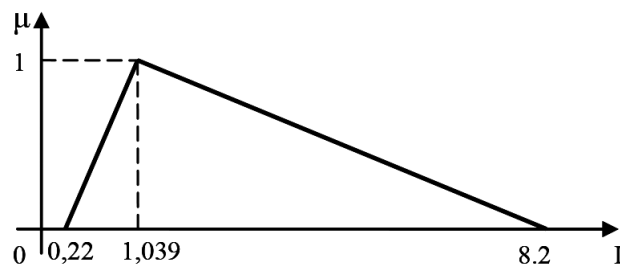


Рис. 2. Функция принадлежности для тока, потребляемого двигателем МЗВР 400 LKB
Fig. 2. Membership function for current consumed by the motor — МЗВР 400 LKB

Представим в форме нечеткого числа среднечасовую активную потребляемую мощность для двигателя ВАО2-560-630-4, установленного в насосной установке водоотлива угледобывающей шахты.

Гипотетический график мощности, потребляемой двигателем, показан на рис. 3.

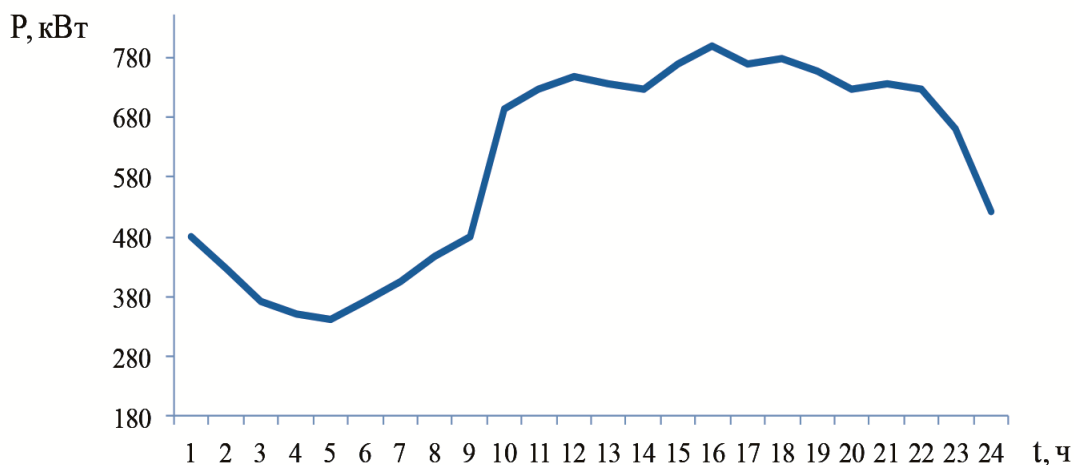


Рис. 3. График активной мощности, потребляемой насосом водоотлива шахты
Fig. 3. Chart of active power consumed by the mine drainage pump

Используя технические характеристики двигателя ВАО2-560-630-4 [12] и данные графика, приведенного на рис. 3, найдем параметры функции принадлежности:

- максимальное значение мощности $P_{\max} = 800,1$ кВт;
- минимальное значение мощности $P_{\min} = 341,376$ кВт;
- теоретический максимум (при $\eta = 95\%$, $\cos\varphi = 0,9$) $P_{\max}^T = 1066,8$ кВт;
- теоретический минимум (мощность холостого хода) $P_{\min}^T = 85,2$ кВт;

Рассчитаем величину критерия R по формуле (2):

$$R = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max}^T - P_{\min}^T) = (800,1 - 341,376) / (1066,8 - 85,2) = 0,43.$$

Так как значение $R > 0,2$, выбираем трапецидальную функцию принадлежности. Полученная функция принадлежности потребляемой мощности приведена на рис. 4.

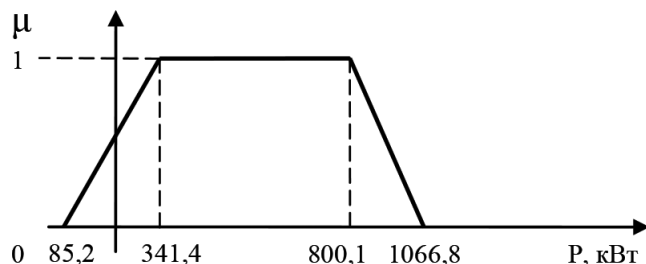


Рис. 4. Функция принадлежности для среднечасовой мощности, потребляемой двигателем ВАО2-560-630-4

Fig. 4. Membership function for the hourly average power consumed by the engine – VAO2-560-630-4

Таким образом, предлагаемый метод позволяет выбирать вид функции принадлежности нечеткого множества и задавать ее параметры в автоматическом режиме, без привлечения человека, основываясь на реальных данных объектов и процессов.

Вывод. Проведенный анализ известных методов построения функций принадлежности нечетких множеств показал, что большинство из них использует экспертные оценки, что вносит субъективность в результаты и усложняет процесс автоматизации обработки данных.

Для автоматизированного получения функций принадлежности предложен метод, в котором для определения параметров ядра нечеткого множества предлагается использовать реальные данные, полученные от исследуемого объекта или процесса, а для определения носителя – теоретический диапазон возможных значений представляемого нечетким множеством параметра исследуемого объекта или процесса.

В качестве критерия, определяющего вид функции принадлежности нечеткого множества, предложено использовать соотношение его ядра и носителя.

Предложенные в статье граничные значения для критерия могут быть пересмотрены исследователем исходя из необходимости учета значений, входящих в множество измеренных реальных данных, или исходя из требования упрощения процедуры автоматизированной обработки. В дальнейших исследованиях планируется применение описанного метода для получения термов лингвистических переменных.

Библиографический список:

1. Левицкий С.И. Модели управления проектами в нестабильной экономической среде : монография / С. И. Левицкий, Ю. Г. Лысенко, А. В. Филиппов и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины, д-ра экон. наук, проф. Ю. Г. Лысенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Донецк : Юго-Восток, 2009. — 354 с.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. — 3-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 801 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 312 с. (Проблемы искусственного интеллекта).
4. Башвеев Ю.А., Сальников И.И. Функция принадлежности в системе поддержки принятия решения по выбору микроконтроллера // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. №3 (31). С. 89-100
5. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И.Орлов. М.: Издательство «Экзамен», 2005. 656 с.

6. E. Bas, U. Yoclu, E. Egrioglu, Cagdas Hakan Aladag A Fuzzy Time Series Forecasting Method Base on Operation of Union and Feed Forward Artificial Neuron Network // American Journal of Intelligent Systems. 2015. Vol. 5(3). pp. 81-91
7. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Пер. с англ. / Под ред. Р.Р. Ягера. — М.: Радио и связь, 1986. 408 с.
8. Chameau J.L., Santamarina J.C., Membership function I: Comparing methods of Measurement // International Journal of Approximate Reasoning. 1987. Vol. 1. pp.287-301
9. Орлов А.И. Экспертные оценки. // Журнал «Заводская лаборатория». 1996. Т.62. № 1. С.54-60.
10. Берестов В.Л. Статистика: Учебное пособие. / В.Л. Берестов, Е.П. Жиленкова, С.Г. Кузнецов — Брянск: Брян.гос.инж.-техн.акад., 2014. — 244 с.
11. Низковольтные электродвигатели промышленного назначения [Электронный ресурс] — URL: http://www.com-sol.ru/katalog/elektrodvigateli/abb/kat/nv_dvigateli_promishlennogo_naznacheniya.pdf (дата обращения: 27.09.2019).
12. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 2. / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 688 с.

References:

1. Levitskiy S.I. Modeli upravleniya proektami v nestabil'noy ekonomicheskoy srede : monografiya / S. I. Levitskiy, Yu. G. Lysenko, A. V. Filippov i dr.; pod red. chl.-kor. NAN Ukrainy, d-ra ekon. nauk, prof. Yu. G. Lysenko. — 2-e izd., pererab. i dop. — Donetsk : Yugo-Vostok, 2009. 354 s. [Levickii S.I. Project management models in an unstable economic environment: monograph / S.I. Levickii, Y.G. Lisenko, A.V. Filippov and others; under the editorship of Corresponding Member of NAS of Ukraine, Dr. Sci. Econ., Professor Y.G. Lisenko. 2nd edition, revised and enlarged. Donetsk : Southeast, 2009. 354 p. (in Russ)]
2. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie / A. Pegat; per. s angl. 3-e izd. — M. : BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015. — 801 s. [Piegat A. Fuzzy modeling and control / A. Piegat; translation from the English language. — 3rd edition — M.: Binom-press. Knowledge lab, 2015. 801 p. (in Russ)]
3. Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta/ Pod red. D. A. Pospelova. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 312 s. (Problemy iskusstvennogo intellekta). [Fuzzy sets in control and artificial intelligence models / Ed. D.A. Pospelova. M. : Science. Ch. ed. Phys.-Math. lit., 1986. 312 p. (Problems of artificial intelligence) (in Russ)]
4. Bashveev Yu.A., Sal'nikov I.I. Funktsiya prinalozhnosti v sisteme podderzhki prinyatiya resheniya po vyboru mikrokontrollera // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2016. №3 (31). S. 89-100 [Bashveev Y.A., Salnikov I.I. The membership functions of decision support system software choosing a microcontroller // XXI century: resumes of the past and challenges of the present plus. 2016. No. 3 (31). pp. 89-100 (in Russ)]
5. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy. Uchebnoe posobie / A.I.Orlov. M.: Izdatel'stvo «Ekzamen», 2005. 656 s. [Orlov A.I. Decision theory. Study guide / A.I. Orlov. M.: Publishing «Exam», 2005. 656 p. (in Russ)]
6. E. Bas, U. Yoclu, E. Egrioglu, Cagdas Hakan Aladag A Fuzzy Time Series Forecasting Method Base on Operation of Union and Feed Forward Artificial Neuron Network // American Journal of Intelligent Systems. — 2015. Vol. 5(3). pp. 81-91
7. Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostey. Poslednie dostizheniya / Per. s angl. / Pod red. R.R. Yagera. M.: Radio i svyaz', 1986. — 408 s. [Fuzzy set and possibility theory. Recent Development / Edited by R.R.Yager. M.: Radio and communication, 1986. 408 p. (in Russ)]
8. Chameau J.L., Santamarina J.C., Membership function I: Comparing methods of Measurement // International Journal of Approximate Reasoning. 1987. Vol. 1. pp.287-301
9. Orlov A.I. Ekspertnye otsenki. // Zhurnal «Zavodskaya laboratoriya». 1996. Т.62. № 1. С.54-60. [Orlov A.I. Theory of expert estimates in our country // Industrial Laboratory. 1996. Vol. 62. No. 1. pp. 54-60 (in Russ)]
10. Berestov V.L. Statistika: Uchebnoe posobie. / V.L. Berestov, E.P. Zhilenkova, S.G. Kuznetsov Bryansk: Bryan.gos.inzh.-tekh.n.akad., 2014. — 244 s. [Berestov V.L. Statistics: Study guide / V.L. Berestov, E.P. Zhilenkova, S.G. Kuznetsov — Bryansk: BSTAEA, 2014. — 244 p. (in Russ)]
11. Low-voltage electric motors for industrial use [Electronic resource] - Available at: http://www.com-sol.ru/katalog/elektrodvigateli/abb/kat/nv_dvigateli_promishlennogo_naznacheniya.pdf (accessed 27.09.2019) (in Russ)]
12. Spravochnik po elektricheskim mashinam. V 2 t. Т. 2. / Pod obshch. red. I.P. Kopylova, B.K. Klokova. — M.: Energoatomizdat, 1989. 688 s. [Handbook of electric machines. Vol. 2 of 2 / Edited by I.P. Kopilova, B.K. Klokova. M.: Energoatomizdat, 1989. 688 p. (in Russ)]

Сведения об авторах:

Бизянов Евгений Евгеньевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Специализированные компьютерные системы»; e-mail: bpееlсs@gmail.com

Гутник Артур Альбертович, аспирант кафедры «Специализированные компьютерные системы»; e-mail: hutnik.aa@gmail.com

Information about the authors:

Evgeny E. Bisyanov, Dr. Sci. (Economy), Cand. Sci. (Technical), Prof., Prof., Department of Specialized Computer Systems; e-mail: **bpeeecs@gmail.com**
Arthur A. Gutnik, Graduate Student Department of Specialized Computer Systems;
e-mail: **hutnik.aa@gmail.com**

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.08.2019.

Принята в печать 21.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.08.2019.

Accepted for publication 21.09.2019.

Для цитирования: Каднова А.М. Методический подход к оценке вероятностного показателя своевременности выполнения типовых операций администратором системы защиты информации автоматизированной системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-87-96

For citation: A.M. Kadnova. Methodical approach to evaluating the probabilistic time performance indicator of automated administrator operations in information protection systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3): 87-96. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-87-96

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-87-96

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТИПОВЫХ ОПЕРАЦИЙ АДМИНИСТРАТОРОМ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Каднова А.М.

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

Резюме. Цель. В настоящее время в соответствии с требованиями руководящих документов ФСТЭК России, а также международными стандартами при разработке и эксплуатации защищенных автоматизированных систем необходимо проводить оценку эффективности (общей полезности) систем защиты информации. Статья посвящена разработке способа оценки эргатотехнических характеристик программных систем защиты информации для использования оценки общей полезности систем защиты информации. Целью работы является разработка методики оценки вероятностного показателя своевременности выполнения типовых операций по администрированию систем защиты информации. **Метод.** Для реализации данной цели были созданы группы пользователей, выполняющие типовые операции администратора системы защиты информации. Время выполнения операции каждой группой фиксировалось инструментальным средством IOGraphV1.0.1 и использовалось при расчете вероятностей своевременного выполнения типовых операций администратором по формуле усеченного нормального распределения. **Результат.** Проведена оценка вероятностного показателя, позволяющего оценить своевременность выполнения операций администратором системы защиты информации. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы при комплексной оценке эффективности (надежности) функционирования программных систем защиты информации в автоматизированных системах с целью моделирования и анализа защищенности объектов информатизации специального назначения.

Ключевые слова: система защиты информации, несанкционированный доступ, защита информации, автоматизированная система, программная система, эргатотехнические характеристики

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
METHODICAL APPROACH TO EVALUATING THE PROBABILISTIC TIME
PERFORMANCE INDICATOR OF AUTOMATED ADMINISTRATOR OPERATIONS IN
INFORMATION PROTECTION SYSTEMS**

A.M. Kadnova

*Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,
53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia*

Abstract Objectives At present, in accordance with the requirements of the guiding documents of the Federal Service for Technical and Export Control (FSTEC) of Russia, as well as international standards in the development and operation of protected automated systems, it is necessary to evaluate the effectiveness (general utility) of information protection systems. The article is devoted to the development of a method for assessing the ergotechnical characteristics of software information security systems for use the assessment of the general utility of such systems. The aim of the work is to develop a methodology for assessing the probabilistic indicator of the timeliness of typical operations for the administration of information security systems. **Method** To achieve this goal, user groups were created in order to perform typical administrative operations within the information protection system. The operation time for each group, recorded using the IOGraphV1.0.1 tool, was utilised to calculate the probabilities of timely execution of typical operations by the administrator according to a truncated normal distribution formula. **Results** An assessment of a probabilistic indicator was carried out in order to evaluate the timeliness of operations performed by the administrator of the information protection system. **Conclusion** The results can be used in a comprehensive assessment of the effectiveness (reliability) of the automated functioning of information security software systems when modelling and analysing the security of special-purpose informatisation facilities.

Keywords: information protection system, unauthorised access, information protection, automated system, software system, ergotechnical characteristics

Введение. Анализ нормативных документов, посвященных защите информации, обрабатываемой автоматизированными системами (АС) [1–6] и качеству программных систем [7–12], показал, что на сегодняшний день отсутствуют показатели оценки эрготехнических характеристик систем защиты информации (СЗИ) в АС и методики их оценки.

В результате невозможности их оценки на этапе разработки СЗИ возникают следующие проблемы:

- 1) не полностью обеспечивается реализация целей и требований заказчиков к функционалу и потребительскому качеству СЗИ;
- 2) вследствие низкой достоверности первичной оценки бюджета, требования заказчика могут быть выполнены не в полной мере;
- 3) вследствие недостаточного контроля выполнения проекта, повышается риск отсутствия у конечного программного продукта требуемого качества;
- 4) отсутствие эрготехнических показателей затрудняет сравнение и оценку сертифицированных СЗИ при их выборе.

Постановка задачи. В связи с необходимостью решения вышеперечисленных проблем целью настоящей работы является разработка методики оценки вероятностного показателя своевременности выполнения типовых операций по администрированию системы защиты информации.

Методы исследования. В интересах исследования вероятностных показателей «удобства использования» СЗИ введем ряд упрощающих ограничений, существенно не оказывающих влияние на общность решения задачи:

1. Реализация угрозы безопасности информации (БИ) и проявление ошибки

администратора являются независимыми и редкими событиями; проявление двух и более одноименных событий в период времени работы системы защиты информации практически не возможно.

2. Способность парирования угрозы несанкционированного доступа и безошибочность работы являются независимыми свойствами администратора.

Вероятность нахождения АС в состоянии БИ определяется вероятностью реализации угрозы в течение времени работы системы и возникающими ущербами. Реализация угрозы БИ может привести к следующим четырем случаям в АС:

1. Угроза БИ обнаружена СЗИ. Автоматизированная система продолжает функционировать. При этом СЗИ (администратор безопасности) работает в режиме частичных ущербов БИ и комплекса мероприятий по реагированию на угрозы БИ.

2. Угроза БИ полностью устраняется системой защиты информации без каких-либо последствий. Работа АС продолжается.

3. Реализация угрозы БИ приводит к полному прекращению функционирования АС.

4. Работа АС продолжается в условиях не обнаруженной реализации угрозы БИ.

Проведем анализ протекающих процессов в системе «Угроза безопасности информации — система защиты информации — администратор безопасности».

В первом случае реализация угрозы БИ приводит к нарушению состояния БИ автоматизированной системы. Администратору безопасности удастся локализовать проблему и продолжить работу системы в условиях частичных ущербов БИ, возникающих при реализации угрозы.

Работа АС продолжается в режиме частичного нарушения уровня информационной безопасности. При этом администратор безопасности работает в особом режиме с перегрузкой и может своевременно компенсировать ущербы с вероятностью P_k .

Таким образом, безопасное состояние АС в первом случае будет полностью характеризоваться не только вероятностью реализации угроз БИ, но и вероятностными характеристиками администратора по своевременной локализации угрозы БИ и организации дальнейшей работы АС в условиях возникающих ущербов БИ, не приводящих к полному прекращению работы.

Для оценки показателей информационной безопасности в первом случае необходима оценка своевременности выполнения работы администратором.

Во втором случае реализация угрозы БИ приводит к необходимости остановки АС на время, необходимое для реализации мероприятий по реагированию на угрозы БИ. Если время остановки АС меньше, чем τ_{on} , определяемое условиями функционирования АС, то можно считать, что состояние безопасности АС не нарушено.

Поэтому в качестве показателя «удобства использования» администратором необходимо выбрать вероятностный показатель восстановления безопасного состояния после реализации угрозы БИ. При этом случайное время восстановления должно удовлетворять условию:

$$\tau_s \leq \tau_{on}$$

где τ_s — случайное время восстановления безопасного состояния администратором безопасности.

В третьем случае, реализация угрозы БИ недопустима, т.к. ее реализация приводит к полному прекращению функционирования АС. В этом случае показатель «удобства использования» целесообразен только для настройки системы защиты информации и не является ни вероятностным, ни временным.

В четвертом случае отсутствует возможность парирования угрозы БИ и, соответственно, целесообразность оценки эргатотехнических показателей системы защиты информации для администратора.

Таким образом, анализ системы «Администратор и СЗИ» с учетом требований высоких значений уровня БИ при реализации угроз различного вида показал, что основной проблемой

взаимодействия администратора с СЗИ является своевременность выполнения работ при выполнении типовых операций, определяемая средним временем их выполнения.

Случайная величина времени выполнения формализуется функцией распределения вида:

$$q(b) = P\{B < b\} \quad (1)$$

где t – заданное время выполнения типовой операции.

Своевременность выполнения типовой операции для операторов с различным уровнем подготовки, состояния здоровья и в разных условиях работы целесообразно формализовать усеченным нормальным распределением вида [13]:

$$\overline{f(b)} = cf(b) = \frac{c}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(b - m_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (2)$$

где m_b – среднее значение времени выполнения типовой операции;

σ_b – среднеквадратичное отклонение времени выполнения типовой операции;

c – нормирующий множитель усеченного распределения;

b – параметр усеченного распределения, определяемый экспериментально, в соответствии с [13].

Нормирующий множитель, усеченного распределения (2) рассчитывается из условия:

$$c = \int_{b_1}^{b_2} f(b)db = 1$$

где b_1 и b_2 – нижнее и верхнее ограничения времени выполнения типовой операции.

Определение значений m_b и σ_b осуществлялось по результатам эксперимента, описанного далее.

Обсуждение результатов. Для проведения эксперимента привлекались студенты в количестве 80 человек, которые были поделены на группы в зависимости от уровня пользования системой защиты информации (опытные, среднего уровня и начального уровня).

На рис. 1 приведена структурная схема лабораторной установки, представленной в виде средств вычислительной техники, с установленным на них программным обеспечением Страж NT 3.0 с заводскими номерами, а также приложением IOGraph V1.0.1, реализующим метод *mouse-tracking*, и используемой при проведении эксперимента.

Mouse-tracking (отслеживание курсора) инструмент, позволяющий отслеживать движение мыши администратором безопасности и сделанные им клики. Использование этого инструмента позволяет построить последовательность передвижения курсора по интерфейсу и карту кликов, показывающую по каким элементам интерфейса системы защиты информации чаще «кликались».

Также программа IOGraph V1.0.1, реализующая технологию отслеживания мыши, позволяет экспериментально определить операционные характеристики программы, такие как время выполнения всей операции и время задержки курсора на элементе интерфейса программы.



Рис. 1. Структурная схема программного обеспечения, используемого для проведения расчетов по оценке «удобства использования» СЗИ «Страж NT 3.0»

Fig. 1. The structural diagram of the software used for calculations to assess the "Usability" SZI "Sentinel NT 3.0"

Студенты выполняли типовые операции администратора СЗИ в соответствии с [14,15], представленные в табл. 1.

Таблица 1. Типовые операции администратора системы защиты информации
Table 1. Typical operations of information security system administrator

№ п.п.	Наименование типовой операции выполняемой администратором Name of the typical operation performed by the administrator
1	создание, удаление и переименование пользователей create, delete and rename users
2	смена пароля пользователя change user password
3	просмотр и редактирование свойств пользователя viewing and editing user properties
4	редактирование разрешений edit permissions
5	редактирование параметров системного аудита editing system audit settings
6	открытие и сохранение журнала событий opening and saving the event log
7	работа с фильтром событий work with an event filter
8	тестирование системы защиты security testing

В качестве примера рассмотрим действия студента, выполняющего типовую операцию администратора СЗИ «Создание, удаление и переименование пользователей».

Для создания пользователя администратор выбирает пункт меню «Компьютер», далее «Новый пользователь» или пункт меню «Домен», далее «Новый пользователь» либо вызывает контекстное меню нажатием правой кнопки мыши в пустой области списка пользователей и выбирает пункт «Новый пользователь...».

После этого на экране появляется диалог, в котором администратор вводит имя пользователя, полное имя, описание, а также его пароль и допуск. Для создания пользователя администратор нажимает кнопку «Создать». Если администратору необходимо создать пользователя в домене, то в таком случае существует возможность размещения его учетной записи в контейнере Active Directory, отличном от контейнера «по умолчанию». Для этого в

вышеуказанном диалоге администратор нажимает кнопку «Выбрать...» и в появившемся окне выбирает необходимый контейнер AD. При установке администратором флажка «Создать профиль пользователя на этом компьютере» после удачного создания пользователя на данном компьютере формируется его локальный профиль.

Для удаления пользователя администратор выбирает его в списке пользователей и выбирает пункт меню «Пользователь», далее «Удалить» либо выбирает пункт «Удалить» вызванного нажатием правой кнопки мыши контекстного меню. Для переименования пользователя администратор выбирает его в списке пользователей и выбирает пункт меню «Пользователь», далее «Переименовать» либо выбирает пункт «Переименовать» вызванного нажатием правой кнопки мыши контекстного меню. После этого администратор вводит новое имя пользователя и нажимает клавишу «Enter».

В процессе выполнения каждой операции, в частности, расписанной выше, инструментальное средство IOGraph V1.0.1, реализующее метод mouse-tracking, записывало траекторию движения курсора каждого администратора и время выполнения им операции. Затем для каждой группы администраторов подсчитывались значения среднего времени выполнения каждой из перечисленных операций. Данные значения использовались для расчета вероятностей своевременного выполнения типовых операций администраторами в соответствии с (2). Результаты представлены в табл.2.

Таблица 2. Результаты оценки вероятностного показателя типовой операции, выполняемой администратором системы защиты информации
Table 2. The results of the assessment of the probability indicator of a typical operation performed by the administrator of the Information Security System

№ п.п.	Наименование типовой операции выполняемой администратором СЗИ «Страж NT 3.0» The name of the typical operation performed by the administrator of the SZI "Guard NT 3.0"	Значение требуемого времени выполнения типовой операции администратором СЗИ «Страж NT 3.0», с. The value of the required execution time of a typical operation by the administrator of the security system "Sentinel NT 3.0", c.	Вероятность выполнения типовой операции администратором СЗИ «Страж NT 3.0» The likelihood of a typical operation being performed by the administrator of the security system "Guard NT 3.0"		
			группа «пользователи начального уровня» user group "entry-level users"	группа «пользователи среднего уровня» user group "mid-level users"	группа «опытные пользователи» user group "advanced users"
1	Создание, удаление и переименование пользователей Create, delete and rename users	40	–	0,0227	0,0227
		50	–	0,1586	0,1586
		60	–	0,4999	0,4999
		70	0,0013	0,8412	0,8412
		80	0,0227	0,9771	0,9771
		90	0,1586	0,9986	0,9986
		100	0,4999	–	–
		110	0,8412	–	–
		120	0,9771	–	–
		130	0,9986	–	–
2	Смена пароля пользователя Change user password	40	–	0,0061	0,0227
		60	0,0227	0,3084	0,4999
		80	0,4999	0,9331	0,9771
		100	0,9998	0,9998	0,9995

3	Просмотр и редактирование свойств пользователя View and edit user properties	40	0,0061	0,0227	0,1586
		60	0,3084	0,4999	0,8412
		80	0,9331	0,9771	0,9986
		100	0,9998	0,9995	–
4	Редактирование разрешений Editing Permissions	80	–		0,0013
		100	–	0,0227	0,1586
		120	–	0,4999	0,8412
		140	–	0,9771	0,9986
		160	–	0,9999	–
		180	0,0227	–	–
		200	0,4999	–	–
		220	0,9771	–	–
		240	0,9999	–	–
5	Редактирование параметров системного аудита Editing system audit settings	30	0,0013	0,1586	0,3083
		40	0,0013	0,4999	0,6913
		60	0,1586	0,9771	0,9936
		80	0,8412	0,9999	–
		100	0,9986	–	–
6	Открытие и сохранение журнала событий Opening and saving the event log	30	0,0677	0,3083	0,4999
		40	0,3084	0,6913	0,8399
		50	0,6914	0,9330	0,9758
		60	0,9331	0,9936	0,9973
7	Работа с фильтром событий Working with an event filter	270	–	0,0013	0,0013
		290	–	0,1586	0,1586
		310	0,0002	0,8412	0,8412
		330	0,0227	0,9986	0,9986
		350	0,4999	0,9999	0,9999
		370	0,0771	–	–
8	Тестирование системы защиты Security Testing	40	0,0001	0,1586	0,1586
		50	0,0061	0,4999	0,4999
		60	0,0667	0,8412	0,8412
		70	0,3084	0,9771	0,9771
		80	0,6914	–	–
		90	0,9331	–	–

Вывод. Использование СЗИ для обеспечения защиты информации, обрабатываемой АС, требует детального анализа их эргатотехнических характеристик. Основным показателем, характеризующим эргатотехнические характеристики СЗИ, является своевременность выполнения типовой операции администратором безопасности.

В статье на основе экспериментально измеренных средних значений времени выполнения типовых операций администраторами, составляющими репрезентативные группы, оценены вероятностные характеристики своевременности выполнения типовых операций.

Полученные значения вероятностей выполнения типовых операций могут в дальнейшем использоваться при сравнительном анализе «удобства использования» СЗИ различных классов, разработке планов работы служб по организации информационной безопасности и обоснованию требований к организации и составу служб обеспечения информационной безопасности.

Библиографический список:

1. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ (в ред. от 19.12.2016) // СПС «Консультант Плюс».
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]. – URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>.
3. 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-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>.
4. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. – Москва : Воениздат, 1992.
5. Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: постановление Правительства РФ от 01.11.2012 N 1119 // СПС «КонсультантПлюс».
6. Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных : приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 // СПС «КонсультантПлюс».
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 2 : Функциональные компоненты безопасности. – Введ. 2013-11-08. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf>.
8. ISO/IEC 17000:2004. Оценка соответствия. Словарь и общие принципы. – Введ. 2001-11-01. – [Электронный ресурс]. – URL: https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf.
9. ГОСТ 28806-89. Качество программных средств. Термины и определения. – Введ. 1990-12-25. – [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf.
10. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения. – Введ. 1989-07-28. – Москва : Госстандарт СССР. 1990 г. – 15 с.
11. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. – Введ. 1993-12-28. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93>.
12. Каднова А.М. Система показателей качества функционирования при создании системы информационной безопасности на объекте информатизации ОВД / А.М. Каднова, О.И. Бокова, Е.А. Рогозин, А.С. Серпилин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – №1. – С. 32–39.
13. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем // Г.В. Дружинин. – Москва : Энергия, 1977. – 536 с.
14. Система защиты информации «Страж NT 3.0». Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL: https://www.guardnt.ru/doc/gnt_30_admin_guide.pdf
15. Каднова А.М. Имитационная модель функционирования системы защиты информации от несанкционированного доступа «Страж NT» в программной среде «CPN Tools» с целью исследования ее временных характеристик / А.М. Каднова, Е.А. Рогозин, Ю.С. Лунёв, А.Д. Попов // Охрана, безопасность, связь – 2018 : материалы международной научно-практической конференции. – Т 3. – № 4(4). – Воронеж : ВИ МВД России, –2019. – С. 78–81

References:

1. Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii: federal'nyy zakon ot 27.07.2006 № 149-FZ (v red. ot 19.12.2016) // SPS «Konsul'tant Plyus». [On information, information technology and information protection: Federal Law of July 27, 2006 No. 149-FZ (as amended on December 19, 2016) // ATP "Consultant Plus". (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]. – URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. [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]. – URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. (In Russ)]
3. [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-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>. (In Russ)]
4. FSTEC 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-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>. [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information protection requirements. – Moscow: Military Publishing House, 1992. (In Russ)]
5. Ob utverzhdenii trebovaniy k zashchite personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh : postanovleniye Pravitel'stva RF ot 01.11.2012 N 1119 // SPS «Konsul'tantPlyus». [On approval of requirements for the protection of personal data during their processing in personal data information systems: Decree of the Government of the Russian Federation of 01.11.2012 N 1119 // ATP "Consultant Plus". (In Russ)]
6. Ob utverzhdenii sostava i soderzhaniya organizatsionnykh i tekhnicheskikh mer po obespecheniyu bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh : prikaz FSTEC Rossii ot 18.02.2013 № 21 // SPS «Konsul'tantPlyus». [On approval of the composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data when they are processed in personal data information systems: Order of the FSTEC of Russia dated February 18, 2013 No. 21 // ATP "Consultant Plus".(In Russ)]
7. GOST R ISO/MEK 15408-2-2013. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. CH. 2 : Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti. – Vved. 2013-11-08. – [Elektronnyy resurs]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf>. [GOST R ISO / IEC 15408-2-2013. Information technology. Security methods and tools. Criteria for assessing the security of information technology. Part 2: Functional safety components. – Enter. 2013-11-08. – [Electronic resource]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf>. (In Russ)]
8. ISO/IEC 17000:2004. Otsenka sootvetstviya. Slovar' i obshchiye printsipy. – Vved. 2001-11-01. – [Elektronnyy resurs]. – URL: https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf. [ISO / IEC 17000: 2004. Conformity assessment. Vocabulary and general principles. – Enter. 2001-11-01. – [Electronic resource]. – URL: https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf. (In Russ)]
9. GOST 28806-89. Kachestvo programmnykh sredstv. Terminy i opredeleniya. – Vved. 1990-12-25. – [Elektronnyy resurs]. – URL: http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf. [GOST 28806-89. The quality of software. Terms and Definitions. – Enter. 1990-12-25. – [Electronic resource]. – URL: http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf. (In Russ)]
10. GOST 28195-89. Otsenka kachestva programmnykh sredstv. Obshchiye polozheniya. – Vved. 1989-07-28. – Moskva : Gosstandart SSSR. 1990 g. – 15 s. [GOST 28195-89. Software quality assessment. General Provisions – Enter. 1989-07-28. – Moscow: Gosstandart of the USSR. 1990. 15 p. (In Russ)]
11. GOST R ISO/MEK 9126-93. Informatsionnaya tekhnologiya. Otsenka programmnoy produktsii. Kharakteristiki kachestva i rukovodstva po ikh primeneniyu. – Vved. 1993-12-28. – [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93>. [GOST R ISO / IEC 9126-93. Information technology. Evaluation of software products. Quality characteristics and guidelines for their use. – Enter. 1993-12-28. [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93>. (In Russ)]
12. Kadnova A.M. Sistema pokazateley kachestva funktsionirovaniya pri sozdanii sistemy informatsionnoy bezopasnosti na ob'yekte informatizatsii OVD / A.M. Kadnova, O.I. Bokova, Ye.A. Rogozin, A.S. Serpilin // Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. – 2019. – №1. – S. 32–39. [Kadnova A.M. The system of indicators of the quality of functioning when creating an information security system at the ATS informatization

facility / A. Kadnova, O.I. Bokova, E.A. Rogozin, A.S. Serpilin // Devices and Systems. Management, control, diagnostics. 2019. No. 1. pp. 32–39. (In Russ)]

13. Druzhinin G.V. Nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem // G.V. Druzhinin. – Moskva : Energiya, 1977. – 536 s. [Druzhinin G.V. Reliability of automated systems // G.V. Druzhinin. Moscow: Energy, 1977. 536 p.

14. Sistema zashchity informatsii «Strazh NT 3.0». Rukovodstvo administratora [Elektronnyy resurs]. – URL: https://www.guardnt.ru/doc/gnt_30_admin_guide.pdf [The information security system "Guard NT 3.0". Administrator Guide [Electronic resource]. URL: https://www.guardnt.ru/doc/gnt_30_admin_guide.pdf (In Russ)]

15. Kadnova A.M. Imitatsionnaya model' funktsionirovaniya sistemy zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa «Strazh NT» v programmnoy srede «CPN Tools» s tsel'yu issledovaniya yeye vremennykh kharakteristik / A.M. Kadnova, Ye.A. Rogozin, YU.S. Lunov, A.D. Popov // Okhrana, bezopasnost', svyaz' – 2018 : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T 3. № 4(4). Voronezh : VI MVD Rossii, 2019. S. 78–81. [Kadnova A.M. A simulation model of the operation of the information protection system against unauthorized access "Guard NT" in the Software environment "CPN Tools" in order to study its temporal characteristics / A.M. Kadnova, E.A. Rogozin, Yu.S. Lunev, A.D. Popov // Protection, Security, Communication. 2018: materials of the international scientific and practical conference. Vol 3. No. 4 (4). Voronezh: VI Ministry of Internal Affairs of Russia, 2019. pp. 78–81 (In Russ)]

Сведения об авторе:

Каднова Айжана Михайловна, адъюнкт, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; e-mail: aizhana_kadnova@mail.ru

Information about the author:

Ayzhana M. Kadnova, Adjunct, Department of automated information systems of law enforcement bodies; e-mail: aizhana_kadnova@mail.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.06.2019.

Принята в печать 19.08.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 15. 06. 2019.

Accepted for publication 19.08.2019.

Для цитирования: Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С., Айгунов Т.Г. Математическая модель смесителя с формированием противофазного сигнала гетеродина. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 97-107 DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

For citation: Z.N. Mirzaev, M.S. Guseynov, T.G. Aigunov. Mathematical mixer model with formation of heterodyne anti-phase signal. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 97-107. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК.658.531.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИТЕЛЯ С ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОТИВОФАЗНОГО СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА

Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С., Айгунов Т.Г.

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

Резюме. Цель. В статье рассматривается процесс расчета и проектирования смесителя с диплексором с формированием противофазного сигнала гетеродина целевым резонатором. **Метод.** Для расчета и оптимизации характеристик и конструктивно-топологических параметров смесителей использовались результаты проектирования полосового фильтра (ПФ) и фильтра нижних частот (ФНЧ) смесителей проходного типа. Расчет характеристик смесителя и его конструктивных элементов проведен с помощью пакета программ автоматизированного расчета СВЧ устройств «Serenade». Особенностью проектирования смесителей данной конструкции (с диплексором) является необходимость оптимизации топологии диплексера прежде, чем оптимизировать характеристики смесителя. **Результат.** Характеристики нелинейных искажений показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать -15 – -20 дБм для ослабления интермодуляционных искажений 3-го порядка не менее 50 дБс. Относительно малый уровень компрессии и подавления гармонических и интермодуляционных искажений связан с минимизацией при расчёте характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ($P_z \sim 5 - 7$ дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов. Заметного улучшения характеристик смесителей по нелинейным искажениям можно достичь за счёт смещения рабочей точки на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением P_z на несколько дБ (до $P_z = 10$ дБм). **Вывод.** Практически режим с повышенным уровнем подавления нелинейных искажений может быть реализован за счёт включения диодов через резистивно-емкостные цепи (автосмещение) или использование диодов с повышенным потенциальным барьером. Расчёт показывает, что возможна реализация достаточно малых потерь преобразования 6,6 – 8,0 дБ при невысоких уровнях $P_z \sim 5 - 7$ дБм.

Ключевые слова: смеситель, гетеродин, диплексор, микрополосковый

MATHEMATICAL MIXER MODEL WITH FORMATION OF HETERODYNE ANTIPHASE SIGNAL

Z.N.Mirzaev, M.S.Guseynov, T.G.Aigumov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives To carry out calculations involved in the design of a microwave mixer with a diplexer with the formation of the antiphase heterodyne signal using a slot resonator. **Method** In order to calculate and optimise the characteristics, design and topological parameters of microwave mixers, the results of the design bandpass filter PF and low-pass filter (LPF) mixers of through-feed type were used. The characteristics of mixers and their structural elements were calculated using the Serenade software package intended for the automated calculation of microwave devices. A distinct feature of designing mixers (with a diplexer) involves the need to optimise the topology of the diplexer before optimising the mixer characteristics. **Results** The characteristics of nonlinear distortions show that the maximum power level at the mixer inlet should not exceed $-15 - -20$ dBm. In order to attenuate the intermodulation distortions of the 3rd order, this level should be higher than 50 dBs. The relatively low level of compression and suppression of harmonic and intermodulation distortions associated with the minimisation of the heterodyne power level at the calculation of characteristics of mixers of the required heterodyne power level ($R_h \sim 5-7$ dBm) is due to the minimum expenses at the realisation of sources of heterodyne signals. A noticeable improvement in the characteristics of mixers by nonlinear distortions can be achieved by shifting the operating point at the points on the current-voltage characteristic (VAC) diodes by an external voltage source with a simultaneous increase in P_h by several dB (up to $P_h = 10$ dBm). **Conclusion** A mode of increased nonlinear distortion suppression can be practically realised by switching on diodes through resistive-capacitive circuits (auto-shift) or using diodes with an increased potential barrier. The calculation shows that it is possible to realise sufficiently small conversion losses of 6.6-8.0 dB at low levels of $R_h \sim 5-7$ dBm.

Keywords: mixer, heterodyne, diplexer, microstrip

Введение. С целью уменьшения потерь преобразования в смесителях, снижения требуемого уровня мощности гетеродина, уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) предложено проектировать балансные смесители на бескорпусных диодах с барьером Шоттки (ДБШ) или диодных сборках как единый сверх высокочастотный (СВЧ) узел совместно с входными и выходными фильтрами [1-6, 11-14].

Постановка задачи. Алгоритм проектирования состоит в следующем:

1. Выбор общей конструкции смесителя.
2. Выбор структуры и расчет конструктивно-технологических параметров фильтров исходя из требуемых характеристик.
3. Оптимизация конструктивных элементов смесителя для достижения заданных параметров.

Конструкция балансного смесителя с диплексером в тракте входного сигнала показана на рис. 1. Входной СВЧ сигнал подается синфазно на диоды балансного смесителя через полосовой многозвенный фильтр.

Сигнал гетеродина через волноводно-щелевой переход возбуждает короткозамкнутую щелевую линию. К ее точкам, удаленным от короткозамкнутого конца на $\lambda_r/4$, подключены диоды. Входной полосовой фильтр (ПФ) и выходной ФНЧ образуют диплексер для развязки каналов смесителя.

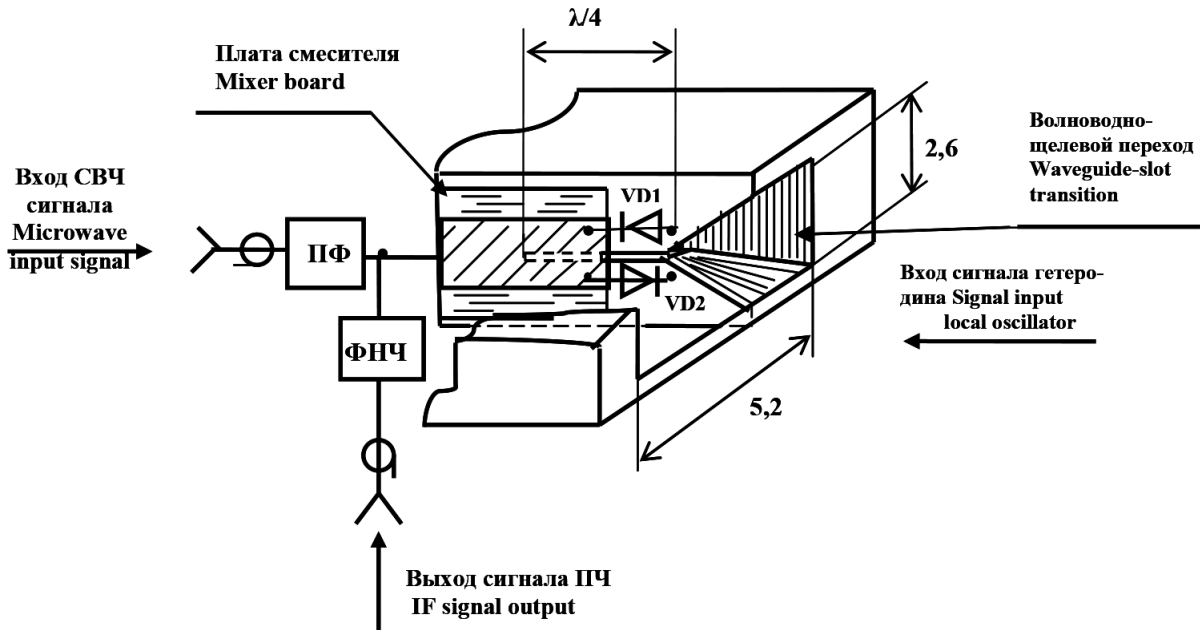


Рис. 1. Разрез конструкции смесителя с диплексером
 Fig. 1. Section of the design of the mixer with a diplexer

Методы исследования. Для расчета и оптимизации характеристик и конструктивно-топологических параметров смесителей использовались результаты проектирования ПФ и ФНЧ смесителей проходного типа [7-10]. Особенностью проектирования смесителей данной конструкции (с диплексером) является необходимость оптимизации топологии диплексера прежде, чем оптимизировать характеристики смесителя. На рис. 2 представлена топология диплексера для смесителя 18-26 ГГц.

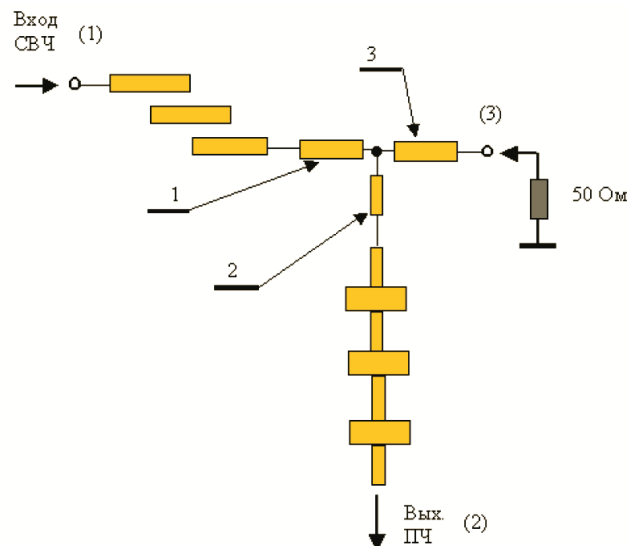


Рис. 2 Топология диплексера для смесителя 18-26 ГГц
 Fig. 2 Diplexer topology for the 18-26 GHz mixer

Оптимизация диплексера заключается в отыскании оптимальных параметров длины и ширины) отрезков МПЛ «1» и «2» для обеспечения следующих характеристик шестиполюсника:

- $|S_{31}| \lesssim 1$ дБ в диапазоне частот входного сигнала;
- $|S_{23}| \lesssim 1$ дБ в диапазоне ПЧ;
- $|S_{21}| > 40$ дБ в диапазонах входного сигнала и ПЧ;
- $|S_{13}|, |S_{23}| > 50$ дБ на частоте гетеродина.

После получения требуемых характеристик диплексера оптимизируется полная схема смесителя (рис. 3).

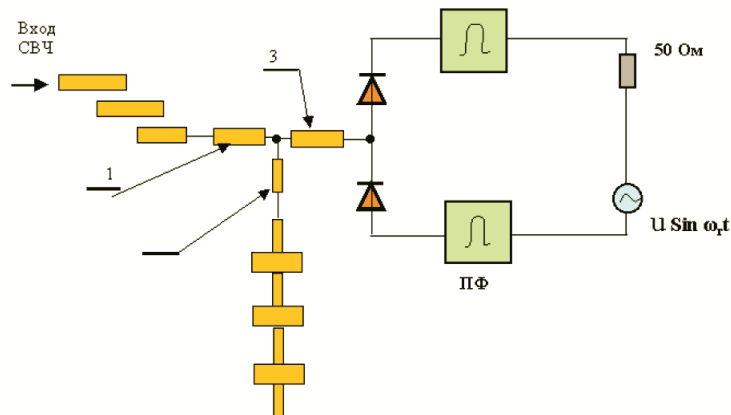


Рис. 3 Схема смесителя с диплексером
 Fig. 3 Mixe circuit with diplexer

В процессе оптимизации варьируются параметры отрезков МПЛ «1», «2» и «3», а также параметры (длина и ширина) ближайших к точке подключения диодов элементов входного ПФ и выходного ФНЧ, для обеспечения минимальных потерь преобразования смесителя в рабочем диапазоне частот при минимальном (≈ 10 дБм) уровне мощности гетеродина и с учетом обеспечения требуемых нелинейных и комбинационных искажений, требуемого ослабления по зеркальному и побочным каналам приема и высокой степени изоляции каналов смесителя [16-18].

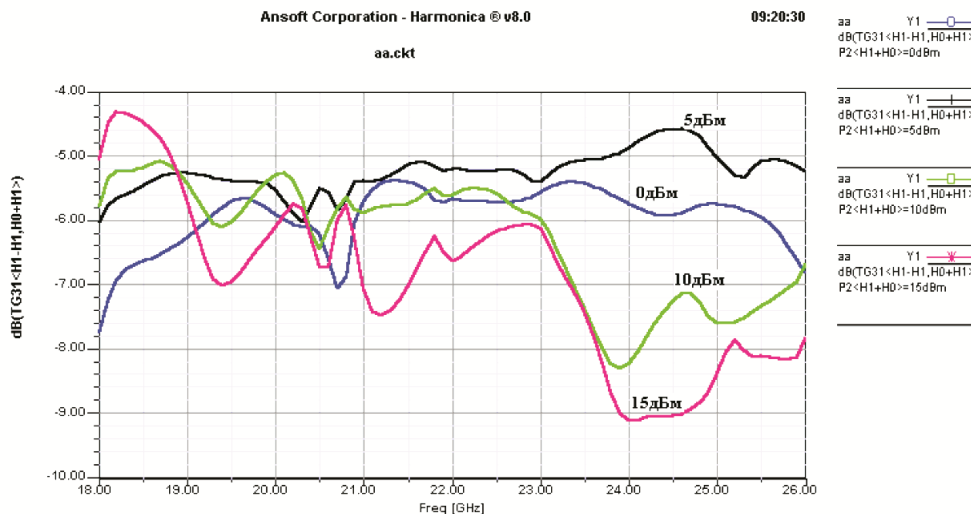


Рис. 4. Потери преобразования при различных P_1 .
 Fig. 4 Losses of conversion at different reg

Обсуждение результатов. На рис.4 приведены результаты расчета величины потерь преобразования от частоты при различных мощностях гетеродина ($P_1 = 0$ дБм, 5дБм, 10дБм, 15дБм). Как следует из них, потери преобразования составляют: при $P_1 = 0$ дБм 5,4- 8 дБ; при $P_1 = 5$ дБм 5,5- 7 дБ; при $P_1 = 10$ дБм 5- 8,5 дБ; при $P_1 = 15$ дБм 4,4- 9,2 дБ;

Таким образом, минимальные и равномерные потери преобразования реализованы при мощности $P_1 = 5$ дБм и составляют не более 7дБ. Неравномерность потерь преобразования при $P_1 = 5$ дБм не превышает ~ 3 дБ во всем диапазоне частот (18-26 ГГц).

Уменьшение неравномерности потерь в диапазонах СВЧ и ПЧ сигналов было достигнуто за счет улучшения согласования по СВЧ входу [16]. Полученные значения потерь преобразования показывают, что разработанные устройства в диапазоне до 26 ГГц не уступают лучшим за-

рубежным образцам. На рис. 5, приведены результаты расчета, характеризующие степень подавления паразитного прохождения входного СВЧ сигнала на выходе ПЧ и сигнала ПЧ на входе (при $P_r=5\text{дБм}$).

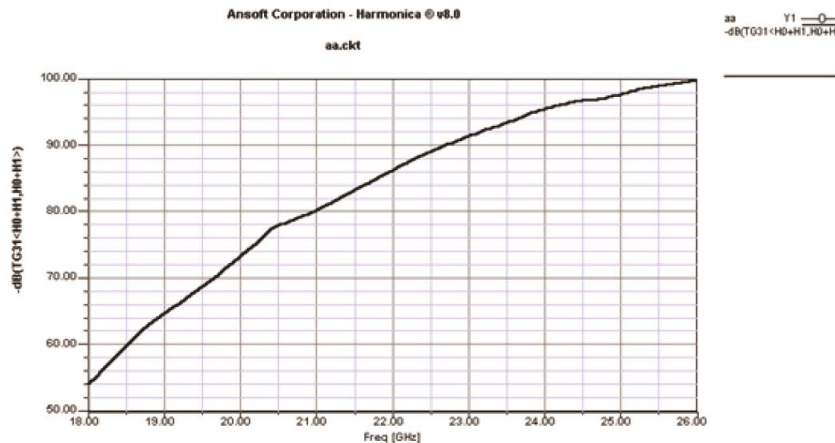


Рис. 5. Уровень ослабления входного СВЧ сигнала на выходе ПЧ (при $P_r = 5\text{ дБм}$)
Fig. 5. The attenuation level of the input microwave signal at the inverter output (at $R_g = 5\text{ dBm}$)

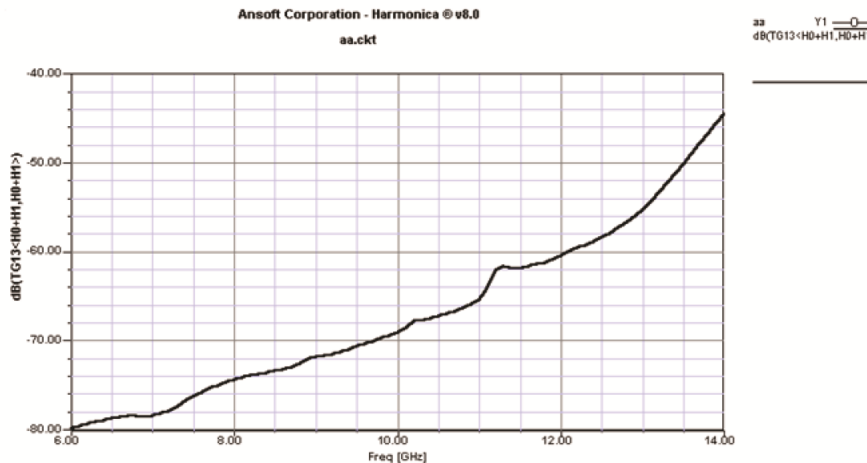


Рис. 6. Уровень ослабления сигнала ПЧ на СВЧ входе (при $P_r = 5\text{ дБм}$)
Fig. 6. The attenuation level of the IF signal at the microwave input (at $R_g = 5\text{ dBm}$)

Уровень ослабления входного СВЧ сигнала во всем диапазоне частот входного сигнала (18-26 ГГц) составляет -55- -100дБ. Уровень ослабления сигнала ПЧ на СВЧ входе в диапазоне частот сигнала ПЧ (6-14ГГц) составляет -45- -90дБ.

Такие значения уровня ослабления сигнала, приложенного к какому либо входу, на другие выводы, связаны с тем, что диоды препятствуют прохождению СВЧ сигнала из одного работающего канала в другой за счет собственного потенциального барьера, поскольку диоды, работающие при нулевом смещении в работающих каналах открываются на короткий промежуток времени сформированным импульсом, а в отсутствие импульса СВЧ сигнала, в виду его малой амплитуды, не в состоянии открыть диод. По полученному значению ослабления можно сказать, что смеситель является балансным [5-8]. На рис.7, приведены результаты расчета уровня подавления интермодуляционных составляющих 3-го порядка (при $P_r = 5\text{дБм}$, $P_{c1,c2} = -10\text{дБм}$) и зависимость IP3 от частоты.

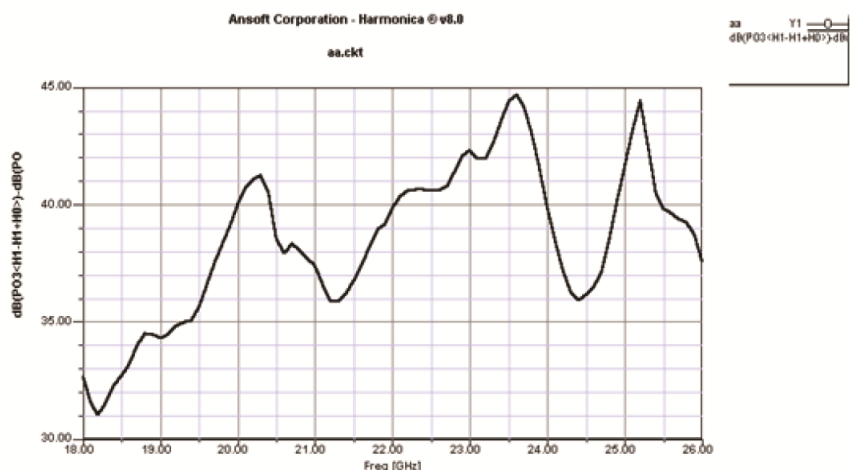


Рис.7. Уровень подавления интермодуляционных составляющих 3-го порядка (при $P_r = 5$ дБм, $P_{c1, c2} = -10$ дБм)

Fig. 7. Level of suppression of intermodulation components of the 3rd order (at $P_r = 5$ dBm, $P_{c1, c2} = -10$ dBm)

Уровень подавления IP3 составляет 33-45дБ, при этом мощность интермодуляционных составляющих IP3 изменяется в пределах 5,5-12,5дБм. Величина IP3 определяется при номинальном уровне $P_r = 5$ дБм (рис. 8).

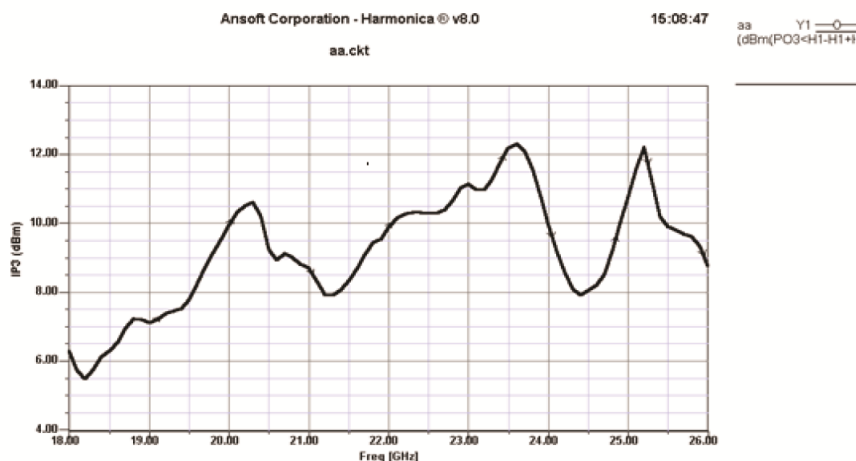


Рис. 8. Зависимость IP_3

Fig. 8. Dependence IP_3

Уровень составляющих третьего порядка равен уровню основного выходного сигнала прямого преобразования. Верхний предел динамического диапазона смесителя определяется уровнем интермодуляционных составляющих.

Характеристики показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать -15- -20дБм для ослабления интермодуляционных искажений третьего порядка не менее 50дБс.

На рис. 9, приведены результаты расчета уровня ослабления зеркального и суммарного каналов. Здесь видно, что уровень ослабления зеркального канала $f_{зк} = 2f_r - f_c$, где $f_{пч} = f_{зк} - f_r$ составляет 75-100дБ в диапазоне 38-41ГГц, 30-40дБ в диапазоне 42-43 ГГц и 70-180дБ в диапазоне 44-46ГГц.

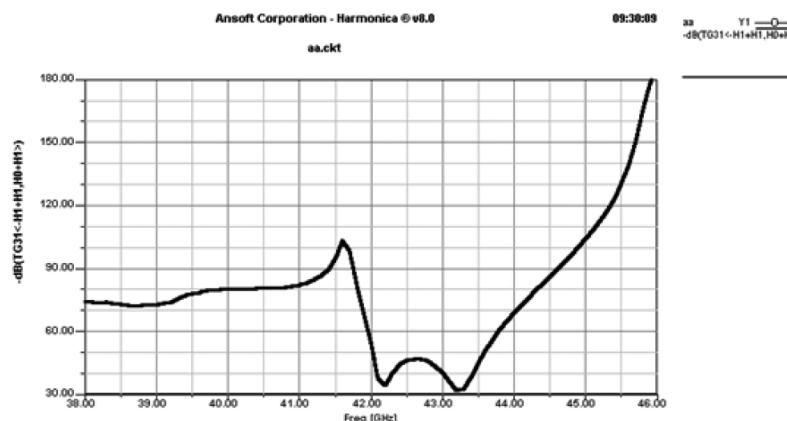


Рис. 9. Относительный уровень ослабления зеркального канала $f_{\Sigma k} = 2f_r - f_c$, где $f_{пч} = f_{\Sigma k} - f_r$
Fig. 9. The relative level of attenuation of the mirror channel $f_{zk} = 2f_g - f_s$, where $f_{pch} = f_{zk} - f_g$

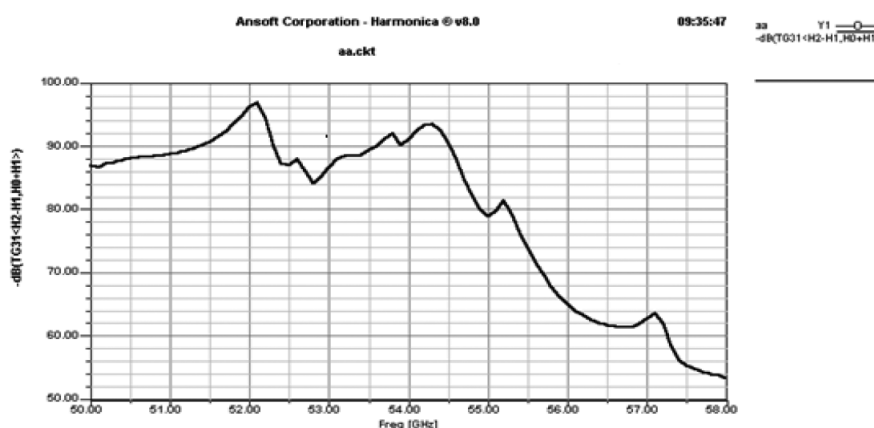


Рис. 10. Уровень ослабления суммарного канала $f_{\Sigma k} = f_r + f_c$, где $f_{пч} = 2f_r - f_{\Sigma k}$
Fig. 10. The attenuation level of the total channel $f_{\Sigma k} = f_g + f_s$, where $f_{pch} = 2f_g - f_{\Sigma k}$

Уровень ослабления суммарного канала $f_{\Sigma k} = f_r + f_c$, где $f_{пч} = f_r - f_{\Sigma k}$ составляет 65-95 дБ в диапазоне 50-56 ГГц и 55-65 дБ в диапазоне 56-58 ГГц. Недостаточное ослабление зеркального канала 30-40 дБ наблюдается на тех участках диапазона частот, где входные МШУ внесут дополнительные потери не менее 30 дБ (рис. 10).

На рис. 11 показаны результаты расчета коэффициента преобразования и коэффициента отражения в диапазоне частот 18-26 ГГц.

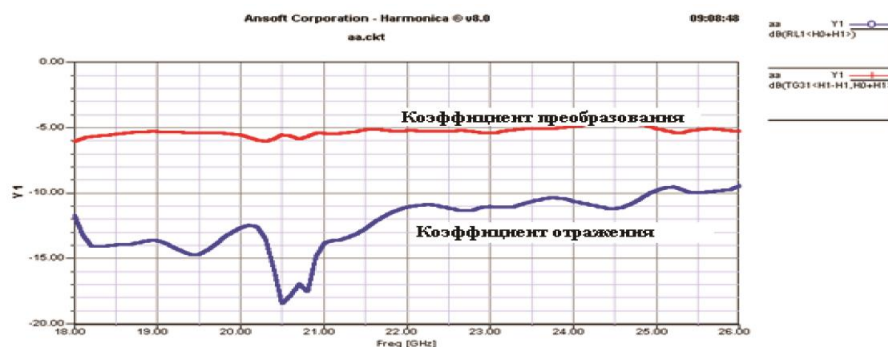


Рис. 11. Коэффициент преобразования и коэффициент отражения в диапазоне частот 18-26 ГГц
Fig. 11. The conversion coefficient and reflection coefficient in the frequency range 18-26 GHz

Результаты показывают, что неравномерность коэффициента преобразования $K_p = 10 \lg P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ в диапазоне частот 18-26 ГГц не превышает ± 1 дБ. Коэффициент преобразования смесителя прямо пропорционален его коэффициенту передачи. На рис. 12 и показаны результаты расчета уровня компрессии (1дБ) при $P_r = 5$ дБм.

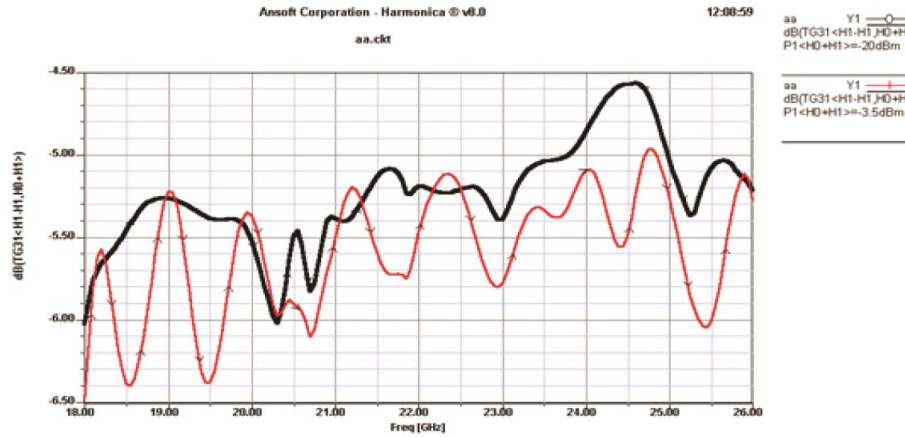


Рис. 12. Уровень компрессии (1дБ) при $P_r = 5$ дБм.
 Fig. 12. The level of compression (1dB) at $P_r = 5$ dBm.

Здесь уровень компрессии достигается при уровне входного сигнала $P_c = -3,5$ дБм. Поэтому смесители используются при уровнях сигнала меньших точки компрессии, так как дополнительно к искажению входного сигнала увеличивается амплитуда побочных спектральных составляющих. Также верхний предел динамического диапазона смесителя определяется уровнем компрессии. Относительно малый уровень компрессии связан с минимизацией при расчете характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ($P_r = 5$ дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов [19-20]. На рис.13 приведены результаты расчета уровня гармонических искажений $f_{\text{пч(параз)}} = 2(f_g - f_c)$ при неидентичности параметров диодов равен 5%. По результатам расчета можно сказать, что уровень гармонических искажений в диапазоне 18-23 ГГц составляет 140-180 дБ, а в диапазоне 23-26 ГГц составляет 50-140 дБ. Столь малый уровень гармонических искажений достигается смещением рабочей точки на ВАХ диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением P_r на несколько дБ.



Рис. 13. Уровень гармонических искажений $f_{\text{пч(параз)}} = 2(f_g - f_c)$ (при неидентичности параметров диодов 5 %).
 Fig. 13. The level of harmonic distortion $f_{\text{pch (paras.)}} = 2(f_g - f_c)$ (with non-identical parameters of the diodes 5%).

Расчёт показывает, что возможна реализация достаточно малых потерь преобразования 6,6 – 8,0 дБ (с учётом ослабления в ПФ и ФНЧ) при невысоких уровнях $P_r \sim 5 - 7$ дБм.

Расчётная неравномерность АЧХ в полосе 40 мГц не превышает 0,1 – 0,15 дБ. Недостаточное ослабление побочных каналов приёма 20 – 30 дБ наблюдается только в тех участках диапазона частот, где входные МШУ внесут дополнительные потери не менее 30 дБ.

Характеристики нелинейных искажений показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать -15 – -20 дБм для ослабления интермодуляционных искажений 3-го порядка не менее 50 дБс.

Вывод. Относительно малый уровень компрессии и подавления гармонических и интермодуляционных искажений связан с минимизацией при расчёте характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ($P_r \sim 5 - 7$ дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов.

Заметного улучшения характеристик смесителей по нелинейным искажениям можно достичь за счёт смещения рабочей точки на ВАХ диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением P_r на несколько дБ (до $P_r = 10$ дБм).

Практически режим с повышенным уровнем подавления нелинейных искажений может быть реализован за счёт включения диодов через резистивно-емкостные цепи (автосмещение) или использование диодов с повышенным потенциальным барьером.

Библиографический список:

1. Щитов А.М., Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет и проектирование смесителя с диплексором 18-26 ГГц // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т.6, № 11. С. 119-122.
2. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств Под ред. В.И. Вольмана. –М.: Радио и связь, 1982.-328.
3. Тагилаев А.Р., Исаев М.Д., Мирзаев З.Н. Высокочастотный балансный модулятор с высоким подавлением несущей частоты. Радиотехника, 2011, № 10, С. 45-47.
4. Мирзаев З.Н., Щитов А.М., Гусейнов М.С. Широкополосный балансный удвоитель частоты миллиметрового диапазона (26-40 ГГц) // Вестник Воронежского государственного технического университета. –Воронеж: ВГТУ, 2011. Т.7, № 11. С. 170-174.
5. Щитов А.М., Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет и проектирование смесителя проходного типа 18-26 ГГц // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж: ВГТУ, 2010. Т.6, № 11. С. 119-122.
6. Гусейнов М.С., Мирзаев З.Н., Щитов А.М. Расчет широкополосного полосно-пропускающего фильтра (12-19,2 ГГц) с короткозамкнутыми четвертьволновыми шлейфами // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ДГТУ, 2011. №21. С. 16–21.
7. Гусейнов М.С., Мирзаев З.Н. Широкополосный балансный умножитель частоты на связанных микрополосковых линиях передачи // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ДГТУ, 2010. №19. С. 7-11.
8. Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет параметров микрополосковых полосовых фильтров на связанных линиях // Сборник научных трудов кафедры микроэлектроники.– Махачкала: тип. ИП Тагиева Р.Х., 2011. Вып.1. С.36-40.
9. Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С. Расчет широкополосных согласующих цепей лестничной структуры (статья) // Исследование, разработка и применение средств радиоэлектроники, телекоммуникаций и информационных систем в промышленности: матер. Всерос. науч.-тех. конф. Махачкала: ДГТУ, 2011. С. 105-108.
10. Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С. Расчет элементов широкополосной согласующей цепи в диапазоне 4-6,4 ГГц (статья) // Исследование, разработка и применение средств радиоэлектроники, телекоммуникаций и информационных систем в промышленности: матер. Всерос. науч.-тех. конф. Махачкала: ДГТУ, 2011. С. 90-94.
11. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства. Каталог НИИПИ «Кварц», Н. Новгород, 2002 г.
12. Харкевич А.А. Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике. — М.: Гос-техиздат, 1956. - 184 с.
13. Григулевич В.И., Иммореев И.Я. Радиоимпульсное преобразование частоты. М.: Сов. радио, 1966, 335 с.
14. Хотунцев Ю.Л. Полупроводниковые СВЧ устройства. - М.: Связь, 1978. - 256с.
15. Петров Б.Е. Спектральный анализ в применении к нелинейной колебательной системе. - Радиотехника, 1964, т. 19, №7, с.3-12.
16. Петров Б.Е. КПД варакторных умножителей частоты с холостым контуром, настроенным на вторую гармонику. - В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение, под ред. Я.А. Федотова, вып.20. М.: Сов радио, 1968, с.356-366.

17. Пильдон В.И., Визель А.А. Полупроводниковые диоды для умножения частоты. - В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. Под ред. Я.А. Федотова. - М.: Сов.радио, 1970, вып.23, с.82-108.
18. Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л. Основы теории и техники умножения частоты. -М.: Сов. радио, 1964, 327 с.
19. Ризкин И.Х. Умножители и делители частоты. - М.: Связь, 1976. - 326 с.
20. Буторин Е.Н., Корж В.И., Крушгаа Е.Б. О времени восстановления обратной проводимости умножительных диодов. - Радиотехника, 1972, т. 27, № 6, с.65-68.

References:

1. Shchitov A.M., Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet i proyektirovaniye smesitelya s dipleksorom 18-26 GGts // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta . – 2010. –Т.6, № 11. –S. 119-122. [Shchitov A.M., Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Vol.6, No. 11. pp. 119-122. (In Russ)]
2. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCH poloskovykh ustroystv Pod red. V.I. Vol'mana. –М.: Радио и связь, 1982.-328. [Reference for the calculation and design of microwave strip devices Ed. IN AND. Wolman. –M.: Radio and communications, 1982. 328. (In Russ)]
3. Tagilayev A.R., Isayev M.D., Mirzayev Z.N. Vysokochastotnyy balansnyy modulya-tor s vysokim podavleniyem nesushchey chastoty. Radiotekhnika, 2011, № 10, С. 45-47. [Tagilaev A.R., Isaev M.D., Mirzaev Z.N. High-frequency balanced modulator with high carrier frequency suppression. Radio Engineering, 2011, No. 10, C. 45-47. (In Russ)]
4. Mirzayev Z.N., Shchitov A.M., Guseynov M.S. Shirokopolosnyy balansnyy udvoi-tel' chastoty millimetrovogo diapazona (26-40GGts) // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –Voronezh: VGTU, 2011. Т.7, № 11. S. 170-174. [Mirzaev Z.N., Shchitov A.M., Guseinov M.S. Broadband balanced doubler of frequency of the millimeter range (26-40 GHz) // Bulletin of the Voronezh State Technical University. –Voronezh: VSTU, 2011. Vol.7, No. 11. pp. 170-174. (In Russ)]
5. Shchitov A.M., Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet i proyektirovaniye smesitelya pro-khodnogo tipa 18-26 GGts // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. –Voronezh: VGTU, 2010. –Т.6, № 11. –S. 119-122. [Shchitov A.M., Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Calculation and design of the mixer of the pass-through type 18-26 GHz // Bulletin of the Voronezh State Technical University. –Voronezh: VSTU, 2010. –Т.6, No. 11. –S. 119-122. (In Russ)]
6. Guseynov M.S., Mirzayev Z.N., Shchitov A.M. Raschet shirokopolosnogo polosno-propuskayushchego fil'tra (12-19,2 GGts) s korotkozamknutymi chetvert'volnovymi shleyfami // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. –Makhachkala: DGTU, 2011.–№21. – S. 16–21. [Guseinov M.S., Mirzaev Z.N., Shchitov A.M. Calculation of a broadband bandpass filter (12-19.2 GHz) with short-circuited quarter-wave loops // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. –Makhachkala: DGTU, 2011. №21. pp. 16–21. (In Russ)]
7. Guseynov M.S., Mirzayev Z.N. Shirokopolosnyy balansnyy umnozhitel' chastoty na svyazannykh mikropoloskovykh liniyakh peredachi // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - Makhachkala: DGTU, 2010. -№19. - S. 7-11. [Huseynov MS, Mirzaev Z.N. Broadband balanced frequency multiplier on coupled microstrip transmission lines // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. - Makhachkala: DSTU, 2010. No.19. pp. 7-11(In Russ)]
8. Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet parametrov mikropoloskovykh polosovykh fil'trov na svyazannykh liniyakh // Sbornik nauchnykh trudov kafedry mikroelektroniki. – Makhachkala: tip. IP Tagiyeva R.KH., 2011. – Vyp.1.-S.36-40. [Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Calculation of the parameters of microstrip bandpass filters on connected lines // Collection of scientific papers of the Department of Microelectronics.– Makhachkala: typ. IP Tagiev R.Kh., 2011. Issue 1, pp. 36-40. (In Russ)]
9. Mirzayev Z.N., Guseynov M.S. Raschet shirokopolosnykh soglasuyushchikh tsepey lestnichnoy struktury (stat'ya) // Issledovaniye, razrabotka i primeneniye sredstv radioelektroniki, telekommunikatsiy i informatsionnykh sistem v promyshlennosti: mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. – Makhachkala: DGTU, 2011. – S. 105-108. [Mirzaev Z.N., Huseynov M.S. The calculation of the broadband matching chains of the staircase structure (article) // Research, development and application of radio electronics, telecommunications and information systems in industry: Mater. Vseros. scientific conf. Makhachkala: DGTU, 2011, pp. 105-108. (In Russ)]
10. Mirzayev Z.N., Guseynov M.S. Raschet elementov shirokopolosnoy soglasuyushchey tsepi v diapazone 4-6,4 GGts (stat'ya) // Issledovaniye, razrabotka i primeneniye sredstv radioelektroniki, telekommunikatsiy i informatsionnykh sistem v promyshlennosti: mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf. – Makhachkala: DGTU, 2011.– S. 90-94. [Mirzaev Z.N., Huseynov M.S. Calculation of elements of a broadband matching circuit in the range of 4-6.4 GHz (article) // Research, development and application of radio electronics, telecommunications and information systems in industry: Mater. Vseros. scientific conf. Makhachkala: DSTU, 2011, pp. 90-94(In Russ)]
11. Koaksial'nyye, volnovodnyye i opticheskiye ustroystva -Katalog NNPI «Kvarts», N. Novgorod, 2002 g. [Coaxial, waveguide and optical devices - Catalog of NNPI “Quartz”, N. Novgorod, 2002 (In Russ)]
12. Kharkevich A.A. Nelineynyye i parametricheskkiye yavleniya v radiotekhnike. M.: Gos-tekhnizdat, 1956. - 184 s. [Kharkevich A.A. Nonlinear and parametric phenomena in radio engineering. M.: Gos-tekhnizdat, 1956. 184 p. (In Russ)]

13. Grigulevich V.I., Immoreyev I.YA. Radioimpul'snoye preobrazovaniye chastoty. M.:Sov.radio, 1966, 335 s. [Grigulevich V.I., Immoreyev I.Ya. Radio pulse frequency conversion. M.: Sov.radio, 1966, 335 p. (In Russ)]
14. Khotuntsev YU.L. Poluprovodnikovyye SVCH ustroystva. - M.: Svyaz', 1978. 256s. [Khotuntsev Yu.L. Semiconductor microwave devices. - M.: Communication, 1978. 256p. (In Russ)]
15. Petrov B.Ye. Spektral'nyy analiz v primeneni k nelineynoy kolebatel'noy sisteme. Radiotekhnika, 1964, t. 19, №7, s.3-12. [Petrov B.E. Spectral analysis as applied to a nonlinear oscillatory system. Radio engineering, 1964, t. 19, No. 7, pp. 3-12. (In Russ)]
16. Petrov B.Ye. KPD varaktornyykh umnozhitel'nykh chastoty s kholostym konturom, nastroyennym na vtoruyu garmoniku. - V kn.: Poluprovodnikovyye pribory i ikh primeneniye, pod red. YA.A. Fedotova, vyp.20. M.: Sov radio, 1968, s.356-366. [Petrov B.E. Efficiency of varactor frequency multipliers with an idle circuit tuned to the second harmonic. - In the book: Semiconductor devices and their use, ed. Ya.A. Fedotova, issue 20. M.: Radio Owls, 1968, p. 356-366. (In Russ)]
17. Pil'don V.I., Vizel' A.A. Poluprovodnikovyye diody dlya umnozheniya chastoty. - V kn.: Poluprovodnikovyye pribory i ikh primeneniye. Pod red. YA.A. Fedotova. - M.: Sov.radio, 1970, vyp.23, s.82-108. [Pildon V.I., Wiesel A.A. Semiconductor diodes for frequency multiplication. - In the book: Semiconductor devices and their application. Ed. Ya.A. Fedotova. - M.: Sov.radio, 1970, Issue 23, pp. 82-108. (In Russ)]
18. Zhabotinskiy M.Ye., Sverdlov YU.L. Osnovy teorii i tekhniki umnozheniya chastoty. -M.: Sov. radio., 1964,327 s. [Jabotinsky M.E., Sverdlov Yu.L. Fundamentals of the theory and techniques of frequency multiplication. M.: Sov. radio., 1964,327 p. (In Russ)]
19. Rizkin I.KH. Umnozhiteli i deliteli chastoty. - M.: Svyaz', 1976. 326 s. [Rizkin I.Kh. Multipliers and frequency dividers. - M.: Communication, 1976. 326 p. (In Russ)]
20. Butorin E.H., Korzh V.I., Krushgaa Ye.B. O vremeni vosstanovleniya obratnoy provodimosti umnozhitel'nykh diodov.- Radiotekhnika, 1972, t. 27, № 6, s.65-68. [Butorin E.H., Korzh V.I., Krushgaa E.B. On the recovery time of the reverse conductivity of multiplier diodes. Radio Engineering, 1972, Vol. 27, No. 6, pp. 65-68. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Мирзаев Зайнудин Нурмагомедович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: **zainu73@mail.ru**

Гусейнов Мурад Саидович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: **murad.gusejnov@mail.ru**

Айгумов Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: **915533@mail.ru**

Information about the authors.

Zainudin N.Mirzaev, Cand. Sci., (Technical), Senior Lecturer, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: **zainu73@mail.ru**

Murad S.Guseynov, Cand. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: **murad.gusejnov@mail.ru**

Timur G.Aigumov, Cand. Sci. (Economics), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems. e-mail: **915533@mail.ru**

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.06.2019.

Принята в печать 29.08.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.06.2019.

Accepted for publication 29.08.2019.

Для цитирования: Степанов О.И., Худякова С.А. Моделирование расстановки источников наружного противопожарного водоснабжения при обосновании специальных технических условий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 108-115. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-108-115.

For citation: O.I. Stepanov, S.A. Khudyakova. Modelling of external fire protection water supply sources in the substantiation of special technical conditions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 108-115. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-108-115

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.8: 614.842.6

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-108-115

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Степанов О.И.¹, Худякова С.А.²

¹Главное управление МЧС России по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре,
628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 5а, Россия,

²Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,
620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22, Россия

Резюме. Цель. Рассмотрены вопросы теоретического обоснования размещения источников наружного противопожарного водоснабжения при проектировании уникальных объектов строительства, для которых не определены нормативные требования пожарной безопасности. Приведены проблемные ситуации, возникающие при проектировании уникальных объектов строительства, связанные с обеспечением необходимого уровня подачи огнетушащих веществ. **Метод.** Приведена модель предварительного расчета размещения источников наружного противопожарного водоснабжения с учетом оснащенности пожарно-спасательных подразделений на основе теории графов. Изложена идея выработки универсального математического аппарата для предварительного определения параметров расположения источников наружного противопожарного водоснабжения при проектировании объектов строительства. **Результат.** Приведены примеры предварительного расчета количества источников наружного противопожарного водоснабжения исходя из формы периметра зданий. Приведены дополнительные факторы, определяющие расстояния от источников наружного противопожарного водоснабжения до проектируемых объектов. **Вывод.** Сформулировано заключение относительно адекватности предложенной модели и обозначено направление исследования, позволяющее уточнить применимость модели для расчёта на проектируемых объектах, отличающихся сверхнормативными характеристиками по размерам в плане.

Ключевые слова: источник водоснабжения, модель, граф, периметр, пожар

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MODELLING OF EXTERNAL FIRE PROTECTION WATER SUPPLY SOURCES IN THE
SUBSTANTIATION OF SPECIAL TECHNICAL CONDITIONS

O.I. Stepanov¹, S.A. Khudyakova²

¹ Main Directorate of the Ministry of Emergencies of Russia for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug
- Ugra,

¹5a Studencheskaya Str., Khanty-Mansiysk 1628011, Russia,

² Ural Institute of the State Fire Service EMERCOM of Russia,

²22 Mira Str., Sverdlovsk region, Ekaterinburg 2620062, Russia

Abstract. Objectives This paper sets out to provide a theoretical substantiation of the placement of external fire-prevention water supply sources when designing unique construction objects, for which standard requirements of fire safety cannot be applied. Problematic situations arising during the design of unique construction objects, which relate to the provision of the required level of fire-extinguishing substances supply, are described. **Method** A model constructed on the basis of graph theory is presented for the preliminary calculation of the location of external fire-fighting water supply sources that takes the equipment of fire-rescue units into account. The utility of developing a universal mathematical model for the preliminary definition of arrangement parameters of sources of external fire-prevention water supply when designing construction objects is substantiated. **Results** Examples of preliminary calculation of the number of external fire-fighting water supply sources are given considering the shape of the building perimeter. Additional factors determining the distances from external fire-fighting water supply sources to the projected objects are given. **Conclusion** A conclusion regarding the adequacy of the proposed model is formulated and directions for future research indicated that allows the applicability of the model to be specified for the calculation of the projected objects, which differ in terms of dimensions given in the plan by above-normative characteristics.

Keywords: water source, model, graph, perimeter, fire safety

Введение. Расчет и планирование расположения источников наружного противопожарного водоснабжения (ИППВ) является неотъемлемой частью проектов современных крупных торговых комплексов и многофункциональных зданий [1, 2]. Строительство подобных объектов во многом сопряжено с трудностями их размещения внутри уже сложившихся городских кварталов, в том числе с высокой концентрацией памятников архитектуры и социальных объектов [3, 4]. Также возникает необходимость пересмотра и существенного совершенствования действующих сетей водоснабжения в районе объекта. При этом на стадии проектирования, в настоящее время, не учитываются особенности оснащённости пожарно-спасательных подразделений местных пожарно-спасательных гарнизонов пожарной и аварийно-спасательной техникой [5].

Крупные торговые комплексы и многофункциональные здания зачастую проектируются в строительных объемах, превосходящих установленные в нормативных документах по пожарной безопасности параметры, что ведет к необходимости разработки и согласования специальных технических условий (СТУ) [2, 5, 6]. В большинстве случаев это связано с отсутствием нормативных параметров по планируемым пожарным отсекам, функциональным назначениям отдельных зон и отсеков, параметрам систем противопожарного водоснабжения и размещению путей эвакуации.

Разработчиками СТУ выполняются расчеты расходов воды на внутреннее и наружное пожаротушение, при этом окончательный расчет завершается на выявлении суммарного расхода ($Q_{\text{общ.}}$) огнетушащих веществ (ОВВ). После этого устанавливается пропускная способность проектируемых сетей по водоотдаче или проверяется способность имеющихся сетей обеспечить

объект водой для целей пожаротушения, устанавливается наименьшее необходимое количество ИППВ.

Постановка задачи. Предлагается модель предварительного расчета размещения источников наружного противопожарного водоснабжения с учетом оснащенности пожарно-спасательных подразделений на основе реберного графа произвольного графа периметра объекта (рис.1).

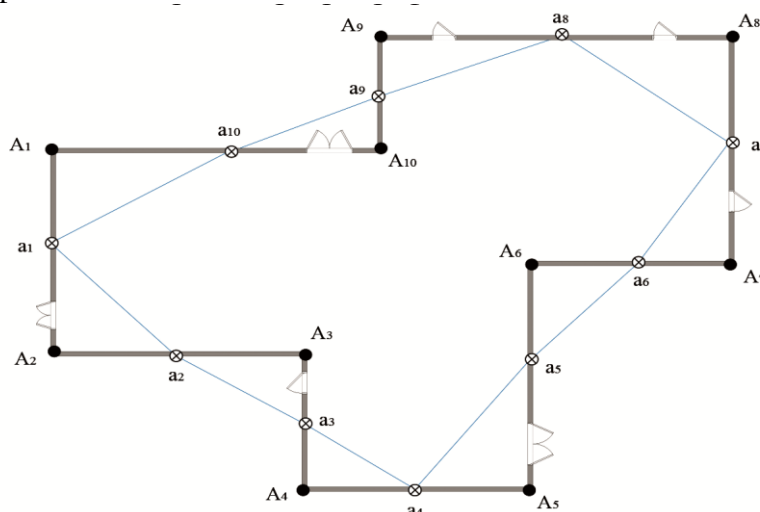
Теория графов, как дисциплина дискретной математики, занимает видное место в решении практических (производственных) задач [7, 8]. Неоднократно элементы теории графов применялись при планировании деятельности пожарно-спасательных подразделений, их нормировании, решении задач поиска кратчайших (оптимальных) маршрутов и развертывания сил и средств пожарных подразделений [9-11].

В основе модели лежит идея выработки универсального математического аппарата для предварительного определения параметров расположения ИППВ при проектировании объектов строительства, которая бы учитывала особенности действий пожарно-спасательных подразделений на начальном этапе пожаротушения [12, 13] в части, при проведении боевого развертывания.

Требования нормативных документов и справочные материалы, регламентирующие проведение боевых действий пожарно-спасательных подразделений, предписывают обязательную установку пожарных автомобилей (в большинстве гарнизонов Российской Федерации это автоцистерны пожарные (АЦ)) на водоисточники. Если внешние признаки пожара позволяют идентифицировать локацию пожара, на ИППВ устанавливается и АЦ первого прибывшего оперативного отделения [14].

Именно на данном этапе действий пожарно-спасательных подразделений наиболее часто проявляются недостатки, допущенные при проектировании сетей водоснабжения, в том числе усугубляющиеся нарушениями организационного характера при эксплуатации объектов: невозможность подъезда к ИППВ; отсутствие указателей места нахождения ИППВ; загроможденность ИППВ товарными ценностями или автомобилями; низкая водоотдача сети, на которой установлен пожарный гидрант (ПГ) и пр.

Методы исследования. Для формализации модели приведем произвольный периметр проектируемого здания (рис. 1). Как видно из рис. 1, графы периметра и реберный являются полными и задаются множествами вершин $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}\}$ и $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}\}$ соответственно [7]. Причем вершина реберного графа $L(K)$ находится на середине ребра графа K .



K - произвольный граф периметра объекта $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}\}$

$L(K)$ - реберный граф произвольного графа периметра объекта $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}\}$

K – arbitrary graph of the perimeter of the object; $L(K)$ – edge graph of an arbitrary graph of the perimeter of an object.

Рис. 1. Граф периметра объекта и его реберный граф [9]

Fig. 1. The graph of the perimeter of the object and its edge graph [9]

Определить необходимое количество ИППВ для проектируемого объекта предлагается, применив расчет числа независимости графа K ($\alpha_0(K)$) [7, 8], и заданием дополнительных условий, установленных нормативными документами.

Граф K имеет 10 вершин, степени всех его вершин равны 2, откуда определим числа независимости $\alpha_0(K)$:

$$\alpha_0(K) = \frac{n}{\Delta(K)+1} \quad (1)$$

Значение $\alpha_0(K)$ составит $3\frac{1}{3}$.

Расчет количества ИППВ будем вести по формуле:

$$N_{\text{ИППВ}} = \alpha_0(K) + 1 \quad (2)$$

Из чего следует, что для рассмотренного объекта может быть установлено не менее 5 ИППВ, что явно избыточно по расчету обеспеченности объекта требуемым расходом воды для нужд наружного пожаротушения ($Q_{\text{туш.}}$).

Обсуждение результатов. Практическая деятельность территориальных органов МЧС России по представляемым на согласование ТСУ показывает, что $Q_{\text{туш.}}$ составляет 45 – 70 л/сек для объектов с площадью застройки до 13 – 15 тыс. м² (при условии, что для расчетов выбрана справочная интенсивность подачи ОТВ 0,2 л/сек×м² и линейная скорость распространения горения 0,5 – 0,7 м/мин. [15]).

Для уточнения расчета по периметру объединим дугами вершины реберного графа, лежащие на одной стороне здания, спроецированной на вертикальную плоскость системы координат OXZ (рис. 2).

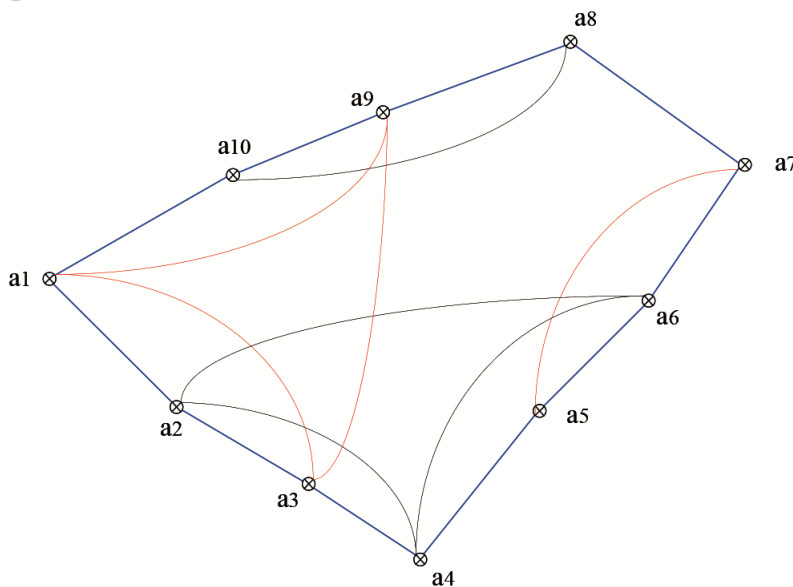


Рис. 2. Схема расширенного реберного графа $L(K)$
Fig. 2. Extended edge graph $L(K)$ diagram

Выявив максимальную степень вершин $\Delta(K)$, пересчитаем $\alpha_0(K)$:

$$\alpha_0(K) = \frac{10}{4+1} = 2$$

Из чего следует, что может быть установлено не менее 3 ИППВ, что более удовлетворяет расчету требуемого расхода ОТВ.

В целях проверки приведенных положений применим расчет для здания с более сложной формой периметра (рис. 3).

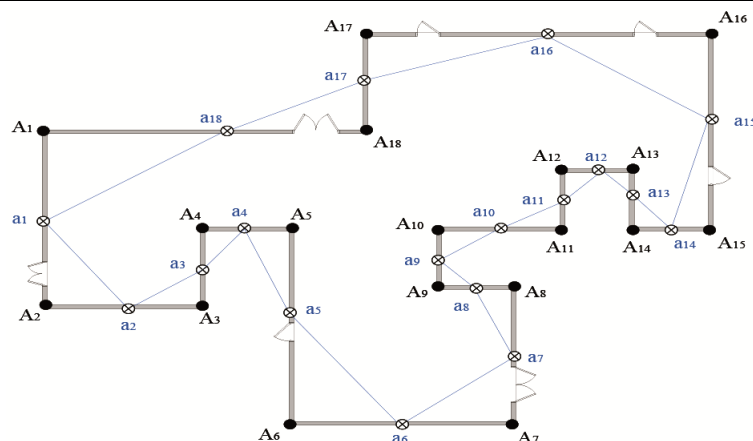


Рис. 3. Граф периметра объекта и его реберный граф
Fig. 3. The graph of the perimeter of the object and its edge graph

На рис.3 количество вершин реберного графа равно 18. Определим $\alpha_0(K)$:

$$\alpha_0(K) = \frac{n}{\Delta(K) + 1} = \frac{18}{2 + 1} = 6$$

Очевидно, что наибольшее количество вершин реберного графа, проецируемых на вертикальную плоскость системы координат OXZ, будет на участке $\{a_2, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}, a_{14}\}$, соответственно, дополнив граф ребрами между этими вершинами, получим $\Delta(K)$ равную 8 (рис. 4).

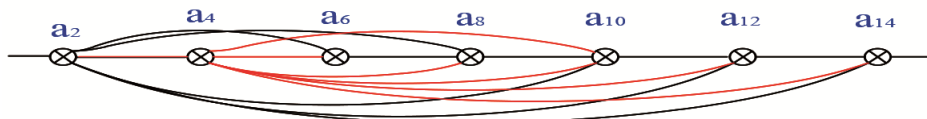


Рис. 4. Фрагмент расширенного реберного графа
Fig. 4. Fragment of an extended edge graph

Отсюда определим $\alpha_0(K)$:

$$\alpha_0(K) = \frac{n}{\Delta(K) + 1} = \frac{18}{8 + 1} = 2$$

Количество ИППВ составит:

$$N_{\text{ИППВ}} = \alpha_0(K) + 1 = 2 + 1 = 3$$

При этом обязательным будет расположение ИППВ у наиболее насыщенной вершинами проекции периметра здания, то есть на участке $\{A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}\}$.

Дополнительным условием для планирования расположения ИППВ будет проверка доступности для пожарных автомобилей и удаленности от проектируемого объекта. Наиболее распространенными основными пожарными автомобилями являются АЦ (около 90% от общего количества основных автомобилей в пожарно-спасательных гарнизонах). Наибольшее расстояние для прокладки магистральной линии от одной АЦ является дистанция в 100 – 160 метров (в зависимости от модели АЦ и без учета неровностей, изгибов местности прокладки линий) [15-17]. Соответственно максимально приемлемым расстоянием расположения ИППВ будет дистанция, включающая работу головного пожарного автомобиля на пожаре, что в сумме составит 160 – 220 метров.

Таким образом, становится возможным задать область расположения ИППВ на плане объекта на местности (рис. 5), определив:

- 1) суммарный расход ОТВ для нужд наружного пожаротушения (расчетом или нормативным значением);
- 2) расчетом количество ИППВ;

3) предельные параметры работы пожарных автомобилей подразделений местного пожарно-спасательного гарнизона (по данным соответствующих пожарно-спасательных подразделений).

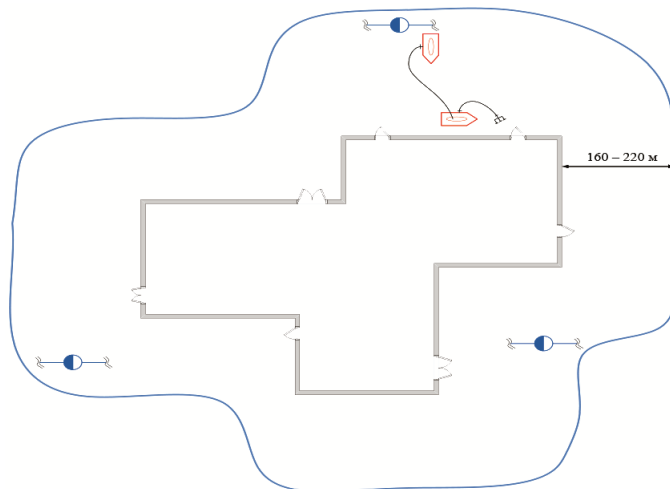


Рис. 5. Зона расположения ПГ на местности по совокупности расчетов
Fig. 5. The hydrant location area on the ground according to the totality of calculations

Вывод. На приведенном примере сформулирована модель, основанная на теории графов, позволяющая осуществлять предварительное планирование количества и порядка размещения ИППВ на проектируемых объектах. Модель учитывает ранее не сопоставляемые в единой концепции параметры, относящиеся к сферам: организации действий пожарно-спасательных подразделений; обеспечения необходимым расходом ОТВ объекта возможного пожара; нормативного регулирования расположения ИППВ. Адекватность модели подтверждается стремлением расчетных значений к области, не выходящей за пределы необходимой достаточности ресурса «огнетушащее вещество» - расчетного значения его подачи (Q). Многофакторность рассмотрения задачи размещения ИППВ снижает вероятность некорректного проектного решения и является вариантом экспресс расчета размещения ИППВ.

Дальнейшей целью исследования является установление критических параметров рассматриваемых зданий для предложенной модели (по значениям периметра и площади застройки).

Библиографический список:

1. СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84».
2. ФЗ от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
3. ФЗ от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
4. Суровенков А.В. Архитектура торговых центров крупнейшего города (на примере Санкт-Петербурга): автореферат диссертации кандидата архитектуры. Санкт-Петербург, 2005. 25 с.
5. Приказ МЧС России от 28.11.2011 № 710 «Об утверждении Административного регламента Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий предоставления государственной услуги по согласованию специальных технических условий для объектов, в отношении которых отсутствуют требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами по пожарной безопасности, отражающих специфику обеспечения их пожарной безопасности и содержащих комплекс необходимых инженерно-технических и организационных мероприятий по обеспечению их пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
6. Приказ Минстроя России от 15.04.2016 №248/пр «О порядке разработки и согласования специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства».
7. Мельников О.И. Теория графов в занимательных задачах. Изд. Стереотип. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 240 с.
8. Липатов Е.П. Теория графов и ее применения. – М.: Знание, 1986. – 32 с.
9. Денисов А.Н. Моделирование сосредоточения и введения сил и средств для планирования боевых действий пожарных подразделений // Пожары и окружающая среда: материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2002. – 477 с.

10. Степанов О.И. Привлечение пожарных подразделений при реализации метода поэтапного ввода сил и средств на тушение пожара // Материалы второй международной научно-технической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013, 3 с.
11. Денисов А.Н. Степанов О.И., Модель системы информационно-аналитической поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями // Техносферная безопасность: интернет-журнал. – 2018. – № 3 (20). – С. 30-37.
12. Денисов А.Н., Коробко В.Б., Матюшин А.В., Степанов О.И. Структура системы управления пожарно-спасательными подразделениями на начальном этапе пожаротушения // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2017. – № 3 (73).
13. Григорьев А.Н., Гундар С.В., Денисов А.Н. Управление силами и средствами при тушении пожаров (тактические возможности пожарных подразделений): монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015, 112 с.
14. Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ Приказ МЧС России от 16.10.2017 № 444.
15. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М., 1987. 288 с.
16. Богданов М.И., Архипов Г.Ф., Мясенков Е.И. Справочник по пожарной технике и тактике: учебное пособие. Управление государственной противопожарной службы Санкт-Петербурга и Ленинградской области МЧС России. – СПб., 2002. – 120 с.
17. Об утверждении норм табельной положенности пожарно-технического вооружения и аварийно-спасательного оборудования для основных специальных пожарных автомобилей, изготавливаемых с 2006 года. Приказ МЧС России от 25.07.2006, №425.

References:

1. SP 31.13330.2012 «Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualiziro-vannaya redakciya SNiP 2.04.02-84». [SP 31.13330.2012 «Water supply. External networks and facilities. The updated edition of SNiP 2.04.02-84» (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. Federal'nyj zakon ot 29 dekabrya 2004 g. № 190-FZ «Gradostroitel'nyj kodeks Rossijskoj Federacii» (s izmeneniyami i dopolneniyami). [Federal law from December 29, 2004 No. 190-FZ "Urban planning code of the Russian Federation" (with changes and additions) (In Russ)]
4. Savenkov A. V Arhitektura torgovyh centrov krupnejshogo goroda (na primere Sankt-Peterburga): avtoreferat disertacii kandidata arhitektury. Sankt-Peterburg, 2005. 25 s. [Savenkov A. V. Architecture of shopping centers in the largest city (by the example of St. Petersburg): abstract of thesis of candidate of architecture. Saint Petersburg, 2005. 25 C. (In Russ)]
5. Prikaz MCHS Rossii ot 28.11.2011 № 710 «Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrez-vychajnym situacijam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij predostavleniya gosudarstvennoj uslugi po soglasovaniyu special'nyh tekhnicheskikh uslovij dlya ob"ektov, v otnoshenii kotoryh otsutstvuyut trebovaniya pozharnoj bezopasnosti, ustanovlen-nye normativnymi pravovymi aktami Rossijskoj Federacii i normativnymi dokumentami po pozharnoj bezopasnosti, otrazhayushchih specifiku obespecheniya ih pozharnoj bezopasnosti i soderzhashchih kompleks neobhodimyh inzhenerno-tekhnicheskikh i organizacionnyh meropriyatij po obespecheniyu ih pozharnoj bezopasnosti» (s izmeneniyami i dopolneniyami). [The order of EMERCOM of Russia from 28.11.2011 № 710 "On approval of Administrative regulations of the Ministry of the Russian Federation for civil defense, emergencies and elimination of consequences of natural disasters, the provision of public services for approval of special technical conditions for objects for which there is no fire safety requirements, established by normative legal acts of the Russian Federation and normative documents on fire safety, specific to ensure their fire safety and containing a set of necessary engineering and organizational measures for ensuring fire safety" (with changes and additions). (In Russ)]
6. Prikaz Ministroya Rossii ot 15.04.2016 №248/pr «O poryadke razrabotki i soglaso-vaniya special'nyh tekhnicheskikh uslovij dlya razrabotki proektnoj dokumentacii na ob"ekt kapital'nogo stroitel'stva». [Order of the Ministry of Construction of Russia dated 04.15.2016 No. 248 / pr "On the procedure for the development and coordination of special technical conditions for the development of design documentation for an object of capital construction". (In Russ)]
7. Mel'nikov O.I. Teoriya grafov v zanimatel'nyh zadachah. Izd. Stereotip. M.: LENAND, 2018. 240 s. [Melnikov O.I. Graph theory in entertaining problems. Ed. Stereotype. M.: LENAND, 2018. 240 p. (In Russ)]
8. Lipatov E.P. Teoriya grafov i ee primeneniya. M.: Znanie, 1986. 32 s. [Lipatov E.P. Graph theory and its applications. M.: Knowledge, 1986. 32 p. (In Russ)]
9. Denisov A.N. Modelirovanie sosredotocheniya i vvedeniya sil i sredstv dlya plani-rovaniya boevykh dejstvij pozharных подразделений // Pozhary i okruzhayushchaya sreda: mate-rialy HVII Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. – M.: VNIPO, 2002. – 477 s. [Denisov A.N. Modeling the concentration and introduction of forces and means for planning combat operations of fire units // Fires and the environment: materials of the XVII International Scientific and Practical Conference. M.: VNIPO, 2002. 477 p. (In Russ)]

10. Stepanov O.I. Privlechenie pozharных подразделений pri realizacii metoda po-etapnogo vvoda sil i sredstv na tushenie pozhara // Materialy vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovacii». – M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2013, 3 s. [Stepanov O.I. Attraction of fire departments in the implementation of the method of phased input of forces and means to extinguish a fire // Materials of the second international scientific and technical conference "Fire fighting: problems, technologies, innovations." - M.: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2013, 3 p. (In Russ)]
11. Denisov A.N. Stepanov O.I., Model' sistemy informacionno-analiticheskoy podderzhki upravleniya pozharно-spasatel'nyimi podrazdeleniyami // Tekhnosferная bez-opasnost': internet-zhurnal. – 2018. – № 3 (20). – S. 30-37. [Denisov A.N. Stepanov O.I., Model of a system of information and analytical support for the management of fire and rescue units // Technosphere safety: online journal. 2018 . No. 3 (20). pp. 30-37. (In Russ)]
12. Denisov A.N., Korobko V.B., Matyushin A.V., Stepanov O.I. Struktura sistemy upravleniya pozharно-spasatel'nyimi podrazdeleniyami na nachal'nom etape pozharotushe-niya // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti». – 2017. – № 3 (73). [Denisov A.N., Korobko V.B., Matyushin A.V., Stepanov O.I. The structure of the control system for fire and rescue units at the initial stage of fire extinguishing // Internet magazine "Technosphere safety technologies." - 2017. No. 3 (73). (In Russ)]
13. Grigor'ev A.N., Gundar S.V., Denisov A.N. Upravlenie silami i sredstvami pri tushenii pozharov (takticheskie vozmozhnosti pozharных подразделений): monografiya. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2015, 112 s. [Grigoriev A.N., Gundar S.V., Denisov A.N. Command and control of fire fighting (tactical capabilities of fire departments): monograph. M.: Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2015, 112 pp. (In Russ)]
14. Prikaz MCHS Rossii ot 16.10.2017 № 444 «Ob utverzhdenii Boevogo ustava podrazdelenij pozharной охраны, opredelyayushchego poryadok organizacii tusheniya pozharov i provedeniya avarijno-spasatel'nyh rabot». [Order of the Ministry of Emergencies of Russia dated 16.10.2017 No. 444 "On approval of the Combat Charter of fire brigades, which determines the organization of fire fighting and emergency rescue operations." (In Russ)]
15. Ivannikov V.P., Klyus P.P. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. M., 1987. 288 s. [Ivannikov V.P., Klyus P.P. Directory of the head of a fire fighting. M., 1987. 288 p. (In Russ)]
16. Bogdanov M.I., Arhipov G.F., Myastenkov E.I. Spravochnik po pozharной tekhnike i taktike: uchebnoe posobie. Upravlenie gosudarstvennoj protivopozharной sluzhby Sankt-Peterburga i Leningradской oblasti MCHS Rossii. – SPb., 2002. – 120 s. [Bogdanov M.I., Arkhipov G.F., Myastenkov E.I. Handbook of fire fighting equipment and tactics: a training manual. Office of the State Fire Service of St. Petersburg and the Leningrad Region EMERCOM of Russia. - SPb., 2002. 120 p. (In Russ)]
17. Prikaz MCHS Rossii ot 25.07.2006 № 425 «Ob utverzhdenii Norm tabel'noj polo-zhennosti pozharно-tekhnicheskogo voорuzheniya i avarijно-spasatel'nogo oborudovaniya dlya osnovnyh i special'nyh pozharных avtomobilej, izgotavlivaemyh s 2006 goda». [The order of Emercom of Russia of 25.07.2006 No. 425 «About the approval of the Standards of the personnel position of fire-technical weapons and emergency equipment for the main and special fire engines made since 2006».(In Russ)]

Сведения об авторах:

Степанов Олег Игоревич, начальник отдела подготовки пожарно-спасательных и аварийно-спасательных формирований; e-mail: oleg01911@yandex.ru

Худякова Светлана Александровна, кандидат педагогических наук, начальник кафедры математики и информатики; e-mail: hudyakovac@mail.ru

Information about authors:

Oleg I. Stepanov, Head of the Department for the preparation of fire rescue and emergency rescue units; e-mail: oleg01911@yandex.ru

Svetlana A. Khudyakova, Cand. Sci. (Pedagogical), Head of the department of mathematics and computer science; e-mail: hudyakovac@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.07.2019.

Принята в печать 27.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.07.2019.

Accepted for publication 27.09.2019.

Для цитирования: Якунин А.Г. Экспресс - метод наземного мониторинга основных параметров облачного покрова. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 116-128. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

For citation: A.G. Yakunin. Express monitoring of the main parameters of clouds from the earth's surface. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 116-128. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 504.064.36:519.688

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-116-128

ЭКСПРЕСС - МЕТОД НАЗЕМНОГО МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА

Якунин А.Г.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46г., Россия

Резюме. Цель. В работе предлагается методика, позволяющая при минимуме программно-аппаратных затрат путем наземных видеонаблюдений и контроля относительной влажности определять основные типы облаков и параметры облачного покрова (высоту нижней границы, направления и скорости перемещения облаков) без привлечения сведений о метеорологической обстановке с официальных источников, не всегда имеющих для конкретного места и времени наблюдения. **Метод.** В основе метода лежит известная формула Ипполитова, связывающая влажность воздуха на поверхности земли с нижней границей облачности, эмпирические коэффициенты которой зависят от типа облачного покрова. Для определения этого типа предлагается метод, в основе которого лежит аппроксимация контура облаков эллипсом. **Результат.** В качестве дополнительных классификационных признаков используется количество аппроксимирующих эллипсов в кадре изображения, близость их взаимного расположения, доля общей площади, занимаемая ими в кадре, и доля площади, занимаемая самым большим эллипсом. Скорость и направление облаков определяются по смещению общих ключевых точек на кадрах изображения, полученных через небольшой фиксированный интервал времени. Каждая такая точка описывается дескриптором, вычисляемым методом SURF, представленным в открытой библиотеке обработки изображений OpenCV. **Вывод.** Не смотря на простоту программной реализации и используемого аппаратного обеспечения (web-камера, датчик влажности и OEM – модуль Arduino) метод обеспечивает погрешность определения перечисленных параметров в пределах 20%. Основная область применения систем мониторинга, реализованных с его применением – сеть частных автоматических метеостанций, подобных сети Wunderground с целью получения дополнительной информации, которую можно использовать как для повышения точности метеопрогнозов, так и при проведении научных исследований в области метеорологии и климатологии.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений; высота нижней границы облачности; скорость и направление перемещения облаков; распознавание типа облаков; многоточечный экологический мониторинг

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

EXPRESS MONITORING OF THE MAIN PARAMETERS OF CLOUDS FROM THE EARTH'S SURFACE

A.G. Yakunin

Polzunov Altai State Technical University,
46g Lenin Ave., Barnaul 656038, Russia

Abstract Objectives The paper proposes a technique that allows the main types of clouds and cloud cover parameters (ceiling, direction and speed of cloud movement) to be determined at minimum cost via observations from the Earth's surface. The aim is to avoid using meteorological information derived from official sources, which may not always be available for a specific place and time of observation. **Method** The method is based on the well-known Ippolitov formula that connects air humidity on the Earth's surface with the cloud ceiling, whose empirical coefficients depend on the type of the cloud cover. In order to determine this type, a method based on elliptic cloud contour approximation is proposed. **Results** Additional classification features were the number of approximating ellipses in the image frame, the proximity of their mutual location, the total area that they occupy in the frame and the area occupied by the largest ellipse. The speed and direction of the clouds are determined through shifting the common key points in image frames obtained over a small fixed time interval. Each point is described by a descriptor calculated using the SURF method from the open image processing library OpenCV. **Conclusion** Despite the simplicity of the required software and hardware (web camera, humidity sensor, and OEM – Arduino module), this method provides a definition of these parameters with an error within 20%. Monitoring systems based on this method may be used in private automatic weather stations, such as the Wunderground, for obtaining more information that could improve the accuracy of weather forecasts, as well as for research in meteorology and climatology.

Keywords: digital image processing; ceiling; speed and direction of cloud movement; cloud type recognition; multi-point environmental monitoring

Введение. Трудно переоценить роль метеорологических прогнозов в жизни современного индустриального общества. От работы метеорологических служб, своевременности и достоверности предоставляемой ими информации зависит работа таких отраслей, как транспорт, пассажирские перевозки и в особенности авиаперевозки, жилищно-коммунальное и сельское хозяйство, строительство. Крайне важна роль долгосрочных метеорологических прогнозов в сельском хозяйстве.

К сожалению, достоверность именно долгосрочных прогнозов пока оставляет желать лучшего. И одной из причин такого положения дел является ограниченность используемых для формирования прогноза моделей из-за недостаточности наших знаний о процессах, приводящих к изменению погоды, а в общем случае и к изменениям климата.

С другой стороны, это объясняется и недостаточным объемом данных, подаваемых на вход таких моделей. В частности, одним из видов таких данных и одной из причин, оказывающих влияние на происходящие в атмосфере и подстилающей поверхности явления, являются данные о свойствах облачного покрова.

Облака участвуют в кругообороте воды в природе, в энергетическом обмене, в перераспределении тепловой энергии на земном шаре, они влияют на радиационный баланс. Через воздействие на радиационный баланс атмосферы и земной поверхности как в коротковолновой, так и в длинноволновой области спектра солнечного излучения, они оказывают непосредственное влияние на температурно-влажностный режим атмосферы, тропосферы и приземного слоя воздуха [1, 2]. Так, облака нижнего и среднего ярусов имеют высоту нижней границы в пределах 2 ... 6 км, составляют основную массу облачности планеты и оказывают основное влияние на динамику вертикальных профилей температуры и на соотношение между поглощаемым теплом от

солнечного излучения и испускаемым теплом собственного длинноволнового излучения планеты [1]. Тем самым они являются важнейшим фактором, влияющим на формирование погоды и климата, на распространение растительности и животного мира на Земле, а, следовательно, и на всю деятельность человека. В свою очередь, общее состояние атмосферы, характер подстилающей поверхности и наличие антропогенного фактора также воздействуют на состояние облачного покрова [3-5].

Одним из важных параметров, описывающих облачный покров, является высота нижней границы облаков, играющая важную роль в краткосрочном прогнозировании погоды, и особенно в прогнозировании опасных погодных условий [6]. Поэтому ведение долгосрочного наблюдения за этим параметром, а по возможности и других описывающих облака свойств (в частности, тип облачного покрова и скорость перемещения), причем на обширных территориях, крайне важно как в целях прогнозирования погоды, так и в целях проведения научных исследований в области изучения климатических процессов, происходящих на планете [7]. Очевидно, для проведения таких исследований желательно иметь непрерывную во времени и пространстве трехмерную картину изменения состояния облачного покрова. Однако на сегодняшний день ни одна из существующих систем наблюдения не удовлетворяет таким требованиям.

Анализ известных методов измерения высоты нижней границы облачности. Наиболее близки к требованиям получения информации с обширных территорий системы дистанционного спутникового зондирования [7,8,9]. Так, например, системы на базе спектрорадиометров MODIS, установленные на спутниках Terra¹ и Aqua², позволяют формировать продукты, содержащие маски облачности, информацию о типе облаков и иные сведения [9-11]. Они позволяют решать задачу получения информации с больших территорий (со всей поверхности планеты) с высоким пространственным разрешением (вплоть до 500м) [11,12]. Но эта информация дискретна во времени, поскольку спутники находятся не на геостационарной орбите, пролетают над одной и той же территорией только дважды в сутки, причем в разное время (полный цикл вращения вокруг Земли составляет для спутника Terra 16 суток).

По этой причине они не в состоянии определять такие важные параметры облаков, как скорость их перемещения. Кроме того, им в принципе недоступна информация о высоте нижней границы облачности, поскольку наблюдения проводятся сверху. Хотя косвенно и с большой погрешностью ее можно найти путем измерения высоты верхней границы облачности (или отдельных облаков) с последующим вычитанием толщины облачности. Высота верхней границы получается путем обработки снимков облаков с нескольких спутников или одним спутником, но с разных позиций. О толщине облака можно косвенно судить с земли по степени поглощения солнечного излучения [13], либо со спутника по степени поглощения длинноволнового излучения, испускаемого подстилающей поверхностью.

Альтернативными спутниковым методам зондирования являются методы, в которых измерительная аппаратура размещается на земной поверхности. Такие методы, в свою очередь, подразделяются на методы активного и пассивного наблюдения. Активные методы на основе лидаров и лазеров [14,15] наиболее точны, не зависят от времени суток, мало зависят от погоды (для лидаров), но в то же время они и наиболее дорогостоящи. Поэтому устройства с активными методами локации облаков не подходят для широкомасштабного применения и используются преимущественно в единичных экземплярах в аэропортах и на метеостанциях. Еще менее пригодны для построения многоточечных систем экологического мониторинга по причине высокой стоимости методы, основанные на применении зондов с установленным на них высотомером, анемометром, иным измерительным оборудованием и телеметрической системой. Даже на метеостанциях вместо таких зондов часто применяют шары-пилоты, когда о высоте границы облака судят визуально, засекая момент времени между моментом старта шара и моментом, когда шар скроется в облаке [16].

¹ <https://terra.nasa.gov/>

² <https://aqua.nasa.gov/>

Этот метод определения высоты нижней границы облачности достаточно прост и доступен. Однако он имеет значительную погрешность, особенно при низкой плотности облаков и наличии сильного ветра. При этом длительная и трудоемкая подготовка к измерениям, большой интервал времени между измерениями и невозможность их автоматизации делают данный метод тоже непригодным для многоточечных систем мониторинга.

Среди пассивных методов нахождения высоты нижней границы облаков в публикациях упоминаются триангуляционные методы пассивной оптической локации [17] и методы, основанные на эмпирических формулах, связывающих высоту облака с типом облака и параметром, характеризующим влажность воздуха [6,18,19]. Это может быть либо дефицит точки росы, либо относительная влажность атмосферы.

Все эти методы не требуют применения дорогостоящей аппаратуры, обеспечивают оперативность наблюдения и легко поддаются автоматизации. Поэтому на их основе можно создавать системы многоточечного мониторинга [20,21,22], чтобы у исследователей была возможность долговременно наблюдать 3D-картину временных изменений высоты нижней границы облака (а по возможности – и других его характеристик) на больших пространственных территориях.

Из пассивных методов, пожалуй, наиболее точными являются триангуляционные методы, работающие по принципу бинокулярного зрения. Однако для обеспечения приемлемой точности измерения, особенно облаков верхнего яруса, они требуют применения достаточно большого базового расстояния между фотоприемниками, высокой степени идентичности используемых в них фотоприемников и оптических систем, строгой параллельности установки их оптических осей, а также выполнения перед применением довольно сложной калибровки и юстировки. Интересной разновидностью таких методов является приведенный в [23] метод, в котором для наблюдения применены два идентичных оптических приемника с различными фокусными расстояниями. Однако такое решение только усугубляет проблему снижения точности измерений из-за неидентичности измерительных каналов. Кроме того, поскольку в нем расстояние определяется по разности размеров изображения, проецируемого на фотоприемники, определить изменение размера облака, не имеющего четких границ, с погрешностью менее одного пикселя матрицы фотоприемника крайне проблематично. К дополнительным недостатком описанных методов можно отнести необходимость применения двух фотоприемников, причем с высоким пространственным разрешением.

Если исходить из принципа минимизации стоимости используемого для наблюдения оборудования, то стоит обратить внимание на работу [24], в которой для измерения достаточно использовать только одну, но работающую в ближнем ИК – диапазоне твердотельную матрицу – микроболометр с разрешением 240 x 320 пикселей. Высота нижней границы в этой работе рассчитывается через смещение изображения облака за фиксированный временной интервал и через скорость его перемещения, которая не измеряется, а берется либо со спутниковых данных, либо полагается равной скорости ветра, вертикальные профили скорости и направления которого, а также профиль влажности берутся с ближайшей метеостанции, где они измеряются дважды в сутки. Профили направления ветра и влажности воздуха используются для исключения неоднозначности получаемого решения из-за того, что на разных высотах скорость ветра может существенно отличаться как по величине, так и по направлению.

Хотя авторы публикации и получили погрешность определения высоты нижней границы около 10%, можно предположить, что из-за невозможности получения информации о вертикальных профилях параметров атмосферы непосредственно в месте и во время измерения эта погрешность может существенно возрасти. Кроме того, при слабом ветре погрешность метода значительно возрастает, а при отсутствии ветра (что, правда, маловероятно на больших высотах) метод становится полностью неработоспособным.

Из всех перечисленных методов наиболее простыми являются методы, определяющие высоту нижней границы облачности по параметрам окружающей среды и типу облачного покрова [6,18,19]. С одной стороны, они основаны на результатах многолетних наблюдений, а с другой

стороны, имеют достаточно строгое теоретическое обоснование [19] и обеспечивают вполне приемлемую точность измерения.

Постановка задачи. Основной целью данной работы являлась разработка экспериментальной установки, которая бы при минимуме программно-аппаратных затрат позволяла непрерывно или хотя бы в светлое время суток получать максимум информации о состоянии облачного покрова в месте ее расположения. Такая установка может быть легко воспроизведена энтузиастами – любителями и быть подключена к многоточечной сети экологического мониторинга, подобной описанной в работах [20-22] для последующего использования получаемых с нее данных для проведения научных исследований в области климатологии и метеорологии. Особенно такая установка может заинтересовать тех, кто имеет частные метеостанции, уже подключенные к какой-либо системе сбора данных, подобной, например, системе Intellicast (Wunderground) [25], в которую входит свыше 250000 персональных метеостанций.

Методы исследования. Как уже было отмечено, лучше всего для такого решения подходят пассивные методы косвенного измерения через температуру и влажность воздуха, т.к. в простейшем варианте для их реализации достаточно в месте замера установить измеритель относительной влажности и датчик температуры, которые, как правило, уже имеются на метеостанциях. Так например, по методу дефицита точки росы, предложенному У. Феррелем, Д.Л. Лайхтманом и др. [6], минимально возможная высота границы облачности H в метрах для облаков вертикального развития задается выражением

$$H = 122 \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta T = t - td$, t – температура воздуха, td – точка росы, легко рассчитываемая через относительную влажность воздуха по известным из физики формулам.

Однако, на практике нужно знать не минимально возможную, а фактическую высоту для конкретного облака, которая, как известно, при одной и той же влажности будет различной для различного типа облаков. Поэтому вместо (1) применяются формулы Д.Л. Лайхтмана [6]:

$$H = A \cdot (B - \lg f), \quad (2)$$

или А.Н. Ипполитова [6]:

$$H = C \cdot (D - f), \quad (3)$$

где f – выраженная в процентах относительная влажность воздуха, а постоянные коэффициенты зависят от типа облаков. Например, для конвективной облачности в (2) нужно задать $A = 3780$, а $B = 2$. Несмотря на простоту, данные методы обеспечивают нахождение фактических минимальных значений высот нижних границ облаков разного типа с погрешностью не более 5-20%, что для обозначенной цели применения вполне приемлемо. При этом использовать последнее выражение предпочтительнее, так получаемые с его помощью результаты менее чувствительны к точности определения типа облаков и имеют меньшую погрешность для комбинированных типов облаков [6].

Таким образом, задача сводится к выяснению наличия облаков на небесной сфере и определению типа облачного покрова, то есть к задаче распознавания образов. Из аппаратного же обеспечения достаточно использовать подключенные к компьютеру датчик влажности и любую типовую web – камеру. При необходимости ведения круглосуточного мониторинга web – камеру потребуется заменить на чувствительную в ИК области спектра матрицу фотоприемников, подобную используемой в работе [24]. В данной работе в экспериментах использовалась web – камера Genius Web Cam Q-CAM 6000 с максимальным разрешением 1920x1080 и датчик влажности DHT22, подключенный к компьютеру через OEM – модуль Arduino – Uno.

Методы исследования. Алгоритм идентификации типа облачного покрова. Изначально предполагалось использование для идентификации типа облаков нейронную сеть, подобно тому, как это было реализовано в работе [26]. Однако проведенный анализ и предварительные эксперименты показали, что для получения хороших результатов в реальном масштабе времени при использовании нейронных сетей потребуется применять достаточно высокопроизводительные компьютеры. Учитывая же, что в реализуемой методике определения нижней границ облачности достаточно классифицировать облака только на три типа (кучевые, слоистые и перистые), было решено использовать для идентификации более простые и менее требовательные к вычислительным ресурсам методы, основанные на обработке контуров облаков, образованных их границами или неоднородностями изображений. Это позволило значительно сократить объем обрабатываемой информации за счет выделения на изображении только наиболее характерных и существенных признаков. Для выделения контуров на изображении небосвода выделялись участки с облаками, затем для них выполнялось оконтуривание и далее по форме контуров принималось решение о типе облака.

Для выделения содержащих облака участков изображения оно бинаризовалось либо с применением фиксированного порога, рассчитываемого по алгоритму Otsu [27], либо методом адаптивной бинаризации. Для выбора метода бинаризации все изображение разбивалось на $4 \times 4 = 16$ сегментов, вычислялось суммарное значение яркостей элементов для каждого из них, максимальная разность суммарных яркостей между смежными сегментами и разность суммарных яркостей между самым засвеченным и самым затемненным сегментом. Разность суммарных яркостей смежных сегментов можно интерпретировать как некоторый усредненный градиент, поэтому по этой величине можно судить о степени контрастности изображения. При этом максимальный перепад суммарных яркостей сегментов дает картину о степени неравномерности освещенности всей сцены изображения. Если отношение максимальной разности суммарной яркости смежных сегментов к максимальному перепаду суммарных яркостей сегментов превышало значение 0.5, выполнялась как менее ресурсоемкая Otsu - бинаризация изображения, в противном случае использовалась адаптивная бинаризация. Примеры бинаризованных изображений показаны на рис. 1 и 2.

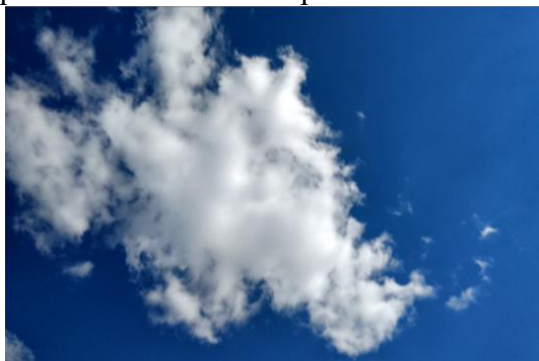


Рис.1. Исходное изображение и его Otsu – бинаризация
Fig. 1. Original image and its Otsu - binarization

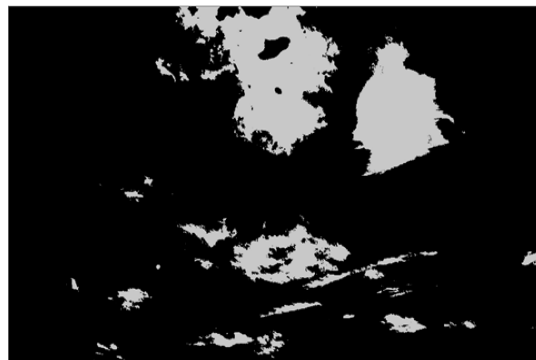
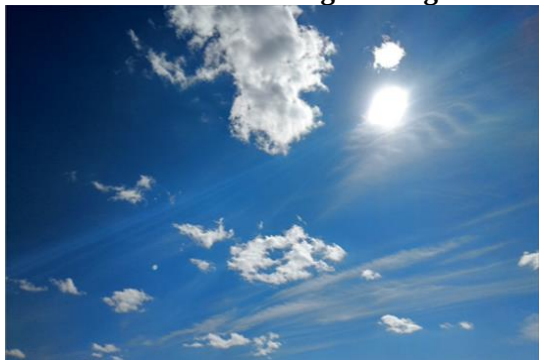


Рис. 2. Исходное изображение и его адаптивная бинаризация
Fig. 2. The original image and its adaptive binarization

На полученном после бинаризации изображении на светлых участках исключались внутренние темные области, с помощью операции дилатации и последующей эрозии из изображения исключались также мелкие элементы, сглаживались края выделенных участков, подсчитывалось их число, находились размеры, искусственно незначительно увеличивались размеры участков. Полученное после этих процедур бинарное изображение использовалось в качестве маски для выделения на изображении содержащих облака участков для последующей обработки.

На следующем этапе на выделенном изображении выполнялось выделение границ облаков. Для этого были рассмотрены алгоритмические реализации на основе оператора Кэнни и Собеля [28-30]. Однако анализ этих алгоритмов и проведенные эксперименты по их применению к реальным изображениям показали, что алгоритм на основе оператора Кэнни предпочтительнее, так как его реализация в библиотеке OpenCV [28] включает в себя операции замыкания и утончения контуров, что упрощает последующую обработку изображения. Примеры работы оператора Кэнни приведен на рис. 3.

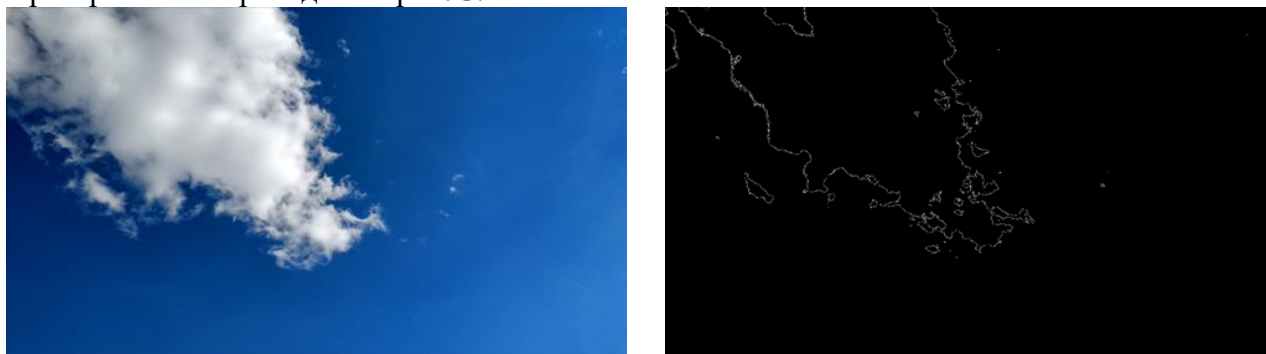


Рис.3. Результат работы оператора Кэнни
Fig. 3. The result of the Canny operator

На заключительной стадии производилось определение типа облаков, для чего использовались такие классификационные признаки, как количество выделенных при бинаризации участков, плотность их расположения, доли площади в кадре, занимаемые всеми выделенными облаками и самым большим облаком, взаимное расположение облаков друг относительно друга, а также форма облаков.

Для упрощения анализа формы облака и ряда других характеризующих изображение параметров было предложено аппроксимировать не более пятнадцати самых больших по площади облаков эллипсом.

В качестве критерия точности аппроксимации использовался интеграл по контуру эллипса от квадрата расстояния между контуром эллипса и контуром облака. В случае возникновения неоднозначности решения выбирался вариант с наименьшей площадью. Расстояние между линиями контура эллипса и облака определялось по линии, совпадающей с линией радиуса, проведенного из центра эллипса в сторону соответствующей точки контура. Если в этом направлении контур облака пересекался многократно, в расчет принималось среднее расстояние между точкой на контуре эллипса и точками пересечения линии с линиями контура.

В качестве критерия плотности расположения облаков бралась величина, обратная отношению суммы кратчайших расстояний между контуром эллипса с наибольшей площадью и контурами пяти (при их наличии) ближайших к нему (по расстоянию между центрами) эллипсов других облаков к суммарному расстоянию между центрами выделенных эллипсов.

Обсуждение результатов. В соответствии с перечисленными критериями для идентификации типа облаков были сформулированы следующие признаки.

1. Кучевые облака (рис.4): количество облаков с большой площадью невелико (от одного до двух штук, реже больше) и они имеют эллипсы с близким к единице эксцентриситетом, общая занимаемая облаками в кадре площадь – низкая, и мелкие эллипсы (при их наличии) приближаются к большим.



Рис.4. Процесс обработки изображения (приведенного на рис.3) для кучевых облаков
Fig. 4. The image processing process (shown in Fig. 3) for cumulus clouds

2. Слоистые облака (рис. 5): имеют эксцентриситет аппроксимирующих эллипсов, лежащий в интервале 0.25-0.75, большую долю площади кадра, занимаемую облаками и высокую плотность их расположения.

3. Перистые облака (рис. 6): большое число незначительно отличающихся по площади облаков с низким, лежащим в интервале 0.05-0.3 значением эксцентриситета аппроксимирующих их эллипсов, большие оси которых почти параллельны, и со средней или низкой плотностью их расположения.

Для оценки достоверности идентификации было обработано по 25 кадров с изображениями облаков каждого из рассмотренных типов.

Для всех трех типов ошибки первого и второго рода не превысили 5-10%, причем для перистых облаков их значение было минимально. Однако, согласно Международному атласу облаков всемирной метеорологической организации, существует более 100 типов облаков, которые, в зависимости от выбранного классификационного признака (внешний вид, характер образования, высота размещения), подразделяют на 5-10 основных типов.

Применительно к решаемой задаче уместнее было бы использовать классификацию, основанную не на морфологических признаках, а на месте их преимущественного размещения (облака нижнего, среднего, верхнего яруса и, возможно, вертикального развития). И, как оказалось, на одной и той же высоте могут оказаться облака с сильно различной формой, тогда как облака одного типа (кучевые и их разновидности) могут образовываться на разных высотах. Другой проблемой является возможность появления в кадре различных типов облаков, размещенных на разных ярусах.

Отсюда вытекает необходимость дальнейшего развития данных исследований, с целью совершенствования предложенной методики для решения указанных проблем.

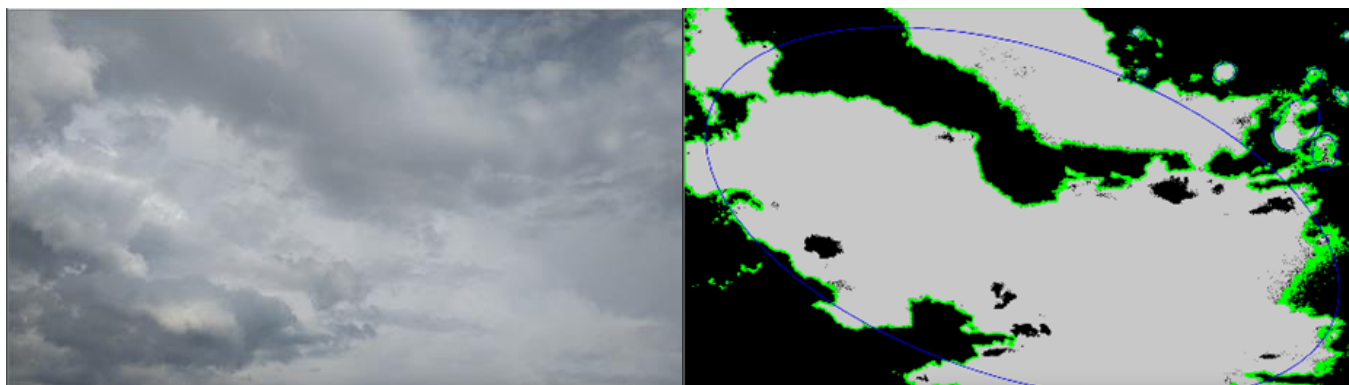


Рис.5. Процесс обработки изображения слоистых облаков
Fig. 5. Image processing process for layered clouds

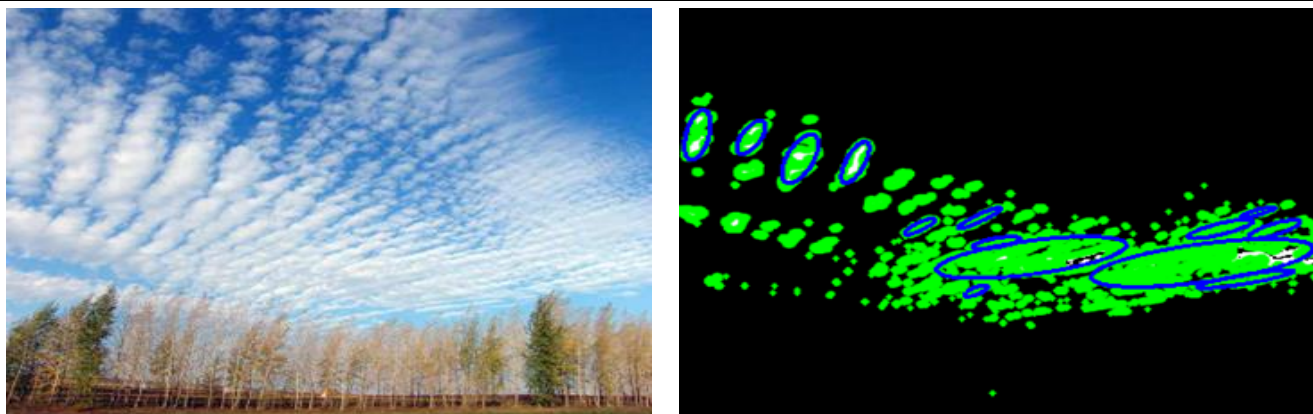


Рис.6. Процесс обработки изображения перистых облаков
Fig. 6. Cirrus Clouds Image Processing Process

Алгоритм для определения скорости и направления движения облаков. В большинстве работ, посвященных дистанционному измерению скорости перемещения объектов по их изображениям (в том числе и облаков [24]), используются корреляционные методы. Однако, такие методы имеют высокую вычислительную сложность, и, следовательно, весьма требовательны к вычислительным ресурсам. Поэтому в данной работе было предложено определять скорость облаков по смещению описывающих их характерных точек, общих для исходного изображения и изображения со смещенными и несколько деформированными облаками.

Для нахождения этих точек был использован алгоритм SURF [28] как наиболее быстрый и точный на сегодняшний день. Данный алгоритм для каждой выделенной характерной точки изображения формирует дескриптор, хранящий значение градиента в этой точке (его модуль и направление). Сравнение дескрипторов точек для разных кадров позволяет выделить для них общие точки. Пример работы данного алгоритма представлен на рис. 7,8.



Рис.7. Выделенные на изображении облака ключевые точки
Fig. 7. Key points highlighted in the cloud image

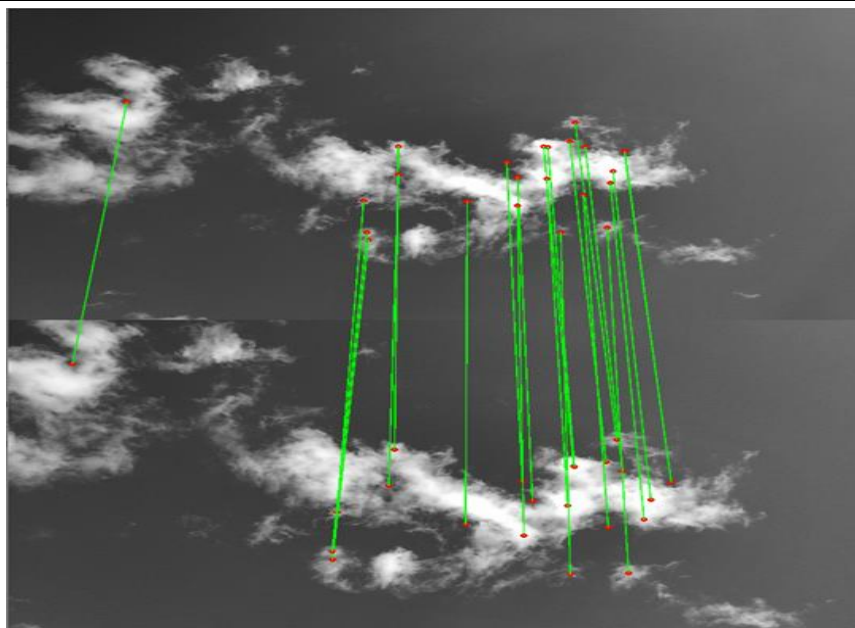


Рис.8. Смещение ключевых точек при движении облака

Fig. 8. Offset of key points when the cloud moves

Сначала для каждой точки рассчитывается вектор скорости ее перемещения в кадре изображения, затем находится среднее значение векторов скорости по всему кадру и далее, зная угол визирования, фокусное расстояние оптической системы и высоту облака, относительная его скорость в кадре изображения пересчитывается в абсолютную скорость по известным законам физики и оптики.

Вывод. Предложенная в работе максимально простая и требующая минимального набора простейшего оборудования методика позволяет пусть с достаточно большой погрешностью, достигающей 20%, определять основные параметры облачного покрова без привлечения не всегда имеющейся для конкретного места наблюдения информации о метеорологической обстановке и иных сведений о свойствах окружающей среды.

Это позволяет значительно расширить число мест наблюдения за состоянием облачного покрова, и соответственно, предоставить большой объем дополнительной информации, столь актуальной при проведении исследований в области климатологии и метеорологии.

В заключение автор выражает искреннюю признательность бывшему магистранту Алтайского государственного технического университета К. Уварову за неоценимую помощь в разработке программно-технического обеспечения и проведении экспериментальных исследований.

Библиографический список:

1. Крутиков, В. А., Полищук Ю. М. Геоинформационное обеспечение мониторинга окружающей среды и климата // Оптика атмосферы и океана. 2002. №1. С. 12-20
2. Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере земли, расчеты, измерения, интерпретация // СПб, Изд-во НИИХ СПбГУ, 2002. 350 с.
3. Nuijens L., Siebesma A.P. Boundary Layer Clouds and Convection over Subtropical Oceans in our Current and in a Warmer Climate //Current Climate Change Reports. 2019. vol.5. No. 2, pp.80-94. DOI: 10.1007/s40641-019-00126-x
4. Yue Q., Kahn B.H., Fetzer E.J. et al. Temporal and Spatial Characteristics of Short-Term Cloud Feedback on Global and Local Interannual Climate Fluctuations from A-Train Observations // Journal of Climate. 2019. vol. 32. No. 6. pp.1875-1893 DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0335.1
5. McCoy D.T., Eastman R., Hartmann D. L., Wood R. The change in low cloud cover in a warmed climate inferred from AIRS, MODIS, and ECMWF-Interim reanalysis// J. Climate. 2017. vol. 30, pp.3609-3620. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0734.1.
6. Абрамович К.Г. Об изменчивости высоты нижней границы облаков //Метеорология и гидрология. – 1968. - № 5. - С.30-41.
7. Киселев, В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы):учеб. издание. - СПб: РГГМУ. - 2004. - 429 с

8. Kumar A., Kim H., Hancke G.P. Environmental Monitoring Systems: A Review// IEEE Sensors Journal.- 2013.- vol.13, № 4. - pp.1329 -1339. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2233469
9. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Environmental Monitoring and Characterization. - Academic Press, 2004, 410pp DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0
10. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
11. Yakunin M.A., Yurchenko A.V. MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels// Technical Physics. 2015. vol. 60, No. 1. pp. 141-144
12. Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2015. vol. 8. №2. pp. 224-229
13. Yakunin M.A., Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// В сб.: Измерение, контроль, информатизация. Материалы XIV Международной научно-технической конференции. Барнаул. 2013. С. 24-26.
14. Федорцев Р. В., Каролик Е.П., Кудряшов А.А. Алгоритм расчета высоты нижней границы облаков // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. - 2010. - №5. - С. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
15. Демин А.В., Константинов К.В. Имитационная модель оптико-электронного измерителя высоты нижней границы облака // В сб. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - №2, СПб.: СПбГУ ИТМО, - 2009. - с. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronno-go-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka>
16. Атлас облаков / Под ред. А. Х. Хргиана, Н. И. Новожилова. Л.: Гидрометеиздат. - 1978. - 266 с
17. Патент РФ № 2321029 Способ определения высоты, направления и скорости движения нижней границы облачности / Зуев С. В., опубл.27.03.2008, Бюл. № 9
18. Анискин Л.В., Боровиков А.А., Персин С.М. Исследование изменчивости высоты нижней границы облаков // Труды ГГО. - 1987. - №512. - с. 92-107
19. Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б. Нижняя граница облачности // В сб. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", вып.3., Т1.- М.: ИКИ РАН. - 2006. - С. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-263-269.pdf>
20. Сучкова Л.И., Хуссейн Х.М., Якунин М.А., Якунин А.Г., Юрченко А.В. Многоточечная система дистанционного мониторинга пространственно-распределенных динамических процессов// Контроль. Диагностика. - 2013. - № 13. - С. 95-101
21. Yakunin A.G., Hussein H.M. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.- 2017. - vol.881. DOI: 10.1088/1742-6596/881/1/012028
22. Hussein Sh. M., Yakunin A.G. Development of a Lossless Data Compression Algorithm for Multichannel Environmental Monitoring Systems//14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 PROCEEDINGS: Novosibirsk, 2018. - vol.1, part 2. – pp.483-486. Publ.in IEEE Xplore 29 nov. 2018. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546121
23. Патент РФ № 2377612 Моностабильный способ определения высоты нижней границы облачности / Зуев С. В., опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36
24. Hirsch, E., Agassi, E., and Koren, I.: A novel technique for extracting clouds base height using ground based imaging, Atmos. Meas. Tech., 2011.- vol 4, issue 1, 117-130, DOI: 10.5194/amt-4-117-2011.
25. Сеть персональных метеостанций - <https://www.wunderground.com/weatherstation/overview.asp>
26. Wu Z., Xu X., Xia M., Meifang Ma, Li L. Ground-based vision cloud image classification based on extreme learning machine//The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, 9, 2877-2885DOI: 10.2174/1874110X01509012877URL<https://pdfs.semanticscholar.org/3091/db903893b1ce8edee83ec59dd4b600f4e8fc.pdf>
27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms// IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : Journal. - 1979. vol. 9. pp. 62-66.
28. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing, 4th Edition . Pearson Education Ltd,2018. 1192p
29. Открытая библиотека OpenCV. URL: <http://opencv.org>
30. Бакут П.А., Колмогоров Г.С., Ворновицкий И.Э. Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С.25-47.

References:

1. Krutikov, V. A., Polishchuk YU. M. Geoinformatsionnoye obespecheniye monitoringa okruzhayushchey sredy i klimata // Optika atmosfery i okeana. - 2002. - №1. - С. 12-20 [Krutikov, V. A., Polishchuk Yu. M. Geoinformation support for monitoring the environment and climate // Optics of the atmosphere and ocean. 2002. No. 1. pp. 12-20 (In Russ)]
2. Vasil'yev A.V., Mel'nikova I.N. Korotkovolnovoye solnechnoye izlucheniye v atmosfere zemli, raschety, izmereniya, interpretatsiya // Spb, Izd-vo NIIKH SPbGU, 2002. - 350 s. [Vasiliev A.V., Melnikova I.N. Short-wave solar radiation in the earth's atmosphere, calculations, measurements, interpretation // St. Petersburg, NIIH SPbU, 2002. 350 p. (In Russ)]

3. Nuijens L., Siebesma A.P. Boundary Layer Clouds and Convection over Subtropical Oceans in our Current and in a Warmer Climate // Current Climate Change Reports. 2019/ vol.5. № :2, pp.80-94. DOI: 10.1007/s40641-019-00126-x
4. Yue Q., Kahn B.H., Fetzer E.J. at all. Temporal and Spatial Characteristics of Short-Term Cloud Feedback on Global and Local Interannual Climate Fluctuations from A-Train Observations // Journal of Climate. – 2019. – vol. 32. №6.pp.1875-1893. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0335.1
5. McCoy D.T., Eastman R., Hartmann D. L., Wood R. The change in low cloud cover in a warmed climate inferred from AIRS, MODIS, and ECMWF-Interim reanalysis// J. Climate. 2017. vol. 30, pp.3609-3620. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0734.1.
6. Abramovich K.G. Ob izmenchivosti vysoty nizhney granitsy oblakov //Meteorologiya i gidrologiya. – 1968. - № 5. - S.20-41. [Abramovich K.G. On the variability of the height of the lower boundary of clouds // Meteorology and Hydrology. - 1968. - No. 5. pp.30-41(In Russ)]
7. Kiselev, V.N., Kuznetsov A.D. Metody zondirovaniya okruzhayushchey sredy (atmosfera):ucheb. izdaniye. - SPb: RGGMU. - 2004. - 429 s [Kiselev, V.N., Kuznetsov A.D. Methods of sensing the environment (atmosphere): textbook. edition. - St. Petersburg: Russian State Medical University. 2004 . 429 p. (In Russ)]
8. Kumar A., Kim H., Hancke G.P. Environmental Monitoring Systems: A Review// IEEE Sensors Journal.- 2013.- vol.13, № 4. - pp.1329 -1339. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2233469
9. Artiola J.F., Pepper I.L., Brusseau M.L. Environmental Monitoring and Characterization. - Academic Press, 2004, 410pp DOI: 10.1016/B978-0-12-064477-3.X5000-0
10. MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
11. Yakunin M.A., Yurchenko A.V. MODTRAN5 simulations of responses from MODIS spectroradiometer channels// Technical Physics. 2015. vol. 60, № 1. pp. 141-144
12. Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. - 2015. - vol. 8. - №2. - pp. 224-229 [Yakunin M.A. A hybrid method for evaluating absorbed solar energy at the surface level using remote sensing data // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2015. vol. 8. №2. pp. 224-229(In Russ)]
13. Yakunin M.A, Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// V sb.: Izmereniye, kontrol', informatizatsiya. Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. - Barnaul. - 2013. - S. 24-26. [Yakunin M.A, Yakunin A.G., Suchkova L.I., Hussein H.M. Lighting monitoring and its application in the radiation balance research// In: Measurement, control, informatization. Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference.-Barnaul. 2013. pp. 24-26. (In Russ)]
14. Fedortsev R. V., Karolik Ye.P., Kudryashov A.A. Algoritm rascheta vysoty nizhney granitsy oblakov // Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta: nauchno-tehnicheskii zhurnal. - 2010. - №5. - S. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [Fedortsev R.V., Karolik E.P., Kudryashov A.A. Algorithm for calculating the height of the lower boundary of the clouds // Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal. 2010. No. 5. pp. 32-36. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/1414/32-36.pdf?sequence=4&isAllowed=y>(In Russ)]
15. Demin A.V., Konstantinov K.V. Imitatsionnaya model' optiko-elektronnogo izmeritelya vysoty nizhney granitsy oblaka // V sb. Nauchno-tehnicheskii vestnik SPbGU ITMO. - №2, SPb.: SPbGU ITMO, - 2009. - c. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronnogo-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka> [Demin A.V., Konstantinov K.V. A simulation model of an optoelectronic measuring device for the height of the lower boundary of the cloud // In Sat. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University ITMO. No. 2, St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. pp. 33-38. <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-optiko-elektronnogo-izmeritelya-vysoty-nizhney-granitsy-oblaka> (In Russ)]
16. Atlas oblakov / Pod red. A. KH. Khrgiana, N. I. Novozhilova. L.: Gidrometeoizdat. - 1978. - 266 s [Atlas of the clouds / Ed. A. Kh. Khrgiana, N.I. Novozhilova. L.: Hydrometeoizdat. 1978. 266 p. (In Russ)]
17. Patent RF № 2321029 Sposob opredeleniya vysoty, napravleniya i skorosti dvizheniya nizhney granitsy oblachnosti / Zuyev S. V., opubl.27.03.2008, Byul. № 9 [RF patent No. 2321029 A method for determining the height, direction and speed of movement of the lower border of clouds / Zuev S.V., publ. March 27, 2008, Bull. Number 9(In Russ)]
18. Aniskin L.V., Borovikov A.A., Persin S.M. Issledovaniye izmenchivosti vysoty nizhney granitsy oblakov // Trudy GGO. - 1987. - №512. - c. 92-107 [Aniskin L.V., Borovikov A.A., Persin S.M. Study of the variability of the height of the lower boundary of the clouds // Proceedings of GGO. 1987. No. 512. pp. 92-107(In Russ)]
19. Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. Nizhnaya granitsa oblachnosti // V sb. "Sovremennyye problemy dantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa", vyp.3., T1.- M.: IKI RAN. - 2006. – S. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-263-269.pdf> [Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. The lower boundary of clouds // In Sat. "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space", issue 3., T1.- M.: IKI RAS. 2006. pp. 263-269. URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/pp/263-269.pdf> (In Russ)]
20. Suchkova L.I., Khusseyin KH.M., Yakunin M.A., Yakunin A.G., Yurchenko A.V. Mnogotochehnaya sistema dantsionnogo monitoringa prostranstvenno-raspredeleennykh dinamicheskikh protsessov// Kontrol'. Diagno-stika. - 2013. - № 13. - S. 95-101 [Suchkova L.I., Hussein H.M., Yakunin M.A., Yakunin A.G., Yurchenko A.V. Multipoint system

- for remote monitoring of spatially distributed dynamic processes // Control. Diagnostics. 2013. No. 13. pp. 95-101(In Russ)]
21. Yakunin A.G., Hussein H.M. Hardware-software and algorithmic provision of multipoint systems for long-term monitoring of dynamic processes // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.- 2017. – vol.881. DOI: 90.1088/1742-6596/881/1/012028
 22. Hussein Sh. M., Yakunin A.G. Development of a Lossless Data Compression Algorithm for Multichannel Environmental Monitoring Systems//14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 44894 PROCEEDINGS: Novosibirsk, 2018. - vol.1, part 2. – pp.483-486. Publ.in IEEE Xplore 29 nov. 2018. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546121
 23. Patent RF № 2377612 Monostaticheskiy sposob opredeleniya vysoty nizhney granitsy oblachnosti / Zuyev S. V., opubl. 27.12.2009, Byul. № 36 [RF patent No. 2377612 Monostatic method for determining the height of the lower border of cloudiness / Zuev S.V., publ. 12 nov. 2009, Bull. Number 36]
 24. Hirsch, E., Agassi, E., and Koren, I.: A novel technique for extracting clouds base height using ground based imaging, Atmos. Meas. Tech., 2011.- vol 4, issue 1, 117-130, DOI: 10.5194/amt-4-117-2011.
 25. Personal Weather Station Network - <https://www.wunderground.com/weatherstation/overview.asp> (In Russ)]
 26. Wu Z., Xu X., Xia M., Meifang Ma, Li L. Ground-based vision cloud image classification based on extreme learning machine //The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2015, 9, 2877-2885 DOI: 10.2174/1874110X01509012877URL<https://pdfs.semanticscholar.org/3091/db903893b1ce8edee83ec59dd4b600f4e8fc.pdf>
 27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms// IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : Journal. 1979. vol. 9. pp. 62-66.
 28. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing, 4th Edition .- Pearson Education Ltd,2018.-1192p
 29. Open library on image processing OpenCV. URL: <http://opencv.org> (In Russ)]
 30. Bakut P.A., Kolmogorov G.S., Vornovitskiy I.E. Segmentatsiya izobrazheniy: metody vydeleniya granits oblastey // Zarubezhnaya radioelektronika. 1987. № 10. S.25-47 [Bakut P.A., Kolmogorov G.S., Vornovitsky I.E. Image segmentation: methods for highlighting the boundaries of regions // Foreign Radioelectronics. 1987. No. 10. pp.25-47 (In Russ)]

Сведения об авторе:

Якунин Алексей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, вычислительной техники и информационной безопасности; e-mail: yakunin@agtu.secna.ru

Information about the author:

Alexey G. Yakunin, Dr. Sc. (Technical), Prof., Head of the Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security; e-mail: yakunin@agtu.secna.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.07.2019.

Принята в печать 07.09.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 18.07.2019.

Accepted for publication 07.09.2019.

Для цитирования: Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А., Сайдумов М.С., Омаров А.О. Разработка составов наполненных вяжущих на основе вторичного сырья для монолитных высокопрочных бетонов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):129-138. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138

For citation: A.Kh. Alaskhanov, T.S.-A. Murtazaeva, M.S Saidumov, A.O. Omarov. Development of compositions of Filled Insulators based on secondary raw for Monolithic high-strength Concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):129-138. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ НАПОЛНЕННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

Аласханов А.Х.¹, Муртазаева Т.С.-А.¹, Сайдумов М.С.¹, Омаров А.О.²

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет

имени академика М.Д. Миллионщикова,

364051, г. Грозный, пр.им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

Дагестанский государственный технический университет

²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Разработка составов наполненных вяжущих на основе вторичного сырья для монолитных высокопрочных бетонов. **Метод.** Методы исследования, принятые в работе, основываются на теоретических принципах и закономерностях проектирования и оптимизации полидисперсных многокомпонентных систем, фазо- и структурообразовании клинкерных минералов, логике математических расчетов, технологических особенностях структурообразования композиционных масс, теоретических принципах управления реологическими процессами строительных смесей. Все экспериментальные данные, представленные в работе, получены согласно методикам действующих нормативных документов (ГОСТ, рекомендаций и др.). **Результат.** В работе приводится анализ опыта применения вторичного сырья в виде продуктов разборки зданий и сооружений, технологии получения на их основе вторичных сырьевых материалов для бетона. Разработаны и исследованы рецептуры наполненных вяжущих с активностью 60-71 МПа с тонкодисперсными минеральными наполнителями из бетонного лома и кирпичного боя с соотношением 70:30 % соответственно. **Вывод.** Запроектированы оптимальные рецептуры высокоподвижных бетонных смесей с использованием местного природного и техногенного сырья с маркой по осадке конуса П5 и сохраняемостью более 8 часов для получения высокопрочных классов по прочности на сжатие до В60-В80 с уникальными эксплуатационными свойствами.

Работа выполнена в рамках исследований по реализации научного проекта № 18-48-200001 «Высококачественные бетоны с повышенными эксплуатационными свойствами на основе местного природного и техногенного сырья» получившего поддержку Российского фонда фундаментальных исследований» (РФФИ).

Ключевые слова: продукты разборки зданий и сооружений, бетонный лом, кирпичный бой, экология, утилизация, вторичный заполнитель, тонкомолотый наполнитель, наполненное вяжущее, бетоны, сохраняемость бетонных смесей, высокая прочность

BUILDING AND ARCHITECTURE

DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF FILLED INSULATORS BASED ON SECONDARY RAW FOR MONOLITHIC HIGH-STRENGTH CONCRETE

A.Kh. Alaskhanov¹, T.S.-A. Murtazaeva¹, M.S. Saidumov¹, A.O.Omarov²
¹Academician M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

¹100 Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives Development of compositions filled with binders based on recycled materials for monolithic high-strength concrete. **Method** The research methods adopted in the work are based on the theoretical principles and laws of designing and optimizing polydisperse multicomponent systems, the phase and structure formation of clinker minerals, the logic of mathematical calculations, the technological features of the structure formation of composite masses, the theoretical principles of controlling the rheological processes of mixes. All experimental data presented in the work were obtained according to the methods of current regulatory documents (GOST, recommendations, etc.). **Result** The paper provides an analysis of the experience of using recycled materials in the form of products of demolition of buildings and structures, the technology for producing secondary raw materials for concrete on their basis. Formulations filled with binders with an activity of 60-71 MPa with finely dispersed mineral fillers from concrete scrap and brick combat with a ratio of 70:30%, respectively, were developed and investigated. **Conclusion** The optimal formulations of highly mobile concrete mixtures were designed using local natural and technogenic raw materials with a grade of P5 cone sediment and persistence for more than 8 hours to obtain high-strength classes of compressive strength up to B60-B80 with unique operational properties.

Acknowledgment The work was performed as part of research on the implementation of the research project № 18-48-200001 "High-quality concretes with enhanced performance properties based on local natural and technogenic raw materials" received support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR).

Keywords: Building demolition products, concrete scrap, brick fights, ecology, recycling, secondary aggregate, fine ground aggregate filled with binder, concrete, concrete mixture persistence, high strength

Введение. Сырьевая база Чеченской Республики включает в себя самые разнообразные запасы природного и техногенного (вторичного) сырья, необходимые для обеспечения устойчивого функционирования и развития строительной индустрии в регионе. В горных районах залегают мергели, природный гипс и ряд других сырьевых материалов, пригодных для производства цемента, которые в настоящее время используется на действующем цементном заводе ГУП «Чеченцемент».

Значительные запасы мелких кварцевых песков с модулем крупности $M_k = 0,7-1,3$ сосредоточены в Толстой-Юртовском, Веденском, Дачу-Барзоевском и Беноевском районах республики. Также в регионе накоплены большие объемы многотоннажных отходов техногенной деятельности – отходы разборки зданий и сооружений, образованные после военных событий в 90-е и в начале 2000-х гг., которые в основном представляют собой бетонный, железобетонный лом и кирпичный бой.

Постановка задачи. Возможность повторного применения в технологии строительного материаловедения продукта дробления бетонного лома и кирпичного боя вызывает большой интерес, в частности его использования в качестве тонкомолотого минерального компонента в смешанных или так называемых наполненных вяжущих, характеризующихся улучшенными технологическими и физико-механическими свойствами, на основе использования которых

можно получать высокопрочные бетоны, в том числе и для монолитного высотного строительства.

Методы исследования. В исследуемых составах бетонов в качестве мелкого заполнителя использовался природный песок Червленского месторождения Чеченской Республики со следующими характеристиками: модуль крупности $M_k = 1,8-1,9$; пустотность – 40,8 %; содержание пылевидных и глинистых частиц – 1,7-1,9 %; плотность $\rho_{ист.} = 2617 \text{ кг/м}^3$; плотность $\rho_{нас.} = 1512 \text{ кг/м}^3$.

Для обогащения местного песка в отдельных испытаниях применялся природный песок Алагирского месторождения из РСО-Алания со следующими характеристиками: модуль крупности $M_k = 2,8-3,2$; пустотность – 44,9 %; содержание пылевидных и глинистых частиц – 0,85 %; плотность $\rho_{ист.} = 2688 \text{ кг/м}^3$; плотность $\rho_{нас.} = 1467 \text{ кг/м}^3$.

В качестве крупного заполнителя использовался местный щебень из гравия фракций 5-20 мм с Аргунского и Серноводского месторождений Чеченской Республики и привозной щебень фракции 5-20 мм из гранитно-диабазовых пород Алагирского месторождения РСО-Алания. В качестве вяжущего в экспериментальных исследованиях использовался бездобавочный портландцемент марки ПЦ 500 Д0 производства ГУП «Чеченцемент» (Чеченская Республика, с. Чири-Юрт) с НГ = 25,5 %, удельной поверхностью $3252 \text{ см}^2/\text{г}$, водоотделением $\leq 18 \%$ и сроками схватывания 2 час. 15 мин. (начало) и 3 час. 40 мин. (конец).

В сравнительных испытаниях применялся «Новоросцемент» марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Верхнебаканский цементный завод» (г. Новороссийск, п. Верхнебаканский) с НГ = 26,2 %, удельной поверхностью $3125 \text{ см}^2/\text{г}$, водоотделением 15,6 % и сроками схватывания 2 час. 25 мин. (начало) и 3 час. 45 мин. (конец).

Минералогические составы указанных вяжущих следующий:

1. Чеченцемент: $C_3S = 59 \%$; $C_2S = 16 \%$; $C_3A = 8 \%$; $C_4AF = 13 \%$;
2. Новоросцемент: $C_3S = 61 \%$; $C_2S = 11 \%$; $C_3A = 4 \%$; $C_4AF = 13 \%$.

В качестве пластифицирующих добавок в соответствии с ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» использовались современные добавки следующих производителей строительной химии от:

1. Компании «ПОЛИПЛАСТ» – суперпластификатор (СП) «Линамикс ПК» и замедлитель твердения «Линамикс РС» на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты, жидкость;
2. Компании «МС-Bauchemie» – гиперпластификатор «МС-PowerFlow» на основе новейшей технологии эфиров поликарбоксилатов МС, жидкость;
3. Компании «Sika» – СП «SikaViscoCrete 5-600 SK» на основе поликарбоксилатных эфиров, удовлетворяющий требованиям ТУ № 2493-005-13613997-2008, жидкость;
4. Предприятию ООО «ТОКАР» (г. Владикавказ) – комплексная полифункциональная добавка «Д-5», удовлетворяющая требованиям ГОСТ 24211-2008, сухой порошок.

Сырьем для получения дисперсных минеральных наполнителей техногенной природы (МНТП) послужили доступные местные материалы, в основном, техногенной природы, а именно бетонный лом, керамический кирпичный бой (ККБ), золошлаковая смесь Грозненской ТЭЦ и в сравнительных испытаниях применялись очень мелкие некондиционные кварцевые пески.

Все МНТП измельчались в течение 5 минут в лабораторной вибрационной шаровой мельнице «МВ-20-ЭКС» с объемом загрузки 5-6 литров до получения удельной поверхности $450-600 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Химический состав исходного сырья, а также макро- и микроструктура бетонных образцов исследовались с помощью дисперсионно-энергетического спектрометра (ДЭС) растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200i с интегрированной системой микроанализа GenesisApex 2 EDS от EDAX.

Обсуждение результатов. С целью получения оптимальных рецептур высокопрочных бетонов с комплексным использованием местной сырьевой базы, в том числе и техногенной природы, были разработаны составы наполненных вяжущих (НВ) с тонкомолотым минераль-

ным наполнителем техногенной природы (МНТП), позволяющих получить высокопрочный цементный камень с заметно меньшими по размеру порами и меньшей усадкой (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Рецепттура наполненных вяжущих с тонкомолотым минеральным наполнителем техногенной природы

Table 1. Formulation of filled binders with a finely ground mineral filler of technogenic nature

Вид вяжущего Type of binder	Состав НВ, % по массе Composition НВ,% by weight			
	ПЦ М500 Д0 «Чеченцемент»	МНТП		Добавка Additive Д-5
		из бетонного лома concrete scrap	из ККБ	
Наполненное вяжущее марки НВ-75:25 Filled binder grade НВ-75: 25	75	16	7	2
Наполненное вяжущее марки НВ-60:40 Filled binder grade НВ-60:40	60	27	11	2

Таблица 2. Свойства наполненных вяжущих с тонкомолотым минеральным наполнителем техногенной природы

Table 2. Properties of filled binders with a finely ground mineral filler of technogenic nature

Наименование вяжущего Type of binder	НГ, %	S _{уд} вяжущего, м ² /кг astringent	Истинная плот- ность, True density, kg / m ³ кг/м ³	Водоотделение, Water separation, %	Сроки схватывания, час. - мин. Setting time hour. - min		Активность, МПа Activity, МПа
					начало start	конец end	
НВ-75:25	17	558	2986	15,5	3-40	5-30	71,3
НВ-60:40	19	577	2905	14,7	3-55	5-35	60,7
ПЦ М500 Д0 ГУП «Чеченцемент» (для сравнения)	26	325	3115	18,0	2-15	3-40	52,6

В связи с тем, что для проектирования подземной части МФК «Ахмат Тауэр» заложены бетоны разных классов по прочности (В40, В75-В80), в работе поставлена задача разработать линейку составов высококачественных бетонов (ВКБ), начиная от средних классов В40-В50 и заканчивая высокопрочными бетонами классов В80-В90, с комплексным использованием местного сырья, в том числе и техногенной природы.

Рецептуры ВКБ запроектированы марки по осадке конуса П5 (ОК = 22±2 см), как широко распространенной в современном высотном монолитном строительстве и не требующей интенсивного виброуплотнения, а в некоторых случаях, позволяющей бетонировать без дополнительного уплотнения. Составы и свойства высококачественных бетонных смесей повышенной сохраняемости и долговечности представлены в табл. 3. В качестве химических добавок использованы суперпластификатор «Линамикс ПК» и замедлитель твердения «Линамикс РС». Суперпластификатор «Линамикс ПК» дозировался в бетонных смесях на НВ в количестве от 0,3 до 0,4 % от массы цемента, т.е. в небольшом количестве, поскольку в составе НВ уже есть комплексная модифицирующая добавка Д-5, обладающая пластифицирующими свойствами. Добавка «Линамикс РС» дозировалась в количестве 0,7 % от массы цемента, и применялся в бетонных смесях повышенной сохраняемости (7-8 часов и более).

Таким образом, с использованием местного природного и техногенного сырья проектированы оптимальные рецептуры высокоэффективных бетонных смесей с маркой по осадке конуса П5 и сохраняемостью более 8 часов для получения ВКБ.

Таблица 3. Составы и свойства бетонных смесей на основе местного природного и техногенного сырья

Table 3. Compositions and properties of concrete mixtures based on local natural and technogenic raw materials

№ состава	Проектный класс бетона Design class (brand) of concrete	Требуемая прочность, Strength required MPa	Consumption of concrete components Расход компонентов бетонной смеси, кг/м ³								Mixture characteristics Характеристики смеси			
			Щебень Crushed stone		Песок Sand	Вяжущее Astringent		Вода Water	Добавка Additive		В/Ц	Density, Плотность, кг/м ³	ОК, см	Сохраняемость, Persistence час
			Аргунский	Серноводский	Червленский	НВ-60:40	НВ-75:25		Linamix Линамикс ПК (% от массы Ц)	Linamix Линамикс РС (% от массы Ц)				
1.	B30 (M400)	39,3	1000	-	855	385	-	161	1,1 (0,3)	2,5 (0,7)	0,45	2398	23	7,0
2.	B40 (M500)	52,4	1000	-	795	435	-	158	1,3 (0,3)	3,0 (0,7)	0,36	2407	21	7,0
3.	B45 (M600)	58,9	1000	-	765	470	-	162	1,4 (0,3)	3,3 (0,7)	0,34	2427	23	8,0
4.	B55 (M700)	72,0	-	1000*	735	-	540	161	1,6 (0,3)	3,8 (0,7)	0,31	2451	23	8,5
5.	B60 (M800)	78,6	-	1000*	685	-	600	165	1,8 (0,3)	4,3 (0,7)	0,30	2462	21	9,0
6.	B80 (M1000)	104,7	-	1000*	620	-	700	170	2,1 (0,3)	4,9 (0,7)	0,32	2481	24	10,0

Примечание: * – применялся обогащенный более прочный щебень фракции 5-20 мм с маркой по дробимости М1200;

Note: * - Enriched more durable crushed stone of a fraction of 5-20 mm with a grade of M1200 crushability was used;

На исследуемых нами составах ВКБ определялась прочность $R_{СЖ}^{1сут}$, $R_{СЖ}^{3сут}$, $R_{СЖ}^{7сут}$ и $R_{СЖ}^{28сут}$ с использованием контрольных образцов-кубов с ребром 10 см. Образцы до момента испытания выдерживали, как правило, в нормально-влажностных условиях ($\phi = 95 \pm 5 \%$, $t = 20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$). Призменная прочность на сжатие исследуемых нами составов ВКБ определялась в возрасте 28 суток на контрольных образцах-призмах размерами 100x100x400 мм. Результаты испытаний разработанных ВКБ на основе техногенного сырья представлены в табл. 4.

Из анализа показателей табл. 4 видно, что динамика набора прочности бетона на НВ заметно отличается от динамики роста прочности бетонов на ПЦ. Это хорошо видно на рис.1. Установлено, что процесс набора прочности бетонов на НВ в раннем возрасте (1-3 сут) ускоряется в 1,5-2 раза. Так, бетон на НВ в возрасте 1 сут имеет прочность около 33-36 % от проектного, а возрасте 3 сут – этот показатель достигает до 70 %. 7-ми суточная прочность бетона, полученного с использованием НВ, составляет около 85-90 % от проектного, что существенно выше показателей традиционных составов на обычном ПЦ. Эти показатели у бетонов на ПЦ в возрасте 1, 3 и 7 сут составляют около 24, 35 и 70 % от проектной прочности соответственно. Такое явление заметно быстрого роста прочности у бетонов на НВ объясняется особенностью добавки Д-5, входящей в состав наполненного вяжущего в количестве 2 % от его массы. Добавка Д-5, заметно увеличивающая подвижность бетонных смесей в первые часы ее приготовления (1-3 часа) благодаря своему пластифицирующему эффекту, уже в первые сутки в определенной степени переходит в роль «добавки-ускорителя». Такая особенность данной добавки делает ее полифункциональной (комплексной).

Таблица 4. Свойства высококачественных бетонов на основе сырья различной природы
Table 4. Properties of high-quality concrete based on raw materials of various nature

№ состава из табл. 4	Проектный класс (марка) бетона	ρ _б , кг/м ³	Прочность на сжатие в возрасте ..., МПа Compression strength at the age of ..., MPa					R _{пр} / R	R _{тб}	E _б ·10 ³ , МПа	Деформация ε, мм/м Deformation		Коеф. Пуассона μ	Усадка бетона, мм/м	W _М , % по массе	W	F
			R				R _{пр}				longitudinal продольная ε ₁	transverse поперечная ε ₂					
			1 сут day	3 сут day	7 сут day	28 сут day											
1.	B30 (M400)	2336	14,3	31,7	41,1	46,7	38,3	0,82	4,8	43,5	2,08	0,49	0,237	0,62	2,7	W14	F400
2.	B40 (M500)	2352	17,8	38,9	51,7	58,1	47,6	0,82	5,7	44,8	1,99	0,47	0,235	0,60	2,7	W14	F400
3.	B45 (M600)	2358	22,3	45,5	59,9	65,8	54,6	0,83	6,4	46,2	1,96	0,46	0,234	0,55	2,5	W16	F500
4.	B55 (M700)	2365	26,4	54,1	69,6	77,3	65,7	0,85	8,2	47,5	1,96	0,45	0,228	0,40	2,4	W18	F500
5.	B60 (M800)	2383	29,5	59,8	75,3	85,4	72,6	0,85	8,6	52,4	1,95	0,43	0,222	0,36	2,4	W20	F600
6.	B80 (M1000)	2408	40,9	81,8	106,1	115,3	99,2	0,86	9,7	54,5	1,90	0,40	0,210	0,31	2,2	W20	F600

Примечание: где ρ_b – плотность бетона, кг/м³; R – кубиковая прочность бетона при сжатии, МПа; $R_{\text{пр}}$ – призмическая прочность бетона при сжатии, МПа; $R_{\text{пр}} / R$ – отношение призмической прочности бетона к кубиковой, характеризующий его однородность; $R_{\text{тб}}$ – прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа; $E_b \cdot 10^3$ – модуль упругости бетона, МПа; ϵ – деформация бетона, мм/м; ϵ_1 – продольная деформация бетона, мм/м; ϵ_2 – поперечная деформация бетона, мм/м; μ – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации); W_M – водопоглощение бетона по массе, %; W – марка бетона по водонепроницаемости; F – марка бетона по морозостойкости.

Note: where ρ_b is the density of concrete, kg / m³; R is the cubic compressive strength of concrete, MPa; RPR - prize-winning concrete compressive strength, MPa; RPR / R - the ratio of the prismatic strength of concrete to cubic, characterizing its uniformity; Rtb – concrete tensile strength in bending, MPa; $E_b \cdot 10^3$ - modulus of elasticity of concrete, MPa; ϵ is the deformation of concrete, mm / m; ϵ_1 — longitudinal deformation of concrete, mm / m; ϵ_2 — transverse deformation of concrete, mm / m; μ is the Poisson's ratio (transverse strain coefficient); WM - concrete water absorption by weight, %; W - concrete grade for water resistance; F - concrete grade for frost resistance.

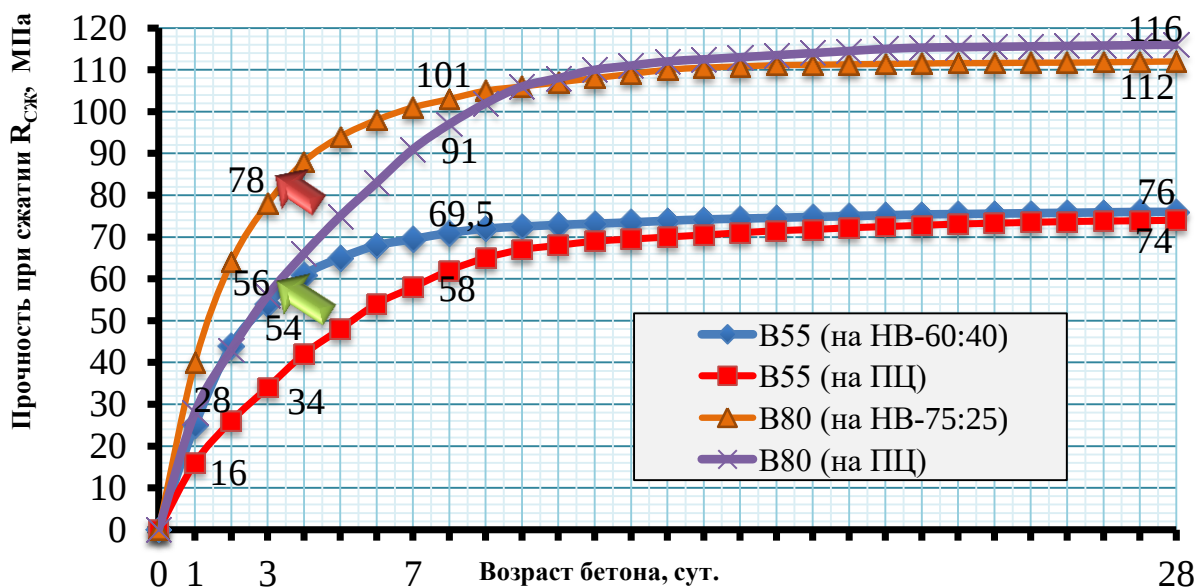


Рис.1. Оценка роста во времени прочностных характеристик бетона в зависимости от вида вяжущего

Fig. 1. Estimation of the growth in time of the strength characteristics of concrete depending on the type of binder

По результатам испытаний также установлено, что с переходом на НВ взамен традиционному ПЦ разница между кубиковой и призмочной прочностью заметно сокращается, что свидетельствует о более высокой однородности бетона на НВ в сравнении с составами на традиционном ПЦ. Так, коэффициент призмочной прочности (т.е. соотношение $R_{\text{пр}} / R$) у бетонов на НВ находится в пределах 0,82-0,86, когда у бетонов на традиционно применяемом ПЦ этот показатель ниже 0,78. При этом коэффициент призмочной прочности возрастает с увеличением активности наполненного вяжущего и снижением в нем доли МНТП (рис. 2).

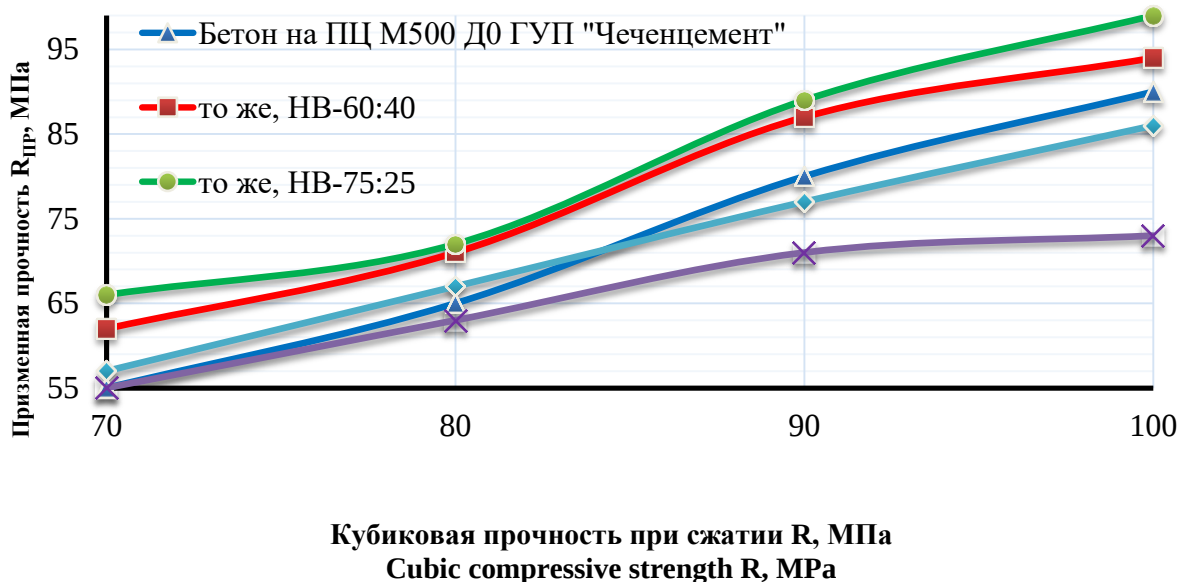


Рис.2. Зависимость призмочной прочности $R_{\text{пр}}$ от кубической R при использовании вяжущих различной природы

Fig. 2. Dependence of prismatic strength $R_{\text{пр}}$ on cubic R when using binders of various nature

В отечественной литературе [1-5] коэффициент $R_{\text{пр}} / R$ для бетонов средних классов принято определять с использованием следующей зависимости:

$$R_{\text{пр}} / R = (0,77 - 0,00125 R) \quad (1)$$

где R – кубиковая прочность, МПа;

$R_{\text{пр}}$ – призмочная прочность, МПа;

Зависимость (1), достаточно хорошо исследованная и апробированная на бетонах средних классов (до В50), касательно высокопрочных бетонов практически не исследована, за исключением небольшой группы ученых, в числе которой Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. и др. В Еврокодах для высокопрочных бетонов классов выше В60-В80 приведен постоянный коэффициент призмочной прочности, равный 0,8. О.Я. Берг в своих научных трудах приводит эту зависимость как $R_{\text{пр}} = f(R)$, и указывает, что она носит линейный характер. При этом, для тяжелых бетонов, включая высокопрочные, коэффициент призмочной прочности рекомендуется принимать постоянным, равным 0,78. Как видно из сравнительного анализа и рис. 2, полученные нами зависимости $R_{\text{пр}}/R=f(R)$ непротиворечат известным литературным данным. При этом установлено, что коэффициент призмочной прочности у бетонов на НВ значительно выше, чем у равнопрочных бетонов на ПЦ. Это свидетельствует о достаточно высокой степени однородности бетона на НВ.

Вывод. Разработаны и исследованы рецептуры наполненных вяжущих (НВ) с активностью 60-71 МПа с тонкодисперсными МНТП из бетонного лома и кирпичного боя с соотношением 70:30 % соответственно, при этом доля смеси наполнителя в НВ составило 25 и 40 % от массы вяжущего. Использование МНТП из бетонного лома обусловлено ее гидравлической активностью благодаря негидратировавшим зернам цемента в составе бетонного лома в количестве до 20-25 % от вяжущего, использованного при приготовлении утилизируемого бетона, которые, располагаясь между частицами НВ, заметно упрочняет цементный камень путем сни-

жения дифференциальной пустотности исходной водоцементной пасты в сторону более меньших по размеру пор и пустот, что обуславливает формирование цементной матрицы с меньшими размерами капиллярных пор.

Запроектированы оптимальные рецептуры высокоподвижных бетонных смесей с использованием местного природного и техногенного сырья с маркой по осадке конуса П5 и сохраняемостью более 8 часов для получения ВКБ классов по прочности на сжатие до В60-В80 с уникальными эксплуатационными свойствами. По результатам испытаний также установлено, что с переходом на НВ взамен традиционному ПЦ разница между кубиковой и призмочной прочностью заметно сокращается, что свидетельствует о более высокой однородности бетона на НВ в сравнении с составами на традиционном ПЦ. Так, коэффициент призмочной прочности (т.е. соотношение $R_{ПР} / R$) у бетонов на НВ находится в пределах 0,82-0,86, когда у бетонов на традиционно применяемом ПЦ этот показатель ниже 0,78. При этом коэффициент призмочной прочности возрастает с увеличением активности наполненного вяжущего и снижением в нем доли МНТП.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций [Текст] / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин [и др.]. М.: Изд-во АСВ, 2008. 350 с.
2. Баженов, Ю.М. Мелкозернистые бетоны из вторичного сырья для ремонта и восстановления поврежденных зданий и сооружений [Текст]: научное издание / Ю.М. Баженов, Д.К.-С. Батаев, Х.Н. Мажиев [и др.]. – Грозный: ИП «Султанбегова Х.С.», 2011. 342 с.
3. Батаев, Д.К.-С.. Рецептуры высокопрочных бетонов на техногенном и природном сырье / Д.К.-С. Батаев, М.С. Сайдумов, Т.С.-А. Муртазаева [и др.] // Актуальные проблемы современной строительной науки и образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию строительного факультета ФГБОУ ВО «ГТНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», 12-13 октября 2017 г. – Грозный: Бисултанова П.Ш., 2017. С.109-117.
4. Каприелов, С.С. Высокопрочный пневмобетон с добавкой микрокремнезема для защитных покрытий [Текст] / С.С. Каприелов, Н.Г. Булгакова // Бетон и железобетон. -1993. - №5. -С. 7-8.
5. Лесовик, В.С. Строительные композиты на основе отсеков дробления бетонного лома и горных пород [Текст]: научное издание / В.С. Лесовик, С.-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов. – Грозный: МУП «Типография», 2012. – 192 с.
6. Афонина, М.И. Особенности строительства спортивных сооружений на территориях бывших промышленных зон [Текст] / М.И. Афонина, Е.В. Козырева // В сборнике: Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры. 2017. С. 390-392.
7. Щербань, Е.М. Разработка состава пуццоланового цемента на вулканическом туфе [Текст] / Е.М. Щербань, С.А. Стельмах, А.К. Халюшев [и др.] // В сборнике: Строительство. Архитектура. Экономика. Материалы Международного форума "Победный май 1945 года": сборник статей. Министерство образования и науки Российской Федерации, Донской государственный технический университет, Профсоюз работников народного образования и науки Российской Федерации. 2018. С. 110-113.
8. Муртазаев, С.-А.Ю. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья [Текст]: научное издание / С.-А.Ю. Муртазаев, Д.К.-С. Батаев, З.Х. Исмаилова [и др.]. М.: «Комтехпринт», 2009. 142 с.
9. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит. –М.: Издательство ЛКИ, 2007. -296 с.
10. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст]: учеб.пособие для технолог. специальностей строит. Вуз / Ю.М. Баженов. - 3-е изд. –М.: АСВ, 2011. -500 с.
11. Удодов, С.А. Повторное введение пластификатора как инструмент управления подвижностью бетонной смеси // Сборник научных трудов Кубанского государственного технологического университета. -2015. - №9. -С. 175-185.
12. Стельмах, С.А. Влияние некоторых характеристик применяемого крупного заполнителя на свойства тяжелого бетона, предназначенного для изготовления центрифугированных изделий и конструкций [Текст] / С.А. Стельмах, Е.М. Щербань, К.В. Сердюков [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. -2017. -№ 10. -С. 15-20.
13. Корянова, Ю.И., Резанцев, Н.Е., Шумилова, А.С. Материалы и конструкции, используемые при строительстве высотных зданий - от традиций к новшествам // Аллея науки. 2018. Т.6. № 4 (20). С.95-99.
14. Солдатов, А.А. Опыт использования силиката натрия в качестве вяжущего вещества в производстве строительных материалов [Текст] / А.А. Солдатов, А.В. Галыч, И.В. Сариев [и др.] // 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. 186-188.

15. Усов, Б.А. Физико-химические процессы строительного материаловедения в технологии бетона и железобетона [Текст]: учеб. пособие для студентов по специальности 270106 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» / Б.А. Усов. -М.: Издательство МГОУ, 2009. 326 с.
16. Salamanova, M.Sh. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components / Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh. // В сборнике: Ibautil conference proceedings. 2018. С. 707-714.
17. Self-Consolidating Concretes with Materials of the Chechen Republic and Neighboring Regions / Madina Salamanova, Magomed Khubaev, Magomed Saidumov, Tamara Murtazayeva // International Journal of environmental & science education. 2017. Vol.11. №18. pp.12719-12724.

References:

1. Bazhenov, YU.M. Tekhnologiya betona, stroitel'nykh izdeliy i konstruktsiy [Tekst] / YU.M. Bazhenov, L.A. Alimov, V.V. Voronin [i dr.]. -М.: Izd-vo ASV, 2008. - 350 s. [Bazhenov, Yu.M. Technology of concrete, building products and structures [Text] / Yu.M. Bazhenov, L.A. Alimov, V.V. Voronin [et al.]. -М.: DIA Publishing House, 2008, 350 p. (In Russ)]
2. Bazhenov, YU.M. Melkozernistyye betony iz vtorichnogo syr'ya dlya remonta i vosstanovleniya povrezhdennykh zdaniy i sooruzheniy [Tekst]: nauchnoye izdaniye / YU.M. Bazhenov, D.K.-S. Batayev, KH.N. Ma-zhiyev [i dr.]. -Grozny: IP «Sultanbegova KH.S.», 2011. p342 s. [Bazhenov, Yu.M. Fine-grained concrete from recycled materials for repair and restoration of damaged buildings and structures [Text]: scientific publication / Yu.M. Bazhenov, D.K.-S. Bataev, H.N. Mazhiev [et al.]. Grozny: IE "Sultanbegova Kh.S.", 2011. 342 p. (In Russ)]
3. Batayev, D.K.-S. Retseptury vysokoprochnykh betonov na tekhnogennom i prirodnom syr'ye / D.K.-S. Batayev, M.S. Saydumov, T.S.-A. Murtazayeva [i dr.] // Aktual'nyye problemy sovremennoy stroitel'noy nauki i obrazovaniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu stroitel'nogo fakul'teta FGBOU VO «GGNTU im. akad. M.D. Millionshchikova», 12-13 oktyabrya 2017 g. Grozny: Bisultanova P.SH., 2017. - S.109-117. [Bataev, D.K.-S. Formulations of high-strength concrete on technogenic and natural raw materials / D.K.-S. Bataev, M.S. Saydumov, T.S.-A. Murtazayeva [et al.] // Actual problems of modern building science and education: materials of the All-Russian scientific-practical conference dedicated to the 60th anniversary of the building faculty of FSBEI HE "GSTU named after Acad. M.D. Millionschikova", October 12-13, 2017. Grozny: P. Bisultanova, 2017. pp.109-117. (In Russ)]
4. Kapriylov, S.S. Vysokoprochnyy pnevmobeton s dobavkoy mikroremnezema dlya zashchitnykh pokry-tiy [Tekst] / S.S. Kapriylov, N.G. Bulgakova // Beton i zhelezobeton. -1993. - №5. -S. 7-8. [Kapriylov, S.S. High-strength pneumatic concrete with the addition of silica fume for protective coatings [Text] / S.S. Kapriylov, N.G. Bulgakova // Concrete and reinforced concrete. 1993. No. 5. pp. 7-8. (In Russ)]
5. Lesovik, B.C. Stroitel'nyye kompozity na osnove otsefov drobleniya betonnoy loma i gornykh porod [Tekst]: nauchnoye izdaniye / B.C. Lesovik, S.A.YU. Murtazayev, M.S. Saydumov. -Grozny: MUP «Tipografiya», 2012. - 192 s. [Lesovik, B.C. Building composites based on screenings for crushing concrete scrap and rocks [Text]: scientific publication / B.C. Lesovik, St. A.Yu. Murtazaev, M.S. Saydumov. -Grozny: Municipal Unitary Enterprise "Printing House", 2012. 192 p. (In Russ)]
6. Afonina, M.I. Osobennosti stroitel'stva sportivnykh sooruzheniy na territoriyakh byvshikh pro-myshlennykh zon [Tekst] / M.I. Afonina, Ye.V. Kozyreva // V sbornike: Dni studencheskoy nauki. Sbor-nik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov instituta stroitel'stva i arkhitektury. -2017. -S. 390-392. [Afonina, M.I. Features of the construction of sports facilities in the territories of former industrial zones [Text] / M.I. Afonina, E.V. Kozyreva // In the collection: Days of student science. Collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture. 2017. pp. 390-392. (In Russ)]
7. Shcherban', Ye.M. Razrabotka sostava puttsolanovogo tsementa na vulkanicheskom tufe [Tekst] / Ye.M. Shcherban', S.A. Stel'makh, A.K. Khalyushev [i dr.] // V sbornike: Stroitel'stvo. Arkhitektura. Ekonomika. Materialy Mezhdunarodnogo foruma "Pobednyy may 1945 goda": sbornik statey. Ministerstvo obra-zovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii, Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, Prof-soyuz rabotnikov narodnogo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii. -2018. -S. 110-113. [Shcherban, E.M. Development of the composition of pozzolanic cement on volcanic tuff [Text] / E.M. Shcherban, S.A. Stelmakh, A.K. Khalyushev [et al.] // In the collection: Construction. Architecture. Economy. Materials of the International Forum "Victory May 1945": a collection of articles. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Don State Technical University, Trade Union of Workers in Public Education and Science of the Russian Federation. 2018. pp. 110-113. (In Russ)]
8. Murtazayev, S-A.YU. Melkozernistyye betony na osnove napolniteley iz vtorichnogo syr'ya [Tekst]: nauchnoye izdaniye / S-A.YU. Murtazayev, D.K.-S. Batayev, Z.KH. Ismailova [i dr.]. -М.: «Komtekhprint», 2009. -142 s. [Murtazaev, St. A.Yu. Fine-grained concrete based on fillers from recycled materials [Text]: scientific publication / S-A.YU. Murtazaev, D.K.-S. Bataev, Z.K. Ismailova [et al.]. -М.: Komtekhprint, 2009. 142 p. (In Russ)]
9. Lermi, R. Problemy tekhnologii betona [Tekst] / R. Lermi. -М.: Izdatel'stvo LKI, 2007. -296 s. [Lermi, R. Concrete technology problems [Text] / R. Lermi. -М.: Publishing House of LCI, 2007. 296 p. (In Russ)]
10. Bazhenov, YU.M. Tekhnologiya betona [Tekst]: ucheb.posobiye dlya tekhnolog. spetsial'nostey stroit. Vuzov / YU.M. Bazhenov. - 3-ye izd. -М.: ASV, 2011. -500 c. [Bazhenov, Yu.M. Concrete technology [Text]: textbook for technologist. specialties builds. Universities / Yu.M. Bazhenov. - 3rd ed. -М.: DIA, 2011. 500 p. (In Russ)]

11. Udodov, S.A. Povtornoye vvedeniye plastifikatora kak instrument upravleniya podvizhnost'yu be-tonnoy sme-si // Sbornik nauchnykh trudov Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universite-ta. -2015. -№9. -S. 175-185. [Udodov, S.A. Re-introduction of a plasticizer as a tool for controlling the mobility of a concrete mixture // Collection of scientific papers of the Kuban State Technological University. 2015. No.9. pp. 175-185. (In Russ)]

12. Stel'makh, S.A. Vliyaniye nekotorykh kharakteristik primenyayemogo krupnogo zapolnitelya na svoystva tyazhelogo betona, prednaznachennogo dlya izgotovleniya tsentrifugirovannykh izdeliy i konstruk-tsiy [Tekst] / S.A. Stel'makh, Ye.M. Shcherban', K.V. Serdyukov [i dr.] // Vestnik Belgorodskogo gosudar-stvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2017. № 10. S. 15-20. [Stelmakh, S.A. The influence of some characteristics of the used large aggregate on the properties of heavy concrete intended for the manufacture of centrifuged products and structures [Text] / S.A. Stelmakh, E.M. Shcherban, K.V. Serdyukov [et al.] // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. pp. 15-20. (In Russ)]

13. Koryanova, YU.I., Rezantsev, N.Ye., Shumilova, A.S. Materialy i konstruksii, ispol'zuyemye pri stroitel'stve vysoznykh zdaniy - ot traditsiy k novshestvam // Alleya nauki. 2018. -T.6. -№ 4 (20). -S.95-99. [Koryanova, Yu.I., Re-zantsev, N.E., Shumilova, A.S. Materials and structures used in the construction of high-rise buildings - from tradition to innovation // Alley of Science. 2018. Vol.6. No. 4 (20). pp. 95-99. (In Russ)]

14. Soldatov, A.A. Opyt ispol'zovaniye silikata natriya v kachestve vyazhushchego veshchestve v proizvod-stve stroitel'nykh materialov [Tekst] / A.A. Soldatov, A.V. Galych, I.V. Sariyev [i dr.] // 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. 186-188. [Soldatov, A.A. The experience of using sodium silicate as a binder in the production of building materials [Text] / A.A. Soldatov A.V. Galych, I.V. Sariyev [et al.] // In the collection: Actual problems of construction, transport, engineering and technosphere safety. Materials of the IV-th annual scientific-practical conference of the North Caucasus Federal University. N.I. Stoyanov (executive editor). 2016. pp. 186-188. (In Russ)]

15 Usov, B.A. Fiziko-khimicheskiye protsessy stroitel'nogo materialovedeniya v tekhnologii betona i zhelezobeto-na [Tekst]: ucheb. posobiye dlya studentov po spetsial'nosti 270106 «Proizvodstvo stroi-tel'nykh materialov, izdeliy i kon-struktsiy» / B.A. Usov. -M.: Izdatel'stvo MGOU, 2009. -326 s. [Usov, B.A. Physico-chemical processes of building mate-rials science in the technology of concrete and reinforced concrete [Text]: textbook. manual for students in specialty 270106 "Production of building materials, products and structures" / B.A. Mustache. -M .: Publishing house of the Moscow State Educational University, 2009. 326 p. (In Russ)]

16.Salamanova, M.Sh. Clinker-freebindersbasedonfinelydispersedmineralcomponents / MurtazaevS.A.Yu., Sala-manovaM.Sh. // V sbornike: ibausilconferenceproceedings. 2018. S. 707-714. [Salamanova, M.Sh. Clinker-freebindersbasedonfinelydispersedmineralcomponents / MurtazaevS.A.Yu., SalamanovaM.Sh. // In the collection: ibausil-conferenceproceedings. 2018. pp. 707-714. (In Russ)]

17.Self-ConsolidatingConcreteswithMaterialsoftheChechenRepublicandNeighboringRegions / MadinaSala-manova, MagomedKhubaev, MagomedSaidumov, TamaraMurtazayeva // Internationaljournalofenvironmental & sci-enceeducation. 2017. Vol. 11. No.18. pp.12719-12724.

Сведения об авторах:

Аласханов Арби Хамидович, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного про-изводства; e-mail: uspekhh@ro.ru

Муртазаева Тамара Саид-Альвиевна, кандидат технических наук, кафедра технологии строительного про-изводства, e-mail: tomamurtazaeva@mail.ru

Сайдумов Магомед Саламувич, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства; e-mail: saidumov_m@mail.ru

Омаров Ариф Омарович, кандидат экономических наук, доцент, кафедра строительных материалов и ин-женерных сетей; e-mail: zagir9@mail.ru

Information about the authors:

Arbi Kh. Alaskhanov, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof. Department of Construction Technology; e-mail: uspekhh@ro.ru

Tamara S. Murtazaeva, Doctor Sci. (Technical). Prof. Department of Construction Technology; e-mail: tomamurtazaeva@mail.ru

Magomed S. Saidumov, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof. Department of Construction Technology; e-mail: saidumov_m@mail.ru

Arif O.Omarov, Cand. Sci. (Economics). Assoc. Prof., Department of Building Materials and Engineering Net-works; e-mail: zagir9@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.06.2019.

Принята в печать 01.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.06.2019.

Accepted for publication 01.09.2019.

Для цитирования: Несветаев Г.В., Долгова А.В., Хаджишалапов Г.Н., Батдалов М.М. О влиянии пористости мелкозернистых бетонов и растворов, полученных из сухих строительных смесей, на морозостойкость контактной зоны. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(3):139-148. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-139-148

For citation: G.V. Nesvetaev, A.V. Dolgova, G.N. Khadzishalapov, M.M. Batdalov. On the influence of the porosity of fine-grained concretes and dry building mixtures on contact zone frost resistance. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):139-148. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-139-148

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-139-148

О ВЛИЯНИИ ПОРИСТОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ, НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ

Несветаев Г.В.¹, Долгова А.В.², Хаджишалапов Г.Н.,³ Батдалов М.М.³

¹Донской государственный технический университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Ростовский государственный университет путей сообщения,

²344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка

Народного Ополчения, 2, Россия,

³Дагестанский государственный технический университет,

³367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель заключалась в выявлении зависимости морозостойкости контактной зоны МЗБ, полученных из ССС на основе различных портландцементов (ПЦ) с содержанием различных редиспергируемых полимерных порошков (РПП) от 0 до 3%. **Метод.** Исследования проведены на базе 75 циклов замораживания-оттаивания. **Результат.** Среднестатистическая зависимость изменения сцепления с основанием от дополнительной пористости после 75 циклов замораживания-оттаивания не зависит от природы НМВ, но на величину сцепления влияют тип цемента, вид и дозировка РПП, характер дополнительной пористости; содержание организованного объема НМВ в виде ВВ не оказывает влияния на изменения величины сцепления с бетонным основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания; НМВ в виде МС вводить в состав бетонной смеси в дозировке более 7% нецелесообразно; целесообразность применения сульфатостойкого цемента требует дополнительных исследований; рациональной дозировкой РПП следует считать 1 – 2%. Некоторое противоречие в выводах по объему вводимой МС (по критерию прочности – не менее 6%, по критерию морозостойкости контактной зоны – не более 7%) позволяет для практических целей получения дополнительных данных о влиянии МС на морозостойкость рекомендовать дозировку МС в составе ССС в пределах 6-7% по объему. **Вывод.** Зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ и с НМВ в виде ВВ после твердения 28 сут в нормальных условиях практически совпадает с известной зависимостью прочности от пористости для цементного камня, максимальное расхождение значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 5%. Зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде МС подобна известной зависимости прочности от пористости для цементного камня, но с ростом пористости отмечается некоторое снижение влияния пористости на прочность. Зависимость предела прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ практически совпадает с ранее полученной зависимостью прочности от пористости для цементного камня, максимальное расхождение значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 9%. Для МЗБ с НМВ в виде МС с ростом пористости, как и при твердении в нормальных условиях отмечается некоторое снижение влияния пористости на прочность, а для МЗБ с НМВ в виде ВВ зависимость имеет качественное и количественное отличие. Рекомендуемое значение НМВ в виде ВВ для повышения морозостойкости МЗБ по критерию прочности не менее 3%, МС – не менее 6%. По критерию морозостойкости контактной зоны и прочности МС рекомендуемая дозировка 6-7%. Прямое влияние объема ВВ на морозостойкость контактной зоны не выявлено.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, морозостойкость контактной зоны, дополнительная пористость, сцепление с основанием

BUILDING AND ARCHITECTURE

ON THE INFLUENCE OF THE POROSITY OF FINE-GRAINED CONCRETES AND DRY BUILDING MIXTURES ON CONTACT ZONE FROST RESISTANCE

Nesvetaev G.V.¹, Dolgova A.V.², Khadzhishalapov G.N.³, Batdalov M.M.³

¹Donskoy State Technical University,

¹1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia,

²Rostov State University of Communications,

²2 Rosto Rifle Regiment of the People's Militia Sq., Rostov-on-Don 344038, Russia,

³Daghestan State Technical University,

³70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives This study was aimed at identifying the dependency of the frost resistance of the contact zone of fine-grained concretes (FGCs) obtained from dry building mixtures (DBMs) based on various Portland cements (PCs) with the content of various redispersable polymer powders (RPPs) from 0 to 3%. **Method** The research was based on 75 freeze-defrost cycles. **Results** Although the average dependency of adhesion with the base on additional porosity after 75 freeze-defrost cycles does not depend on the nature of NMV, adhesion is influenced by the cement type, the type and dosage of RPPs, as well as the nature of additional porosity. Since the content of organised volume of NMV in the form of VV has no effect on changes in adhesion with the concrete base following 75 freeze-defrost cycles, it is impractical to add more than 7% of NMV in the form of MS to the concrete mixture. The feasibility of using sulphate-resistant cement requires more research. The practical RPP dosage should be 1-2%. Some contradictions in conclusions on the volume of the introduced MS (by the strength criterion – at least 6%, by the criterion of frost resistance of the contact zone – no more than 7%) allows us to recommend the dosage of MS in RPP within 6-7% by volume for obtaining additional data on the MS effect on frost resistance. **Conclusion** The dependency of compressive strength on additional porosity for FGCs without NMV and with NMV in the VV form after hardening during 28 days under normal conditions almost coincides with the known dependency of strength on porosity for cement stone; the maximum divergence of the values $\frac{R_p}{R_0}$ in the investigated range does not exceed 5%. The dependency of compressive strength on additional porosity for FGCs without NMV and with NMV in the MS form is similar to the known dependency of strength from porosity for cement stone; however, with increasing porosity, there is a slight decrease in the effect of porosity on strength. The dependency of compressive strength after 75 freeze-defrost cycles on additional porosity for FGC without NMV practically coincides with the previously obtained dependency of strength on porosity for cement stone; the maximum divergence of the values $\frac{R_p}{R_0}$ in the investigated range does not exceed 9%. For FGCs with NMV in the MC form, increasing porosity causes a slight decrease in the porosity effect on strength, and for FGCs with NMV in the VV form, the dependency has a quantitative and qualitative difference. The value of NMV in the VV form recommended for improving the frost resistance of FGCs by the strength criterion is at least 3%, MS – at least 6%. According to the criterion of the frost resistance of the contact zone and the strength of MS, the recommended dosage is 6-7%. It was not possible to disclose the direct impact of the VV volume on the frost resistance of the contact zone.

Keywords: dry building mixtures, frost resistance of the contact zone, additional porosity, adhesion with base

Введение. Согласно ГОСТ 12730.4 в бетоне выделяют: полный объем пор, объем открытых капиллярных и некапиллярных пор, объем условно закрытых пор. Как известно, морозостойкость портландцементных бетонов зависит, в том числе, от соотношения условно-закрытых пор и открытых капиллярных пор [1-8].

Постановка задачи. Исследования морозостойкости портландцементных бетонов, модифицированных различными органическими соединениями, в том числе полимерами, показали, что эта зависимость в принципе сохраняется и в этом случае [9-11], а также для плиточных клеев и других растворов и МЗБ, полученных из ССС [12,13]. Предложены различные зависимости морозостойкости бетонов от критериев, представляющих в той или иной степени соотношение условно-закрытых пор и открытых капиллярных пор [2,5,14].

Методы исследования. В настоящем исследовании для формирования условно-закрытых пор в структуре МЗБ использованы низкомолекулярные включения (НМВ) в виде зольной микросферы (МС) либо вовлеченного за счет применения воздуховолекающей добавки (ВВ) воздуха [15]. Поскольку при введении в состав смеси РПП также обеспечивается некоторое воздухововлечение, то для анализа представленных ниже результатов введено понятие «дополнительная пористость» (P_d – далее в формулах и по тексту P), которая определялась как

$$P_d = \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_0}\right), \quad (1)$$

где ρ_i – средняя плотность состава МЗБ, содержащего НМВ и (или) РПП,

ρ_0 – средняя плотность состава МЗБ, не содержащего НМВ и РПП.

На рис. 1 представлена зависимость изменения предела прочности МЗБ на сжатие от дополнительной пористости, образованной при введении в состав бетонной смеси различных НМВ, а также от введения в состав бетонной смеси РПП. Предел прочности МЗБ определен после 28 сут твердения в НУ.

$$\frac{R_p}{R_0} = f(P), \quad (2)$$

R_p , R_0 – соответственно предел прочности МЗБ, содержащего НМВ и (или) РПП, предел прочности МЗБ, не содержащего НМВ и РПП (эталонный состав).

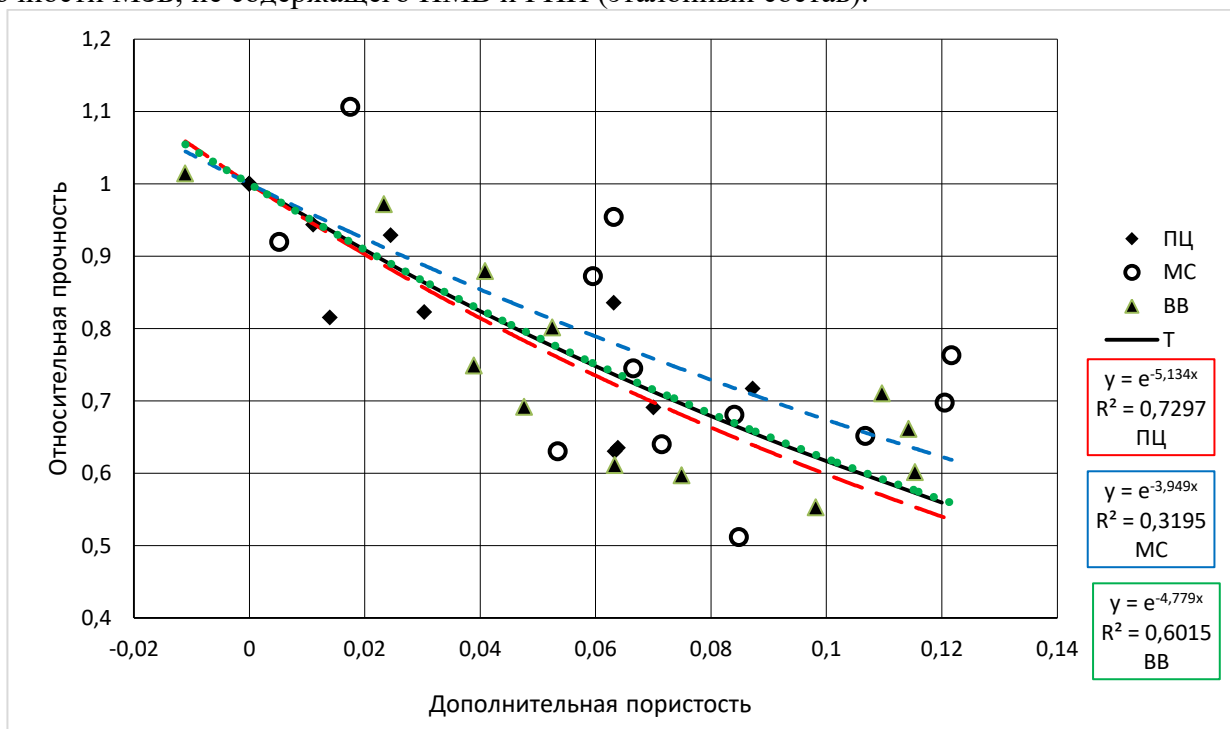


Рис. 1 Изменение предела прочности МЗБ на сжатие в зависимости от дополнительной пористости после 28 сут твердения в НУ

Fig. 1 Change in the compressive strength of the MZB depending on the additional porosity after 28 days of hardening in NU

Т – по формуле $\frac{R_p}{R_0} = \exp(-4,84 \cdot P)$ [16]

Несмотря на довольно низкий показатель величины достоверности аппроксимации из представленных на рис. 1 данных можно сделать следующие предварительные выводы:

- зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ (ПЦ на рис.1) практически совпадает с ранее полученной зависимостью прочности от пористости для цементного камня [16], максимальное расхождение среднестатистических значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 5%;

- зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде ВВ (ВВ на рис. 1) полностью совпадает с ранее полученной зависимостью прочности от пористости для цементного камня [16];

- зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде МС (МС на рис. 1) подобна ранее полученной зависимости прочности от пористости для цементного камня [16], но имеет некоторое количественное отличие, особенно с ростом пористости, когда различие среднестатистических значений $\frac{R_p}{R_0}$ достигает 16% при $P = 0,17$.

На рис. 2 представлена зависимость изменения предела прочности МЗБ на сжатие от дополнительной пористости, образованной при введении в состав бетонной смеси НМВ, а также от введения в состав бетонной смеси РПП. Предел прочности МЗБ определен после 28 сут твердения в НУ плюс 75 циклов замораживания-оттаивания. Дополнительная пористость определена после циклического замораживания-оттаивания непосредственно перед определением предела прочности на сжатие после 75 циклов.

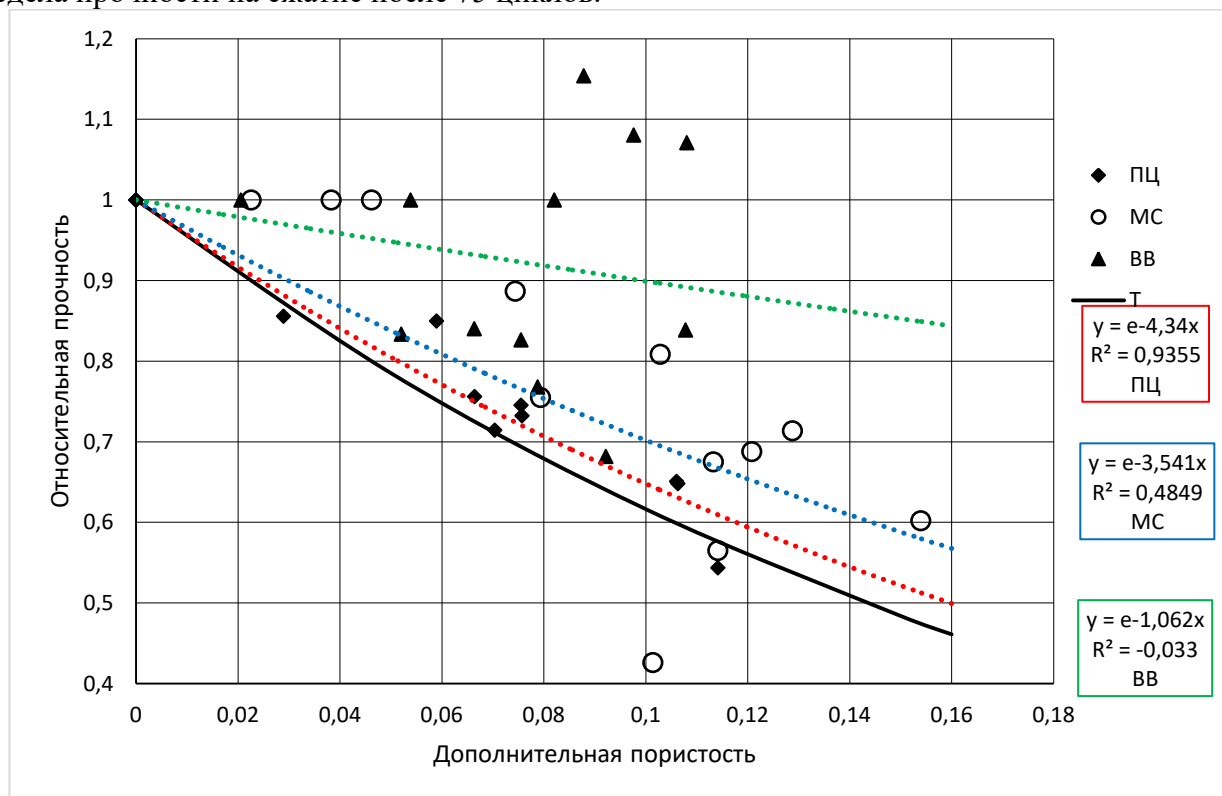


Рис. 2 Изменение предела прочности МЗБ на сжатие в зависимости от дополнительной пористости после 75 циклов замораживания-оттаивания

Fig. 2. Change in the compressive strength of the MZB depending on additional porosity after 75 cycles of freezing and thawing

$$T - \text{по формуле } \frac{R_p}{R_0} = \exp(-4,84 \cdot P) [16]$$

В табл. 1 приведены зависимости изменения предела прочности на сжатие от пористости по данным рис. 1 и 2.

Таблица 1. Зависимости изменения предела прочности на сжатие $\frac{R_p}{R_0}$ от дополнительной пористости P , состава МЗБ и условий выдерживания

Table 1. Dependences of the change in the compressive strength R_p / R_0 on the additional porosity R , the composition of the MZB and aging

Условия выдерживания Aging conditions	По данным According to [15]	Наличие НМВ The presence of the NIV		
		нет not	MC	BB
		$\frac{R_p}{R_0} =$		
28 сут в НУ 28 days at OU	$\exp(-4,84 \cdot P)$ $R^2 = 0,62$	$\exp(-5,13 \cdot P)$ $R^2 = 0,73$	$\exp(-3,95 \cdot P)$ $R^2 = 0,32$	$\exp(-4,78 \cdot P)$ $R^2 = 0,6$
28 сут в НУ + 75 циклов замораживания-оттаивания 28 days in NU + 75 freeze-thaw cycles	–	$\exp(-4,34 \cdot P)$ $R^2 = 0,936$	$\exp(-3,54 \cdot P)$ $R^2 = 0,485$	$\exp(-1,06 \cdot P)$ $R^2 = -0,033$

Из представленных на рис. 2 и в табл.1 данных можно сделать следующие предварительные выводы:

- зависимость предела прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ (ПЦ на рис.2) практически совпадает с ранее полученной зависимостью прочности от пористости для цементного камня [16], различие среднестатистических значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 9%;

- зависимость предела прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде MC (MC на рис. 2) подобна ранее полученной зависимости прочности от пористости для цементного камня [16], но имеет некоторое количественное отличие, особенно с ростом пористости, когда различие среднестатистических значений $\frac{R_p}{R_0}$ достигает 25% при $P = 0,17$.

- зависимость предела прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде BB (BB на рис. 2) имеет качественное и количественное отличие от ранее полученной зависимости [16] и от зависимости для МЗБ с BB после 28 сут твердения в НУ, установленной в настоящем исследовании (рис. 1).

Причиной является, во-первых, снижение предела прочности на сжатие основных образцов после 75 циклов замораживания-оттаивания в составах с низким содержанием BB, во-вторых, замедление снижения прочности после 75 циклов замораживания-оттаивания в составах с высоким содержанием BB;

- несмотря на низкие значения показателя достоверности аппроксимации R^2 , что указывает на значительное влияние на величину $\frac{R_p}{R_0}$, помимо дополнительной пористости, таких факторов, как дозировка и вид РПП, тип цемента, общеизвестная закономерность снижения предела прочности с ростом пористости «среднестатистически» прослеживается во всех случаях.

Для выявления степени влияния дополнительной пористости на морозостойкость МЗБ по критерию прочности проанализировано изменение величины $\frac{R_F}{R_{НУ}}$ (R_F – предел прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания, $R_{НУ}$ – предел прочности на сжатие после 28 сут твердения в НУ) от дополнительной пористости (рис. 3).

Из представленных на рис. 3 данных можно сделать следующие предварительные выводы: низкое значение показателя достоверности аппроксимации R^2 свидетельствует о существенном влиянии на величину $\frac{R_F}{R_{НУ}}$, помимо дополнительной пористости, таких факторов, как тип цемента, вид и дозировка РПП, характер дополнительной пористости (ее замкнутость); для практических целей можно рекомендовать величину дополнительной пористости при введении

НМВ в виде ВВ более 3%, в виде МС – не менее 6% по объему, в составах без НМВ не рекомендуется повышение дополнительной пористости сверх 6%.

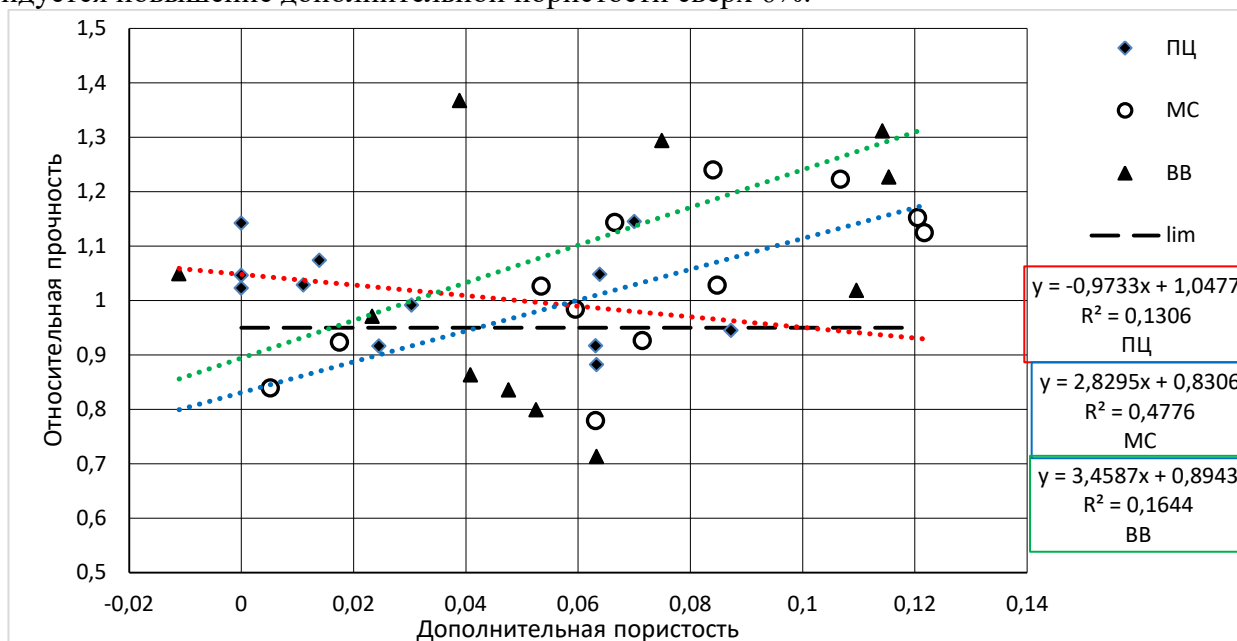


Рис. 3. Зависимость относительной прочности МЗБ после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости *lim* – допустимое снижение предела прочности по ГОСТ 10060
Fig. 3. The dependence of the relative strength of the MZB after 75 cycles of freezing and thawing on additional porosity *lim* - the allowable decrease in tensile strength according to GOST 10060

Для более полного анализа влияния дополнительной пористости на морозостойкость исследованных МЗБ предлагается ввести понятие *организованный объем НМВ*, численно равный разности дополнительной пористости, образующейся при введении в состав смеси совместно НМВ и РПП, и дополнительной пористости, образующейся при введении в состав смеси только РПП. На рис. 4 представлена зависимость относительной прочности МЗБ после 75 циклов замораживания-оттаивания от организованного объема НМВ.

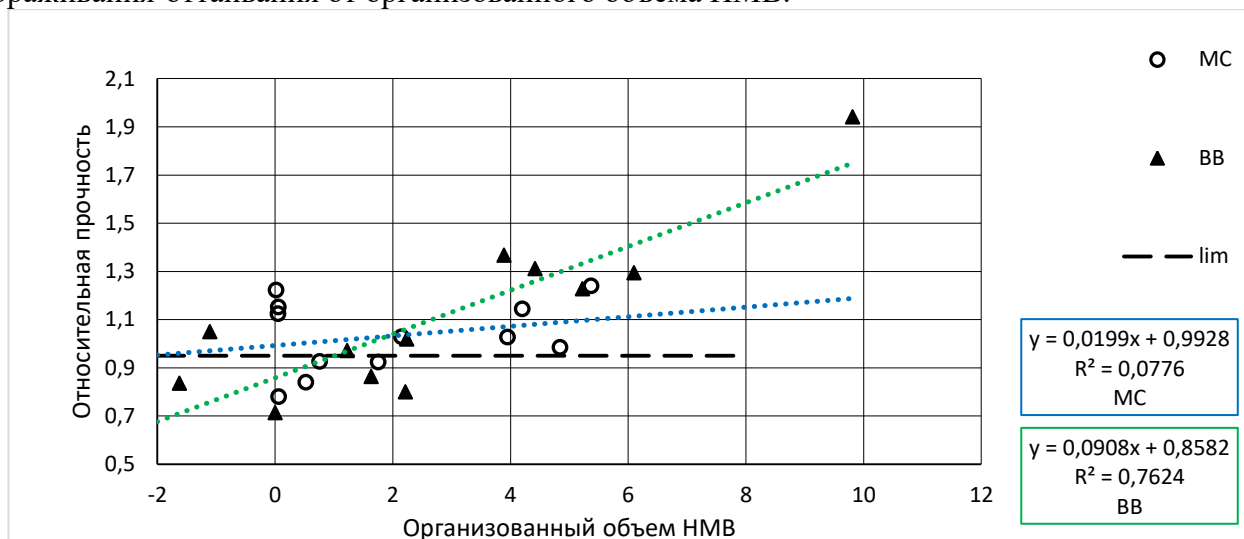


Рис. 4 Зависимость относительной прочности МЗБ после 75 циклов замораживания-оттаивания от организованного объема НМВ *lim* – допустимое снижение предела прочности по ГОСТ 10060
Fig. 4 The dependence of the relative strength of the MZB after 75 cycles of freezing and thawing on the organized volume of the HMB *lim* - the allowable decrease in tensile strength according to GOST 10060

Из представленных на рис. 4 данных очевидно: в случае применения НМВ в виде ВВ влияние других факторов, помимо организованного объема НМВ, проявляется в значительно меньшей степени (показатель $R^2 = 0,762$) в сравнении с МС (показатель $R^2 = 0,078$); при величине организованного объема НМВ более 2%, независимо от вида НМВ, обеспечивается после 75 циклов замораживания-оттаивания значение коэффициента морозостойкости не менее 0,95.

Вероятно, при исследовании составов МЗБ с МС необходимо рассматривать возможное различное взаимодействие с МС цементов с различным химическим и минералогическим составом, т.е. учитывать «сродство структур» [17].

На рис. 5 представлена зависимость относительного сцепления МЗБ с бетонным основанием $\frac{A_{s,F}}{A_{s,HY}}$ от дополнительной пористости ($A_{s,F}$ – сцепление с основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания, $A_{s,HY}$ – сцепление с основанием после 28 сут твердения в НУ).

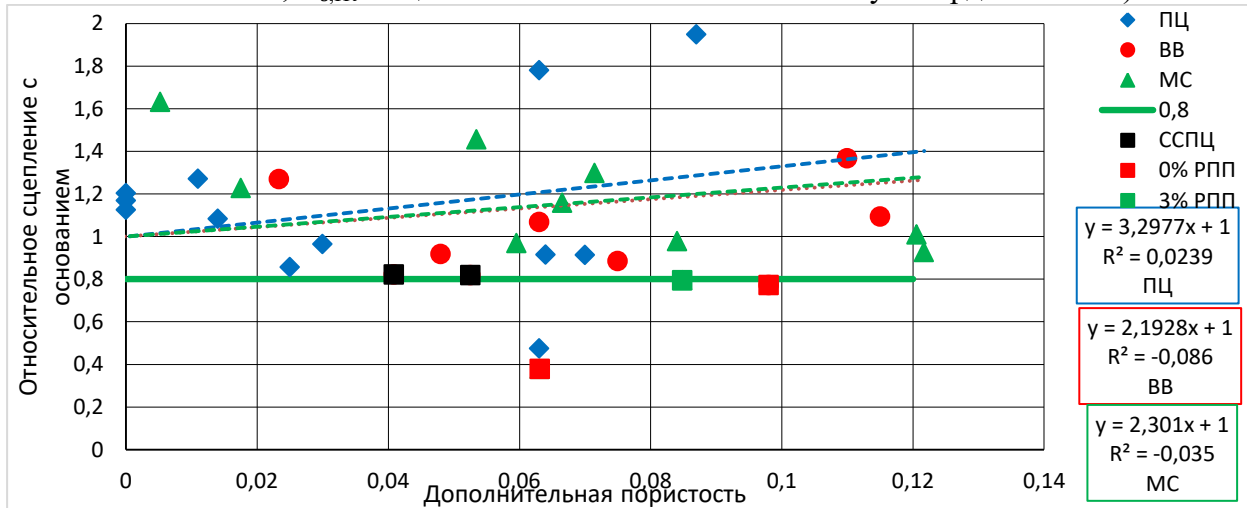


Рис. 5 Зависимость сцепления МЗБ с бетонным основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости 0,8 – критерий по ГОСТ 31356 ССПЦ – МЗБ на сульфатостойком цементе; 0%, 3% РПП – содержание РПП в составе смеси

Fig. 5 The dependence of the adhesion of the MZB to the concrete base after 75 cycles of freezing and thawing on the additional porosity of 0.8 - the criterion according to GOST 31356 SSPTS - MZB on sulfate-resistant cement; 0%, 3% RPP - content of RPP in the mixture

На рис. 6 представлена зависимость сцепления МЗБ с бетонным основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания от организованного объема НМВ.

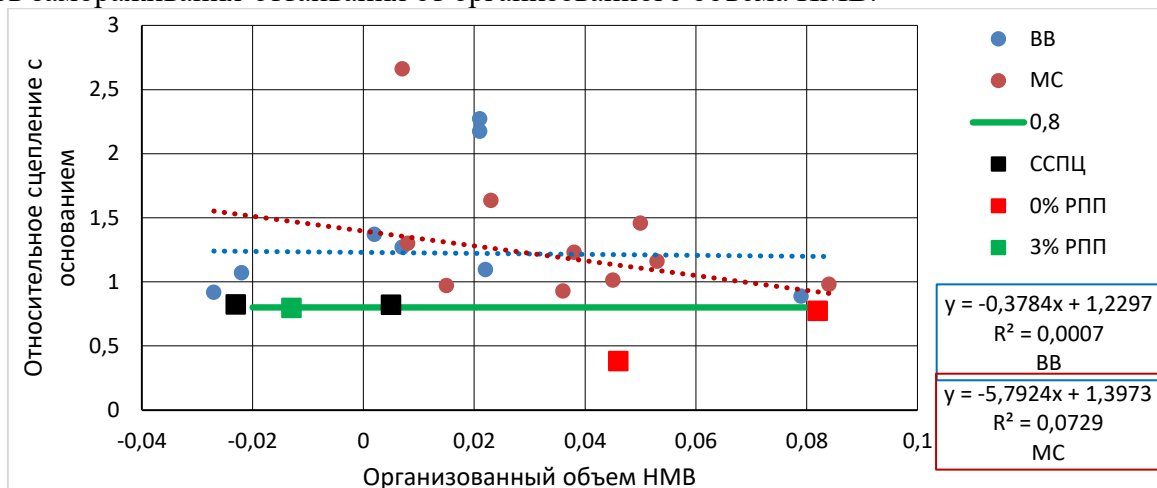


Рис. 6. Зависимость сцепления МЗБ с бетонным основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания от организованного объема НМВ 0,8 – критерий по ГОСТ 31356 ССПЦ – МЗБ на сульфатостойком цементе; 0%, 3% РПП – содержание РПП в составе смеси

Fig. 6. The dependence of the adhesion of the MZB to the concrete base after 75 cycles of freezing and thawing on the organized volume of the HMW 0.8 - the criterion according to GOST 31356 SSPTS - MZB on sulfate-resistant cement; 0%, 3% RPP - content of RPP in the mixture

Из представленных на рис. 5 и 6 данных можно сделать следующие предварительные выводы:

- среднестатистическая зависимость изменения сцепления с основанием от дополнительной пористости после 75 циклов замораживания-оттаивания не зависит от природы НМВ, но на

величину сцепления влияют тип цемента, вид и дозировка РПП, характер дополнительной пористости;

- содержание организованного объема НМВ в виде ВВ не оказывает влияния на изменения величины сцепления с бетонным основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания;
- НМВ в виде МС вводить в состав бетонной смеси в дозировке более 7% нецелесообразно;
- целесообразность применения сульфатостойкого цемента требует дополнительных исследований;
- рациональной дозировкой РПП следует считать 1 – 2%.

Некоторое противоречие в выводах по объему вводимой МС (по критерию прочности – не менее 6%, по критерию морозостойкости контактной зоны – не более 7%) позволяет для практических целей получения дополнительных данных о влиянии МС на морозостойкость рекомендовать дозировку МС в составе ССС в пределах 6-7% по объему.

Вывод. 1. Зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ и с НМВ в виде ВВ после твердения 28 сут в нормальных условиях практически совпадает с известной зависимостью прочности от пористости для цементного камня, максимальное расхождение значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 5%. Зависимость предела прочности на сжатие от дополнительной пористости для МЗБ с НМВ в виде МС подобна известной зависимости прочности от пористости для цементного камня, но с ростом пористости отмечается некоторое снижение влияния пористости на прочность.

2. Зависимость предела прочности на сжатие после 75 циклов замораживания-оттаивания от дополнительной пористости для МЗБ без НМВ практически совпадает с ранее полученной зависимостью прочности от пористости для цементного камня, максимальное расхождение значений $\frac{R_p}{R_0}$ в исследуемом диапазоне не превышает 9%. Для МЗБ с НМВ в виде МС с ростом пористости как и при твердении в нормальных условиях отмечается некоторое снижение влияния пористости на прочность, а для МЗБ с НМВ в виде ВВ зависимость имеет качественное и количественное отличие.

3. Рекомендуемое значение НМВ в виде ВВ для повышения морозостойкости МЗБ по критерию прочности не менее 3%, МС – не менее 6%. По критерию морозостойкости контактной зоны и прочности МС рекомендуемая дозировка 6-7%. Прямое влияние объема ВВ на морозостойкость контактной зоны не выявлено.

Библиографический список:

1. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях гидротехнических сооружений. М.: «Стройиздат», 1965. - 190 с.
2. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983, 132 с
3. Невилль А.М. Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972, 344 с
4. Стольников В.В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов чередующимися циклам замораживания и оттаивания. Л.: Энергия, 1970 - 68 с.
5. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
6. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений.-М.: Транспорт, 1966 495 с.
7. Powers T.C. Topics in Concrete Technology. 3. Mixtures, Containing Intentionally Entrained Air. 4. Characteristics of Air Void Systems. Journal of PCA Research and Development Labs. September 1964 pp. 19-42, January 1965, pp. 23-41.
8. Mielenz R.S., Wolkodoff V.E., Backstrom J.E., Burrows R.W. Origin, Evolution and Effects of the Air Voids System in Job Concrete. Journal ACI, Oktober 1958
9. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
10. Каприелов, С.С. Новые модифицированные бетоны / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян. - М.: «Типография «Парадиз», 2010. – 258 с
11. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня// Строительные материалы. – 2010. - № 1.

12. Логанина В.И., Жегера К.В. Оценка морозостойкости плиточного клея на цементной основе с применением в рецептуре добавки на основе аморфных алюмосиликатов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 2 (31). С. 32-36.
13. Несветаев Г.В., Козлов А.В., Филонов И.А. Влияние некоторых гидрофобизирующих добавок на изменение прочности цементного камня // Инженерный вестник Дона. 2013. №2(25). С.134.
14. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Лопатина Ю.Ю., Халезин С.В. О морозостойкости бетонов с суперпластификаторами // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
15. Несветаев Г.В., Долгова А.В. Влияние дозировки редиспергируемых порошков на свойства мелкозернистого бетона после многократного замораживания-оттаивания // Инженерный вестник Дона, №5 (2019) ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5977
16. Несветаев Г.В., Кардунян Г.С. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоинеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // Бетон и железобетон. 2013. №5. С. 6-8.
17. Лесовик В.С. К проблеме проектирования сухих ремонтных смесей с учетом сродства структур / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Беликов // Вестник РААСН. – 2014. - № 18. – с.112-119.

References:

1. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtayev B.G. Povysheniye morozostoykosti betona v konstruksiyakh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. M.: «Sroyizdat», 1965. - 190 s. [Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. Improving the frost resistance of concrete in the construction of hydro-technical structures. M.: "Sroyizdat", 1965. 190 p. (In Russ)]
2. Kuntsevich O.V. Betony vysokoy morozostoykosti dlya sooruzheniy Kraynego Severa. L.: Sroyizdat, 1983, 132 s [Kuntsevich O.V. Concrete of high frost resistance for structures of the Far North. L.: Sroyizdat, 1983, 132 p. (In Russ)]
3. Nevill' A.M. Svoystva betona. M.: Sroyizdat, 1972, 344 s [Neville A.M. Concrete properties. M.: Sroyizdat, 1972, 344 p. (In Russ)]
4. Stol'nikov V.V. O teoreticheskikh osnovakh soprotivlyayemosti tsementnogo kamnya i betonov chereduyushchimi-sya tsiklam zamorazhivaniya i ottaivaniya. L.: Energiya, 1970 - 68 s [Stolnikov V.V. On the theoretical foundations of the resistance of cement stone and concrete to alternating cycles of freezing and thawing. L.: Energy, 1970. 68 p. (In Russ)]
5. Sheykin, A.Ye. Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti / A.Ye. Sheykin, L.M. Dobshits. – L.: Sroyizdat, 1989. – 128 s [Sheikin, A.E. Cement concrete with high frost resistance / A.E. Sheikin, L.M. Dobschitz. L.: Sroyizdat, 1989. 128 p. (In Russ)]
6. Shestoporov S.V. Dolgovechnost' betona transportnykh sooruzheniy.-M.: Transport, 1966 495 s. [Shestoporov S.V., Durability of concrete transport structures.-M.: Transport, 1966 495 p. (In Russ)]
7. Powers T.C. Topics in Concrete Technology. 3. Mixtures, Containing Intentionally Entrained Air. 4. Characterization of Air Void Systems. Journal of PCA Research and Development Labs. September 1964 pp. 19-42, January 1965, pp. 23-41.
8. Mielenz R.S., Wolkodoff V.E., Backstrom J.E., Burrows R.W. Origin, Evolution and Effects of the Air Voids System in Job Concrete. Journal ACI, Oktober 1958.
9. Bazhenov, YU.M. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony / YU.M. Bazhenov, V.S. Dem'yanova, V.I. Kalashnikov. – M.: ASV, 2006. – 368 s. [Bazhenov, Yu.M. Modified high-quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. - M.: DIA, 2006. 368 p. (In Russ)]
10. Kapriylov, S.S. Novyye modifitsirovannyye betony / S.S. Kapriylov, A.V. Sheynfel'd, G.S. Kardumyan. - M.: «Tipografiya «Paradiz», 2010. – 258 s [Kapriylov, S.S. New modified concrete / S.S. Kapriylov A.V. Scheinfeld, G.S. Kardumyan. - M.: "Printing house" Paradise ", 2010. 258 p. (In Russ)]
11. Nesvetayev G.V., Davidyuk A.N. Vliyaniye nekotorykh giperplastifikatorov na poristost', vlazhnostnyye deformatsii i morozostoykost' tsementnogo kamnya// Stroitel'nyye materialy. – 2010. - № 1. [Nesvetayev G.V., Davidyuk A.N. The effect of some hyperplasticizers on porosity, moisture deformation and frost resistance of cement stone // Building Materials. 2010. No. 1. (In Russ)]
12. Loganina V.I., Zhegera K.V. Otsenka morozostoykosti plitochnogo kleya na tsementnoy osnove s primeneniym v retsepture dobavki na osnove amorfnykh alyumosilikatov // Regional'naya arkhitektura i stroitel'-stvo. 2017. № 2 (31). S. 32-36. [Loganina V.I., Zheger K.V. Evaluation of frost resistance of cement-based tile adhesives with the use of additives based on amorphous aluminosilicates in the formulation // Regional Architecture and Construction. 2017. No. 2 (31). pp. 32-36. (In Russ)]
13. Nesvetayev G.V., Kozlov A.V., Filonov I.A. Vliyaniye nekotorykh gidrofobiziruyushchikh dobavok na izmeneniye prochnosti tsementnogo kamnya // Inzhenernyy vestnik Dona. 2013. №2(25). S.134. [Nesvetayev G.V., Kozlov A.V., Filonov I.A. The influence of some hydrophobizing additives on the change in the strength of cement stone // Engineering Herald of the Don. 2013. No.2 (25). pp.134. (In Russ)]
14. Nesvetayev G.V., Korchagin I.V., Lopatina YU.YU., Khalezin S.V. O morozostoykosti betonov s superplastifikatorami // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIYE» Tom 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. YAz. rus., angl. [Nesvetayev G.V., Korchagin I.V., Lopatin Yu.Yu., Khalezin S.V. On

frost resistance of concrete with superplasticizers // Internet journal "SCIENCE" Volume 8, No. 5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/88TVN516.pdf> (free access). Zag from the screen. Yaz. Russian, English (In Russ)]

15. Nesvetayev G.V., Dolgova A.V. Vliyaniye dozirovki redispergiruyemykh poroshkov na svoystva melkozernistogo betona posle mnogokratnogo zamorazhivaniya-otthivaniya // Inzhenernyy vestnik Dona, №5 (2019) ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5977 [Nesvetayev G.V., Dolgova A.V. The effect of dosage of redispersible powders on the properties of fine-grained concrete after repeated freezing-thawing // Engineering Bulletin of the Don, No. 5 (2019) ivdon.ru/magazine/archive/n5y2019/5977 (In Russ)]

16. Nesvetayev G.V., Kardumyan G.S. Prochnost' tsementnogo kamnya s superplastifikatorami i organomineral'nymi modifikatorami s uchetoм yego sobstvennykh deformatsiy pri tverdenii // Beton i zhelezobeton. 2013. №5. S. 6-8. [Nesvetayev G.V., Kardumyan G.S. Strength of cement stone with superplasticizers and organomineral modifiers, taking into account its own deformations during hardening // Concrete and reinforced concrete. 2013. No5. pp. 6-8. (In Russ)]

17. Lesovik V.S. K probleme proyektirovaniya sukhikh remontnykh smesey s uchetoм srodstva struktur / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, D.A. Belikov // Vestnik RAASN. – 2014. - № 18. – s.112-119. [Lesovik V.S. To the problem of designing dry repair mixtures taking into account the affinity of structures / V.S. Lesovik, L.Kh. Zagorodnyuk, D.A. Belikov // Bulletin of RAASN. 2014. No. 18. p.112-119. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительного производства»; e-mail: nesgrin@yandex.ru

Долгова Анна Владимировна, старший преподаватель, кафедра «Изыскание, проектирование и строительство железных дорог»; e-mail: anya.dolgova.75@mail.ru

Хаджишалапов Гаджи Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета, кафедра «Технология и организация строительного производства»; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Батдалов Мухтаритдин Магомедович, доктор технических наук, профессор, член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Information about the authors:

Grigory V. Nesvetayev, Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of Department «Technology of construction production»; e-mail: nesgrin@yandex.ru

Anna V. Dolgova, Senior Lecturer, of the Department «Surveys, design and construction of railways»; e-mail: anya.dolgova.75@mail.ru

Gadzhi N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Dean of the Faculty of Architecture and Construction, Department of Technology and Organization of Construction Production; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Mukhtaruddin M. Batdalov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Corresponding member Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.04.2019.

Принята в печать 03.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.04.2019.

Accepted for publication 03.09.2019.

Для цитирования: Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Исмаилова З.Х., Бисултанов Р.Г. Получение бесклнкерных вяжущих синтезом щелочных растворов силиката натрия из кремнеземсодержащих горных пород. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):149-158. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-149-158

For citation: M.Sh. Salamanova, S.-A.Yu. Murtazaev, Z.H. Ismailova, R.G. Bisultanov. Obtaining clinkerless cements through the synthesis of basic solutions of sodium silicate from silica-containing rocks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):149-158. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-149-158

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.33

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-149-158

ПОЛУЧЕНИЕ БЕСКЛИНКЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ СИНТЕЗОМ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ СИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Саламанова М.Ш.¹, Муртазаев С.-А.Ю.^{1,2}, Исмаилова З.Х.¹, Бисултанов Р.Г.¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова,

364051, 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, 21 а, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время создание бесклнкерных вяжущих материалов, не требующих высокотемпературной обработки и огромного природного ресурса, но обладающих высокими техническими показателями является актуальной задачей. Цементы щелочногоса-творения, в которых активной составляющей будут щелочные металлы, способны при гидра-тации взаимодействовать с минералами алюмосиликатной природы, с образованием прочных и труднорастворимых соединений. **Метод.** В основу получения бетонных композитов на вя-жущих щелочной активации положен отечественный и зарубежный опыт применения шлако-щелочных композитов в строительстве. **Результат.** В данной работе проведен энергодиспер-сионный микроанализ исследуемых бесклнкерных композиций на основе щелочных силикат натриевых растворов из кремнеземсодержащих горных пород. **Вывод.** Разработанные рецеп-туры бесклнкерных вяжущих на основе высокодисперсных порошков различной природы, затво-ренных щелочным раствором приготовленным мокрым способом при температурах до 95 °С и атмосферном давлении. Данная технология позволит расширить область применения щелоч-ных цементов и получать бетоны с заданными свойствами.

*Работа выполнена в рамках исследований по реализацию научного проекта № 18-48-200001 «Высококачественные бетоны с повышенными эксплуатационными свойствами на ос-нове местного природного и техногенного сырья», получившего поддержку Российского фонда фундаментальных исследований» (РФФИ).

Ключевые слова: жидкое стекло, метасиликат натрия, кремнеземсодержащие добавки, щелочные металлы, диспергирования, щелочной активатор, бесклнкерные вяжущие, высоко-дисперсные порошки

BUILDING AND ARCHITECTURE

OBTAINING CLINKERLESS CEMENTS THROUGH THE SYNTHESIS OF BASIC SOLUTIONS OF SODIUM SILICATE FROM SILICA-CONTAINING ROCKS

M.Sh. Salamanova¹, S-A.Yu. Murtazaev^{1,2}, Z.H. Ismailova¹, R.G. Bisultanov¹

¹Academician M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

¹100 Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

21a Stropromyslovsky Hig., Grozny 364021, Russia

Abstract Objectives The creation of clinkerless cements that do not require high-temperature processing and significant natural resources, at the same time as exhibiting good technical parameters, seems to be an important research task. Cements of alkaline instillation, in which alkaline metals play an active role, are capable of interacting with minerals of aluminosilicate nature forming strong and insoluble compounds. **Methods** Concrete composites from binding substances activated by alkaline were developed on the basis of Russian and foreign experience of using cinder slag composites in construction. **Results** In this work, energy-dispersion microanalysis of the developed clinkerless compositions based on alkaline silicate sodium solutions from silica-containing rocks was carried out. **Conclusion** Formulations of clinkerless cements based on high-dispersal powders of different natures mixed by the alkaline solution obtained using the wet technique at temperatures of up to 95 °C and atmospheric pressure are proposed. This technology will expand the use of alkaline cements, thus leading to the development of concrete having desired properties.

Acknowledgment The work was carried out as part of the scientific project No. 18-48-200001 "High-quality concrete with increased operational properties based on local natural and man-made raw materials" supported by the Russian Foundation for Fundamental Research" (RFFR).

Keywords: Liquid glass, sodium metasilicate, silica-containing additives, alkaline metals, dispersing, alkaline activator, clinkerless cements, high-dispersal powders

Введение. Современные темпы развития строительства требуют увеличения объемов производства бетонных композитов, при этом ученые стремятся снизить их себестоимость, не нанося ущерба надежности и долговечности проектируемых изделий и конструкций [1-3]. В условиях дефицита разработанного природного ресурса, постоянного удорожания энергоносителей, усиления антропогенного воздействия на экологическую среду, выполнить эту задачу становится все сложнее, поэтому особое внимание уделяется разработке менее ресурсо- и энергоемких технологий получения строительных композитов [4,5].

Постановка задачи. Именно создание бесклинкерных вяжущих материалов, не требующих высокотемпературной обработки, но обладающих высокими техническими показателями, становится актуальным в настоящее время. К этой категории вяжущих можно отнести цементы щелочного затворения, в которых активной составляющей будут щелочные металлы, способные при гидратации взаимодействовать с минералами алюмосиликатной природы, образуя довольно прочные труднорастворимые соединения, идентичные продуктам гидратации традиционного вяжущего [6-9].

Известен опыт использования таких вяжущих в строительстве [1-8], но если быть точнее, наиболее подробно исследованы шлакощелочные вяжущие на основе отходов черной металлургии к которым относят доменные гранулированные шлаки, химический состав, которых представлен оксидами алюминия, кремния, и схож с составом портландцементного клинкера [9,10]. Но во многих регионах нашей страны шлаки черной металлургии являются дорогим и редким материалом, требующим огромных транспортных расходов, поэтому широкого внедрения известные разработки не получили.

Методы исследования. На протяжении нескольких лет нами проводятся исследования

по получению бесклинкерных цементов щелочного затворения [12-15], в результате которых получены долговечные и коррозионностойкие композиты.

В рецептурах вяжущих в замену доменных шлаков черной металлургии использовались высокодисперсные минеральные порошки различной природы из следующих пород: кремневый мергель, известняк, вулканический туф, песчаник, кварцевый песок, отходы цементной промышленности в виде аспирационной и клинкерной пыли электрофильтров. Все эти порошки по отдельности в заданных соотношениях смешивались с мелким заполнителем Алагирского месторождения (модуль крупности 2,8) и затворялись товарным жидким натриевым стеклом, с силикатным модулем 2,8 и плотностью 1,24 г/см³. Приготовленные образцы твердели первые сутки в нормальных условиях при температуре 20±2°C, но через 2 суток часть образцов-близнецов помещалась периодически в сушильный шкаф при температуре 40 °C на пару часов, и часть термообработанных образцов хранилась в воде. Рецептуры и результаты испытаний в зависимости от условий твердения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Рецептуры и свойства бесклинкерных цементов щелочной активации
Table 1. Formulations and properties of clinker-free alkaline activation cements

№ состава composition	Высокодисперсные порошки Fine powders	Щелочной активатор, % Alkaline activator Na ₂ SiO ₃	Activity Активность МПа, 28 сут.		
			условия твердения hardening conditions		
			естественное natural	40 °C	в воде in water
1	Кварцевый порошок, Silica powder S _{уд} = 810 м ² /кг	26,0	20,3	22,3	23,5
2	Мергель Mergel (700 °C), S _{уд} = 1150 м ² /кг	29,5	39,2	42,6	46,5
3	Вулканический туф Volcanic tuff S _{уд} = 920 м ² /кг	26,5	33,1	37,6	39,4
4	Известняковая мука Limestone flour S _{уд} = 1060 м ² /кг	29,0	13,7	16,5	9,0
5	Песчаник Sandstone S _{уд} = 1020 м ² /кг	26,5	14,6	17,3	9,2
6	Клинкерная пыль Clinker dust S _{уд} = 240 м ² /кг	23,0	42,1	44,7	50,5
7	Аспирационная пыль Suction dust S _{уд} = 280 м ² /кг	24,0	15,4	15,6	10,1

Обсуждение результатов. Результаты испытаний, приведенные в табл. 1 подтверждают, что прочностные показатели полученных вяжущих зависят в первую очередь от минералогического и химического составов исследуемых порошков, от наличия активных центров кристаллизации, а потом уже от условия твердения и удельной поверхности минеральных добавок.

Клинкерная пыль, образующаяся на горячем конце клинкерной вращающейся печи, обладает нужным минеральным составом, при затворении щелочным раствором, гидратируется с образованием гидросиликатов кальция и натрия, поэтому эти образцы и отличаются высокими прочностными значениями при твердении в водной среде. Кремневый термоактивированный мергель и вулканический туф также при активации жидкостекольным раствором набрали хорошую активность при хранении образцов в воде, что обосновано алюмосиликатной природой данных порошков. Минеральные порошки из известняка, песчаника и аспирационной пыли после активации набирали прочность при повышении температуры, полученные результаты обоснованы большим содержанием щелочноземельных соединений.

Таким образом, были получены бесклинкерные гидравлические вяжущие щелочной активации, с линейкой прочности от 10 до 50 МПа, пригодные для производства бетонных композитов. Но в предлагаемых разработках самым дорогим считается товарное жидкое стекло, и для широкомасштабного использования щелочных композитов, необходимо найти альтернативу этому затворителю [14, 16-18]. Поэтому на следующем этапе была поставлена цель – приготовить эффективный и менее затратный щелочной раствор. Затворитель был приготовлен мокрым

способом, который заключался в растворении тонкодисперсных кремнеземистых добавок в растворе в 20 % растворе едкого натрия, с последующим нагреванием до 92-95 °С при атмосферном давлении.

Сущность метода состоит в том, что аморфная составляющая исследуемых добавок при диспергировании вступает в реакцию с щелочью с образованием метасиликата натрия по реакции: $2\text{NaOH} + \text{SiO}_2 = \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Полученный таким способом щелочной раствор метасиликата натрия, в виде суспензии подвергали фильтрованию, в результате чего разделялся раствор и нерастворимый осадок. Химический состав предлагаемых щелочных растворов исследовали в НИЦКП) «Нанотехнологии и наноматериалы» ГГНТУ на растровом электронном микроскопе QUANTA 3D 200i с использованием энергодисперсионной системы микроанализа (EDAX).

В качестве кремнеземистого компонента в щелочном растворе были использованы мелкие стекольные пески Шатойского месторождения (ЧР) и вулканический туф Кенженского месторождения (КБР). Химический состав минеральных добавок приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав кремнеземистых добавок, %

Table 2. The chemical composition of silica additives, %

Оксидный состав Oxide Composition	Вулканический туф Volcanic Tuff	Кварцевый песок Quartz Sand
MgO	2,20	6,32
Al ₂ O ₃	13,57	14,99
SiO ₂	63,67	73,83
K ₂ O	6,00	1,83
CaO	7,79	0,6
Fe ₂ O ₃	2,52	0,97
TiO ₂	2,85	1,32
SO ₃	-	0,14
ППП	1,40	-

После приготовления щелочного раствора, в течение недели проводился визуальный осмотр, полученных суспензий (рис.1 а и б).



а)



б)

Рис.1. Снимки щелочных растворов на основе кварцевого песка и вулканического туфа, через сутки (а) и через неделю (б)

Fig. 1. Pictures of alkaline solutions based on quartz sand and volcanic tuff, in a day (a) and in a week (b)

Осмотр показал, что через сутки уровень осадка в растворе на основе тонкодисперсного кварцевого порошка выше, чем в растворе с вулканическим туфом, объяснить этот факт можно тем, что кварц довольно твердый минерал, содержащийся в повышенном количестве, в начальный период труднее взаимодействует с щелочью. Спустя неделю уровень осадка изменился, он уменьшился в том же растворе, вероятно, что процесс диспергирования кварца в растворе едкого натра активизировался, за счет аморфной составляющей этой добавки. Энергодисперсионный анализ и микрофотографии соответствующих растворов проводились как чистого фильтра, так и осадка, результаты представлены на рис. 2 -5.

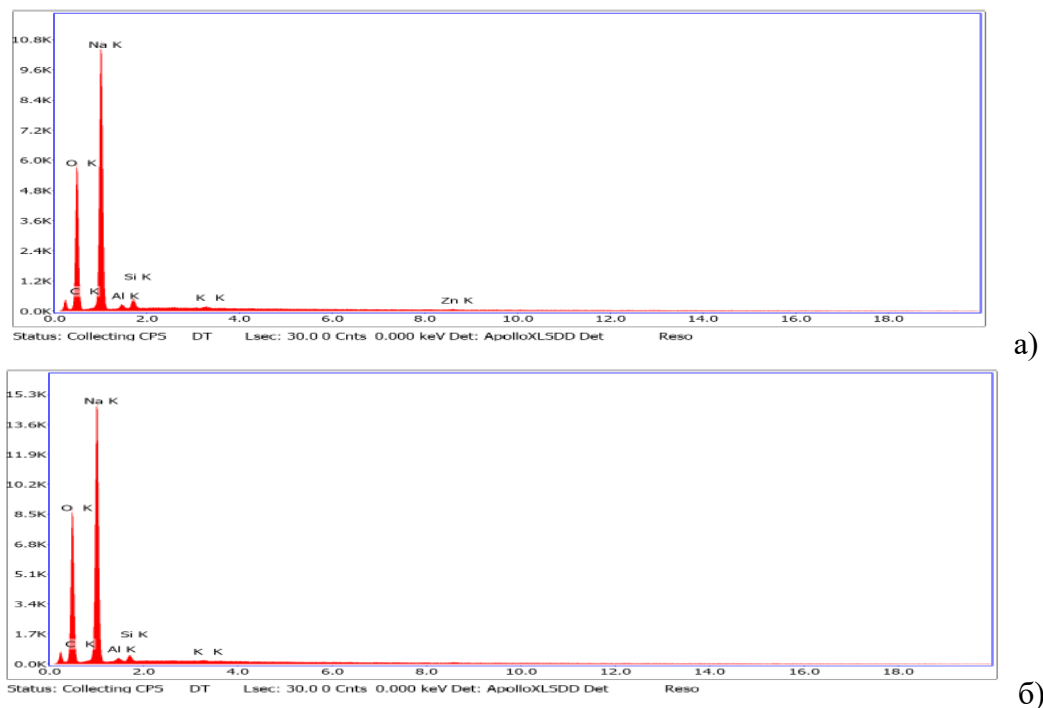


Рис.2 Энергодисперсионный анализ щелочного раствора на основе кварцевого песка, без осадка (а), с осадком (б)
Fig. 2 Energy dispersive analysis of an alkaline solution based on quartz sand, without sediment (a), with sediment (b)

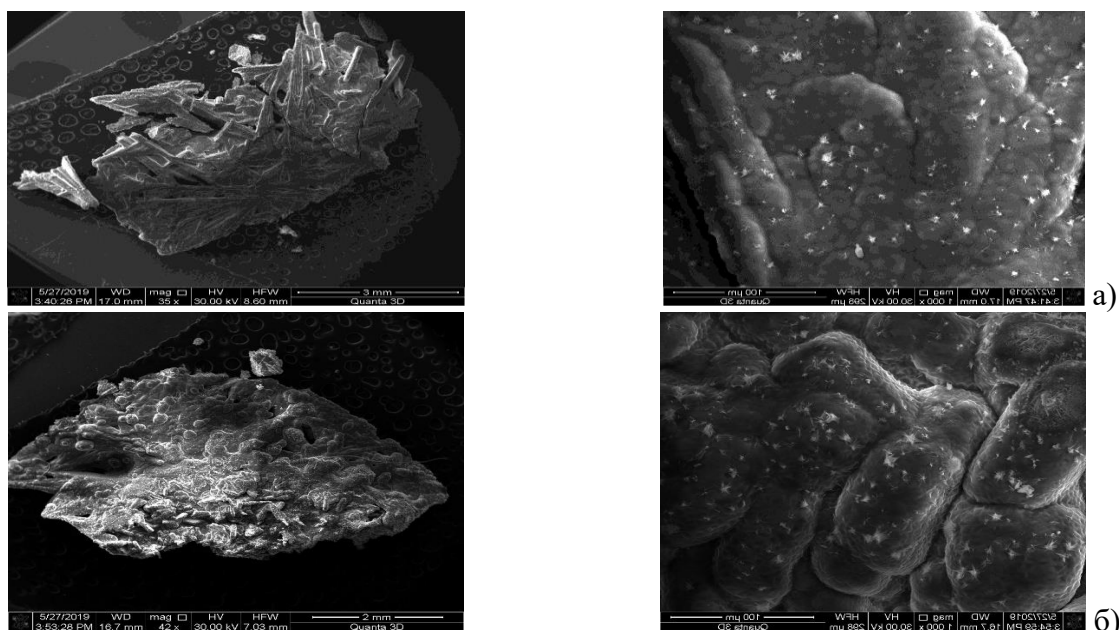
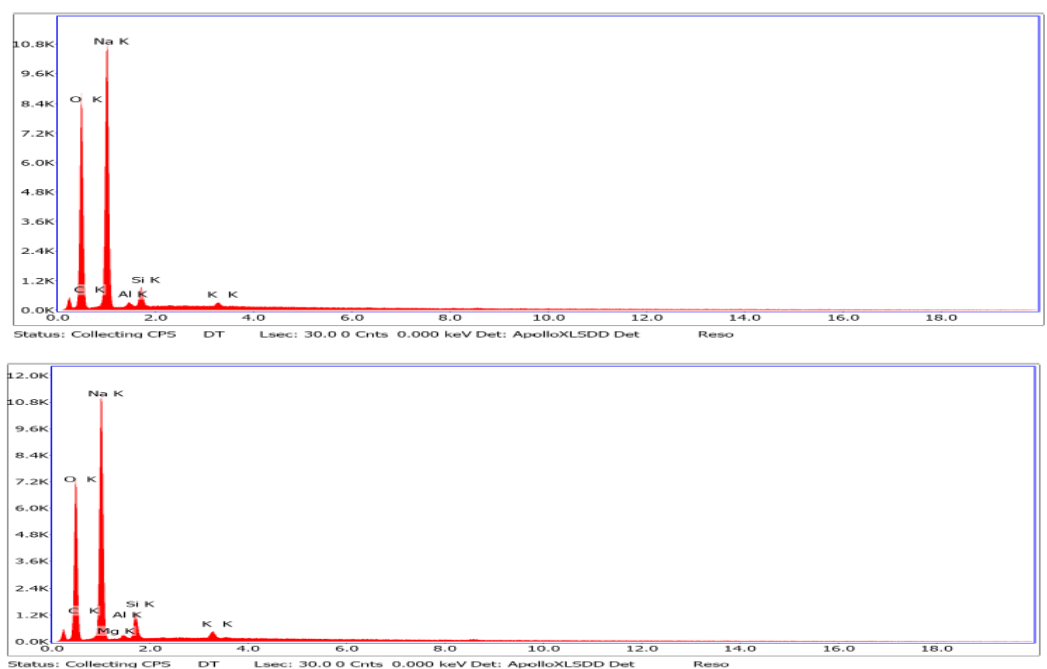


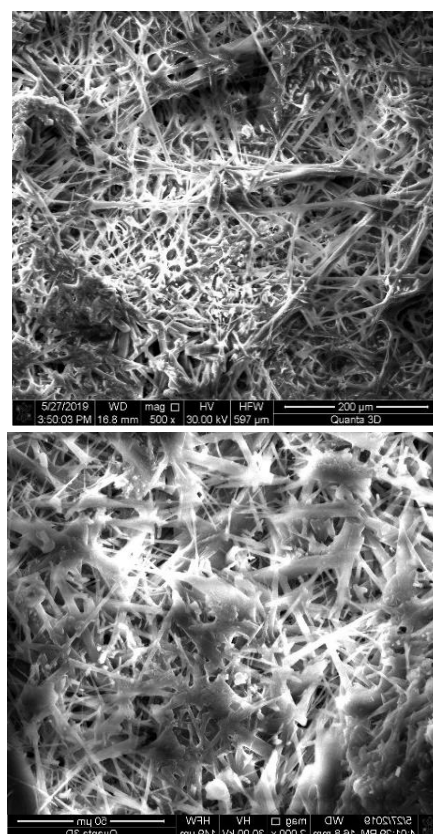
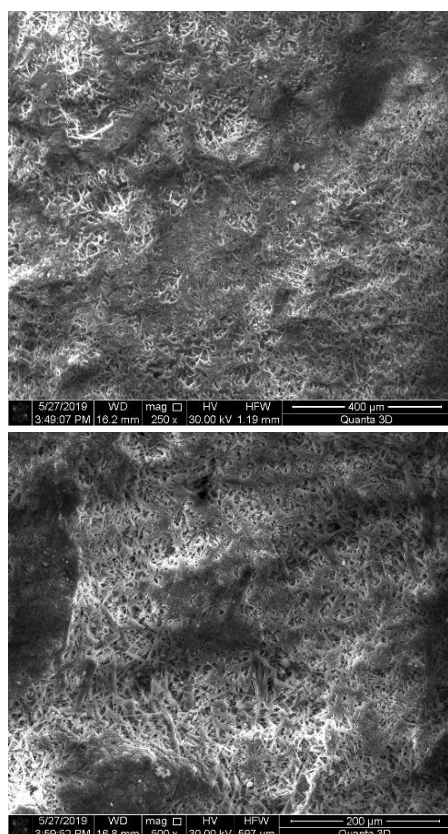
Рис. 3. Микрографии щелочного раствора на основе кварцевого песка, без осадка (а), с осадком (б)
Fig. 3. Micrographs of an alkaline solution based on quartz sand, without sediment (a), with sediment (b)



a)

б)

Рис.4. Энергодисперсионный анализ щелочного раствора на основе вулканического туфа, без осадка (а), с осадком (б)
Fig. 4. Energy dispersive analysis of an alkaline solution based on volcanic tuff, without sediment (a), with sediment (b)



a)

б)

Рис. 5. Микрографии щелочного раствора на основе вулканического туфа, без осадка (а), с осадком (б)
Fig. 5. Micrographs of an alkaline solution based on volcanic tuff, without sediment (a), with sediment (b)

Результаты микроанализа показывают, что осадках щелочных растворов содержится большее количество непрореагировавшего кремнезема.

В фильтрах щелочного раствора на основе вулканического туфа, как показали исследования большее содержание SiO_2 до 2,85 %, тогда как в растворе на основе кварцевых порошков SiO_2 до 1,99 %, а микрофотографии подтверждают наличие стекловидной фазы.

На дальнейшем этапе были проведены исследования, подтверждающие эффективность разработанных растворов метасиликата натрия. Для этого были приготовлены образцы-балочки из высокодисперсных порошков (табл.1) затворенных исследуемыми щелочными растворами.

После распалубки образцы подвергали тепловому воздействию в течение двух суток в сушильном шкафу (3 часа при $t = 40^\circ\text{C}$), далее одну часть образцов помещали в воду для установления гидравлическости вяжущих, а другая твердела на воздухе, для взаимодействия с углекислотой и образования геля кремниевой кислоты хотя бы на поверхностных слоях образцов. Результаты исследований приведены в табл.3.

Таблица 3. Рецептуры и свойства бесклнкерных цементов щелочной активации

Table 3. Recipes and properties of clinker-free alkaline activation cements

№ состава	Высокодисперсные порошки Fine powders	Щелочной активатор, % Alkaline activator Na_2SiO_3		Activity Активность МПа, 28 сут. условия твердения hardening conditions	
		кварцевый песок	вулканический туф	естественное natural	в воде in water
1	Кварцевый порошок, Silica powder $S_{уд} = 810 \text{ м}^2/\text{кг}$	26,2	-	14,7	13,5
		-	26,2	15,3	14,1
2	Мергель Mergel (700°C), $S_{уд} = 1150 \text{ м}^2/\text{кг}$	29,5	-	22,9	25,4
		-	29,6	23,4	25,8
3	Вулканический туф Volcanic tuff $S_{уд} = 920 \text{ м}^2/\text{кг}$	26,6	-	17,6	19,3
		-	26,6	18,2	19,7
4	Известняковая мука Limestone flour $S_{уд} = 1060 \text{ м}^2/\text{кг}$	29,3	-	9,4	4,0
		-	29,3	9,6	4,6
5	Песчаник Sandstone $S_{уд} = 1020 \text{ м}^2/\text{кг}$	26,7	-	7,6	3,2
		-	26,7	7,7	3,6
6	Аспирационная пыль Suction dust $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$	24,2	-	10,0	5,1
		-	24,2	10,4	5,0

Вывод. Полученные результаты испытаний подтверждают эффективность щелочного раствора на основе вулканического туфа, особенно это проявляется в составах № 2 и 3. Термоактивированный окремненный мергель и вулканические породы алюмосиликатной природы, активируясь щелочным раствором, формируют прочный геополимерный камень, представленный каркасным алюмосиликатом, затворенным щелочной средой с образованием трехмерного алюмосиликатного гидрогеля [19, 20].

Порошки карбонатной природы не обладают гидравлическими свойствами, и показали невысокие результаты по прочности.

Конечно же, результаты прочности отличаются от полученных при затворении товарным жидким натриевым стеклом, но учитывая энергоэффективность данной технологии можно считать, что предлагаемые растворы позволят расширить область применения бесклнкерных вяжущих щелочной активации и получать бетоны с заданными свойствами.

Библиографический список:

1. Dietz A, Ramroth H, Urban T, Ahrens W, Becher H (2004) Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. Int J Cancer, 108.

2. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL (2001) Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country. *Occup Med (Lond)*, 51, 367-73.
3. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Ватаев У.В. Цементная промышленность Чеченской республики / Вестник Академии Наук Чеченской республики № 1 (22), Грозный 2014, С. 109-114.
4. 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. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018. С. 04018.
5. 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. С. 337.
6. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME 2017" 2017. С. 05011.
7. 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.
8. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х. Исследование свойств бетонов на бесклнкерных вяжущих // Перспективы развития топливно-энергетического 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 «ГГТУ», 2018. – С.392 – 399.
9. 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.
10. 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. Issue.2. pp.707-714.
11. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnjuk, L.H., Volodchenko, A.N. Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 19. Pages 40617-40622.
12. Lesovik, V.S., Zagorodnyuk, L.K., Mestnikov, A.E., Kudinova, A.I., Sumskoi, D.A. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 5. Pages 12383-12390.
13. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Volodchenko, A.N., Zagorodnjuk, L.H., Pukharensko, Y.V. Composite performance improvement based on non-conventional natural and technogenic raw materials // 2016. International Journal of Pharmacy and Technology 2016. 8(3), с. 18856-18867
14. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008/– 592 pp.
15. Geopolymer technology: The current state of the art// P.Duxson, A. Fernandez, J. Provis / J. Mater. Sci. 2007.–V. 42. P.2917-2933.
16. Муртазаев С.-А.Ю. Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок / С.-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова, М.С. Сайдумов, З.Х. Исмаилова // Научный журнал «Современная наука и инновации» (Ставрополь – Пятигорск). – 2017. - №2 (18). -С.168-175.
17. С.-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. – 2018. – №2 (Т.46).– С. 65 –70.
18. Martschuk V. Untersuchungen zurn Frost-Tausalz-Widerstaud von Mochleistungsbetonen / V. Martschuk, T. Stark //Thesis: Wiss. Z.Bauhaus -Univ. Weimar. 1998. V.44. No1-2. pp.92-103.
19. Larbi, J.A. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen //Cem. and Concr. Res. - 1990. Vol.20. No. 5. pp. 783-794.
20. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S.,Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. Vol. 9. Issue 22. pp. 16945–16955.

References:

1. Dietz A, Ramroth H, Urban T, Ahrens W, Becher H (2004) Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. *Int J Cancer*, 108.
2. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL (2001) Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country. *Occup Med (Lond)*, 51, 367-73.
3. Murtazayev S.-A.YU., Salamanova M.SH., Vataev U.V. Tsementnaya promyshlennost' Chechenskoy respu-

bliki / Vestnik Akademii Nauk Chechenskoy respubliki № 1 (22), Groznyy 2014, S. 109-114. [Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Vataev U.V. The cement industry of the Chechen Republic / Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic No. 1 (22), Grozny 2014, pp 109-114. (In Russ)]

4. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T. On effect of superplasticizers and mineral additives on shrink-age of hardened cement paste and concrete // In the collection: MATEC Web of Conferences 27. Ser. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018.P. 04018.

5. 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.S. 337.

6. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Ser. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017.P. 05011.

7. Soldatov A.A., Sariyev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Stroitel'nyye materialy na osnove 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 technology 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. (In Russ)]

8. Murtazayev S.-A.YU., Salamanova M.SH., Saydumov M.S., Alaskhanov A.KH. Issledovaniye svoystv beto-nov na besklinsknykh vyazhushchikh // Perspektivy razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa i so-vremennoye sostoyaniye neftegazovogo inzhenerenogo obrazovaniya v Rossii, posvyashchennaya 105-letiyu M. D. Millionshchikova: materialy Vserossiyskoy nauchno – prakticheskoy konferentsii 11-12 iyunya 2018 g. – Groznyy: FGBOU VO «GGNTU», 2018. S.392 – 399. [Murtazaev S.-A.YU., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Alashkhanov A.Kh. Study of the properties of concrete on clinkerless 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. Millionshchikov: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference June 11-12, 2018 Terrible: FSBEI HE "GSTU", 2018. pp.392 - 399. (In Russ)]

9. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova ZH 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.

10. 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. Issue. 2. pp.707-714.

11. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnjuk, L.H., Volodchenko, A.N. Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 19. Pages 40617-40622.

12. Lesovik, V.S., Zagorodnyuk, L.K., Mestnikov, A.E., Kudinova, A.I., Sumskoi, D.A. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 5. Pages 12383-12390.

13. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Volodchenko, A.N., Zagorodnjuk, L.H., Pukharenko, Y.V. Composite performance improvement based on non-conventional natural and technogenic raw materials // 2016. International Journal of Pharmacy and Technology 2016.8 (3), p. 18856-18867

14. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008 / - 592 pp.

15. Geopolymer technology: The current state of the art // P. Duxson, A. Fernandez, J. Provis / J. Mater. Sci. 2007.–V. 42. P.2917-2933.

16. Murtazayev S.-A.YU. Vliyaniye aktivnykh tsentrov poverkhnosti na reaktivnost' mine-ral'nykh dobavok / S.-A.YU. Murtazayev, M.SH. Salamanova, M.S. Saydumov, Z.KH. Ismailova // Nauch-nyy zhurnal «Sovremennaya nauka i innovatsii» (Stavropol' – Pyatigorsk). – 2017. - №2 (18). -S.168-175. [Murtazaev S.-A. Yu. The effect of active surface centers on the reactivity of mineral additives / S.-A. Yu. Murtazaev, M.Sh. Salamanova, M.S. Saidumov, Z.Kh. Ismailova // Scientific journal "Modern Science and Innovation" (Stavropol - Pyatigorsk). 2017. No. 2 (18). pp.168-175. (In Russ)]

17. S.-A.YU. Murtazayev, M.SH. Salamanova Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoy prirody // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. – 2018. – №2 (T.46).– S. 65 –70. [S.-A.Y. Murtazaev, M.Sh. Salamanova 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)]

18. Martschuk V. Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand von Mochleistungsbetonen / V. Martschuk, T. Stark // Thesis: Wiss. Z.Bauhaus -Univ. Weirnar. 1998. V.44. No1-2. pp. 92-103.

19. Larbi, J.A. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set port-land cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen // Cem. and concr. Res. - 1990. Vol.20. No. 5. pp. 783-794.

20. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S., Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolym

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**

Исмаилова Зулихан Хасановна, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства; e-mail: **z-h-ismailova@mail.ru**

Бисултанов Рамазан Гиханович, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций; e-mail: **ramazan_bisultanov@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**

Zulikhan H. Ismailova, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Construction Technology. e-mail: **is-mailova-z-h@mail.ru**

Ramazan G. Bisultanov, Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Building Structures; e-mail: **ramazan_bisultanov@mail.ru**

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.06.2019.

Принята в печать 21.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.06.2019.

Accepted for publication 21.09.2019.

Для цитирования: Соболев Б.В., Соловьев А.Н., Пайзулаев М.М., Рашидова Е.В., Муртазалиев Г.М. Особенности напряжений в вершине упругого клина, подкрепленного тонким гибким покрытием на его сторонах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):159-166. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-159-166

For citation: B.V. Sobol, A.N. Soloviev, M.M. Payzulaev, E.V. Rashidova, G.M. Murtazaliev. Features of stresses at the apex of an elastic wedge, supported by a thin flexible coating on the sides Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):159-166. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-159-166

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 666.974.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-159-166

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ УПРУГОГО КЛИНА, ПОДКРЕПЛЕННОГО ТОНКИМ ГИБКИМ ПОКРЫТИЕМ НА ЕГО СТОРОНАХ

Соболев Б.В.¹, Соловьев А.Н.¹, Пайзулаев М.М.², Рашидова Е.В.¹, Муртазалиев Г.М.²

¹Донской государственный технический университет,

¹344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Провести исследование задачи об определении показателей степени при особенности напряжений в вершине клиновидной области в случаях, когда на ее сторонах (или на одной из них) закреплено тонкое гибкое покрытие. **Метод.** Предполагается, что покрытие является нерастяжимым. На другой стороне клиновидной области предполагаются условия наличия такого же покрытия, либо она зафиксирована, свободна от напряжений, либо находится в гладком контакте с жестким основанием. Математически, проблема сводится к задаче определения корней характеристических трансцендентных уравнений, возникающих из условия существования нетривиального решения системы линейных однородных уравнений. **Результат.** Для различных сочетаний граничных условий и углов раствора определены показатели при особенности радиальной компоненты тензора напряжений. В частности, установлены значения углов, при которых возникает сингулярное поведение у напряжений. Рассмотрен случай, когда на поверхности ребра задано специальное граничное условие, моделирующее накладку, и получены характеристические уравнения для определения показателя степенной зависимости асимптотического решения в его окрестности для четырех вариантов граничных условий. В двух случаях получились трансцендентные уравнения, которые решаются численно. **Вывод.** Представлены расчеты первых положительных корней уравнений в зависимости от угла раствора ребра и коэффициента Пуассона. Определены значения углов, при которых возникает сингулярное поведение у напряжений. В случае сочетания граничных условий (III - IV), сингулярное поведение напряжений наблюдается для угла $\alpha = \pi/8$, тогда как, в случае (III - III) это значение равно $\pi/4$.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ: 19-08-00074

Ключевые слова: клиновидная область, гибкое покрытие, сингулярность напряжений, граничные условия, угол раствора

BUILDING AND ARCHITECTURE

FEATURES OF STRESSES AT THE APEX OF AN ELASTIC WEDGE, SUPPORTED BY A THIN FLEXIBLE COATING ON THE SIDES

B.V. Sobol¹, A.N. Soloviev¹, M.M. Payzulaev², E.V. Rashidova¹, G.M. Murtazaliev²

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344010, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives To study the problem of determining the degree of stress at the apex of a wedge-shaped area in cases where the sides (or one of them) are covered with a thin flexible coating. **Method** It is assumed that the coating is not stretchable. On the other side of the wedge-shaped area, the same coating is assumed to be present; it is either fixed, stress-free or in smooth contact with a rigid base. Mathematically, the problem is reduced to the task of determining the roots of characteristic transcendental equations arising from the existence of a nontrivial solution to the system of linear homogeneous equations. **Results** Values for the specific characteristics of the radial component of a stress tensor are determined for different combinations of boundary conditions and solution angles. In particular, the angles at which the singular behaviour of stresses occurs are determined. The case is considered when a special boundary condition is given on the edge surface, simulating the overlay. Characteristic equations are obtained to determine the index of the degree dependency of the asymptotic solution in its vicinity for four variants of boundary conditions. In two cases, transcendental equations are obtained, which are solved numerically. **Conclusion** Calculations of the first positive roots of the equations depending on the angle of the edge solution and Poisson's ratio are presented. The values of the angles, at which the singular behaviour of stresses occurs, are determined. In the case of a combination of boundary conditions (III – IV), the singular stress behaviour is observed for the angle $\alpha = \pi/8$, while in the case of (III – III) this value is equal to $\pi/4$.

Acknowledgements This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR): 19-08-00074.

Keywords: wedge-shaped area, flexible coating, stress singularity, boundary conditions, solution angle

Введение. В линейной теории упругости в окрестности нерегулярной границы (угловые точки в двумерных задачах, ребра в трехмерных задачах и др.) при определенной их геометрии могут возникать сингулярности в напряжениях. Учет этого поведения важен при построении численных методов решения краевых задач, а также может быть использован при оценке критического состояния материала (например, возникновение и рост трещин). В работе [1] показано, что проблема исследования особенности напряжений в окрестности трехмерного ребра изотропного упругого тела может быть разделена на плоскую и анти плоскую задачи теории упругости.

В монографии [2] для плоской задачи предложен метод определения показателей при особенности напряжений в вершине клиновидной области при различных граничных условиях на ее сторонах. Рассмотрены случаи, когда на сторонах клина полагаются равными нулю компоненты вектора смещений (стороны зафиксированы, случай I-I), компоненты тензора напряжений на сторонах клина равны нулю (стороны свободны, случай II-II), или же равны нулю касательное напряжение $\tau_{r\theta}$ и нормальное смещение u_θ (гладкий контакт, случай III-III). Там же исследованы задачи, когда имеют место условия смешанного типа (т.е. на одной стороне условие одного типа, а на другой – другого).

Постановка задачи. Нахождение меньших по величине показателей асимптотического поведения используется в задачах определения критического состояния материала, например, в

вершине трещины посредством вычисления коэффициентов интенсивности напряжений. Кроме этого, определение этих показателей (не только меньших по величине) может быть использовано при построении асимптотического ряда в окрестности нерегулярной точки границы. Который, в свою очередь, может быть использован при построении численной схемы решения неоднородной задачи, например, методом конечных элементов. При этом коэффициенты этого ряда могут быть найдены по схеме, предложенной в [3].

Другой подход к исследованию этого вопроса с построением асимптотического решения в декартовой системе координат предложен в работе [4]. Этот метод применим и в случае анизотропного тела, когда выше названный метод встречает определенные трудности. Общий подход построения асимптотического ряда предложен в работе [5].

Методы исследования. Математическая модель тонкого гибкого покрытия на границе упругого тела, содержащего внутренние трещины, рассмотрена в работах авторов данной статьи [6,7]. Она сформулирована на основе асимптотического анализа решения задачи для упругой полосы [8] и представляет собой специальное граничное условие. Если предположить, что тонкое гибкое покрытие является нерастяжимым, это граничное условие существенно упрощается: $u_r = 0$. Оно было ранее сформулировано в работах [9,10].

Обозначим через IV граничное условие, когда на стороне имеется тонкое гибкое покрытие [8] и равны нулю нормальные напряжения

$$\theta=\alpha: 4G_chu_r'' = (1 - \nu_c)\tau_{r\theta} - 2\nu_ch\sigma_\theta', \quad \sigma_\theta = 0 \quad (1)$$

Здесь G_c и ν_c – модуль сдвига и коэффициент Пуассона покрытия, h – толщина покрытия, $u_r, \tau_{r\theta}, \sigma_\theta$ – соответственно, компоненты вектора перемещений и тензора напряжений в полярной системе координат $O r \theta$.

В данной работе рассмотрены задачи, когда на одной стороне задано условие IV, а именно случай IV-IV, а также для случаев смешанных условий (IV-I, IV-II, IV-III; индексация здесь очевидна).

Локальные особенности напряжений и перемещений. Перейдем теперь к рассмотрению плоской задачи теории упругости для клина. Перепишем уравнения равновесия в перемещениях Ламе в полярной системе координат:

$$\begin{aligned} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) - \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{u_\theta}{r} \right) &= 0 \\ (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{u_\theta}{r} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где λ, μ – коэффициенты Ламе, u_θ – угловая компонента вектора смещений.

Приведем также выражения для компонент тензора напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) \\ \tau_{r\theta} &= \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

В соответствии с [2] будем искать решение системы уравнений (2) в виде произведения функций

$$u_r(r, \theta) = r^\lambda f(\theta), \quad u_\theta(r, \theta) = r^\lambda g(\theta). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), перейдем к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} v_1 f'' + (\lambda^2 - 1)f + [(\lambda - 1) - v_1(\lambda + 1)]g' &= 0 \quad \left(v_1 = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \right) \\ g'' + v_1(\lambda^2 - 1)g + [(\lambda + 1) - v_1(\lambda - 1)]f' &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Решение этой системы имеет вид

$$\begin{aligned} f &= A \cos[(1 + \lambda)\theta] + B \sin[(1 + \lambda)\theta] + C \cos[(1 - \lambda)\theta] + D \sin[(1 - \lambda)\theta] \\ g &= B \cos[(1 + \lambda)\theta] - A \sin[(1 + \lambda)\theta] + v_2 D \cos[(1 - \lambda)\theta] - v_2 C \sin[(1 - \lambda)\theta] \end{aligned}$$

$$(v_2 = \frac{3+\lambda-4v}{3-\lambda-4v}) \quad (5)$$

В этом случае выражения для смещений и напряжений примут вид

$$r^{-\lambda}u_r = A\cos[(1+\lambda)\theta] + B\sin[(1+\lambda)\theta] + C\cos[(1-\lambda)\theta] + D\sin[(1-\lambda)\theta]$$

$$r^{-\lambda}u_\theta = B\cos[(1+\lambda)\theta] - A\sin[(1+\lambda)\theta] + v_2D\cos[(1-\lambda)\theta] - v_2C\sin[(1-\lambda)\theta]$$

$$\mu^{-1}r^{1-\lambda}\sigma_\theta = -2\lambda A\cos[(1+\lambda)\theta] - 2\lambda B\sin[(1+\lambda)\theta] - (1+\lambda)(1-v_2)C\cos[(1-\lambda)\theta] - (1+\lambda)(1-v_2)C\cos[(1-\lambda)\theta] - (1+\lambda)(1-v_2) \times D\sin[(1-\lambda)\theta]$$

$$\mu_1r^{1-\lambda}\tau_{r\theta} = -2\lambda A\sin[(1+\lambda)\theta] + 2\lambda B\cos[(1+\lambda)\theta] - (1-\lambda)(1-v_2)C\sin[(1-\lambda)\theta] + (1-\lambda)(1-v_2)D\cos[(1-\lambda)\theta] \quad (6)$$

Перейдем к удовлетворению граничным условиям задачи IV-IV.

Здесь следует приравнять нулю выражения для σ_θ и главный член условия $(1)u_r''$ при $\theta=\pm\alpha$, что приводит к системе линейных однородных алгебраических уравнений 4-го порядка:

$$\begin{aligned} -2\lambda A\cos[(1+\lambda)\alpha] \pm 2\lambda B\cos[(1+\lambda)\alpha] - (1+\lambda)(1-v_2) \times C\cos[(1-\lambda)\alpha] \\ \pm (1+\lambda)(1-v_2)D\sin[(1-\lambda)\alpha] = 0 \\ A\cos[(1+\lambda)\alpha] \pm B\sin[(1+\lambda)\alpha] + C\cos[(1-\lambda)\alpha] \pm D\sin[(1-\lambda)\alpha] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Обсуждение результатов. Легко видеть, что эта система уравнений распадается на две системы второго порядка:

$$\begin{aligned} 2\lambda A\cos[(1+\lambda)\alpha] + (1+\lambda)(1-v_2)C\cos[(1-\lambda)\alpha] &= 0 \\ A\cos[(1+\lambda)\alpha] + C\cos[(1-\lambda)\alpha] &= 0 \\ 2\lambda B\sin[(1+\lambda)\alpha] + (1+\lambda)(1-v_2)D\sin[(1-\lambda)\alpha] &= 0 \\ B\sin[(1+\lambda)\alpha] + D\sin[(1-\lambda)\alpha] &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Равенство нулю определителя системы является условием, при котором однородная система уравнений имеет нетривиальное решение. В результате непосредственных преобразований, получаем:

$$\sin[2\alpha(1-\lambda)]\sin[2\alpha(1+\lambda)] = 0 \quad (9)$$

Решения полученного уравнения имеют вид

$$\lambda = \pm 1 + \frac{\pi}{2\alpha}n, \text{ где } n \in Z \quad (10)$$

Аналогичным образом анализируются задачи, когда имеют место условия смешанного типа.

Соответствующие трансцендентные уравнения таковы:

$$\begin{aligned} \lambda \\ \sin[4\alpha] = -(3-4v)\sin[4\alpha\lambda] \quad (IV-I) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda\sin[4\alpha] = \sin[4\alpha\lambda] \quad (IV-II) \quad (12)$$

$$\cos[2\alpha(-1+\lambda)]\cos[2\alpha(1+\lambda)] = 0 \quad (IV-III) \quad (13)$$

В случае (IV - III) решения уравнения имеют вид

$$\lambda = \pm 1 + \frac{\pi}{\alpha}\left(\frac{\pm 1}{4} + n\right), \text{ где } n \in Z$$

Для случаев (IV - I) и (IV - II) решение строится численно.

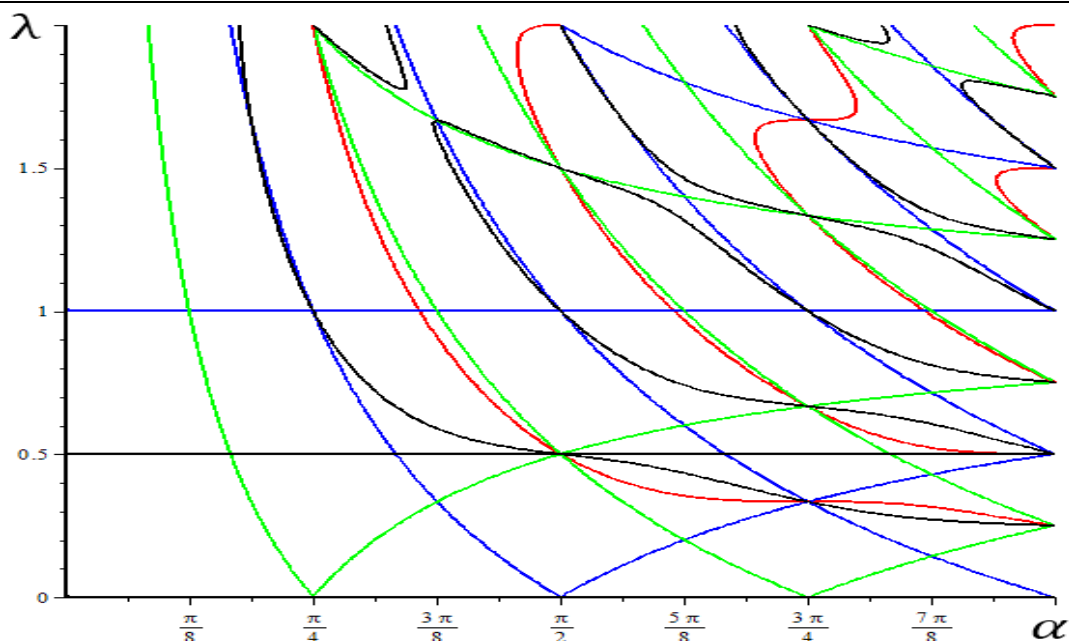


Рис. 1. Зависимость корней характеристических уравнений от угла
Fig. 1. The Dependence of the Roots of the Characteristic Equations on the Angle

На рис.1 представлены зависимости положительных корней характеристических уравнений (9), (11)-(13) от угла α , при этом кривая черного цвета соответствует случаю (I-IV) при $\nu = 1/3$, линия красного цвета - случай (II-IV), зеленого - (III-IV) и синего - (IV-IV).

Следует отметить, что в случаях (I-IV) и (IV - IV) сингулярность в напряжениях наблюдается при $\alpha > \pi/4$, в случае (III-IV) при $\alpha > \frac{\pi}{8}$ и для случая (II-IV) при $\alpha > 0.123$.

Показатель становится меньше 1/2 при $\alpha > \frac{\pi}{6}$ для случая (III-IV), при $\alpha > \frac{\pi}{3}$ для случая (IV - IV) и при $\alpha > \pi/2$ для случаев (I-IV) и (II - IV).

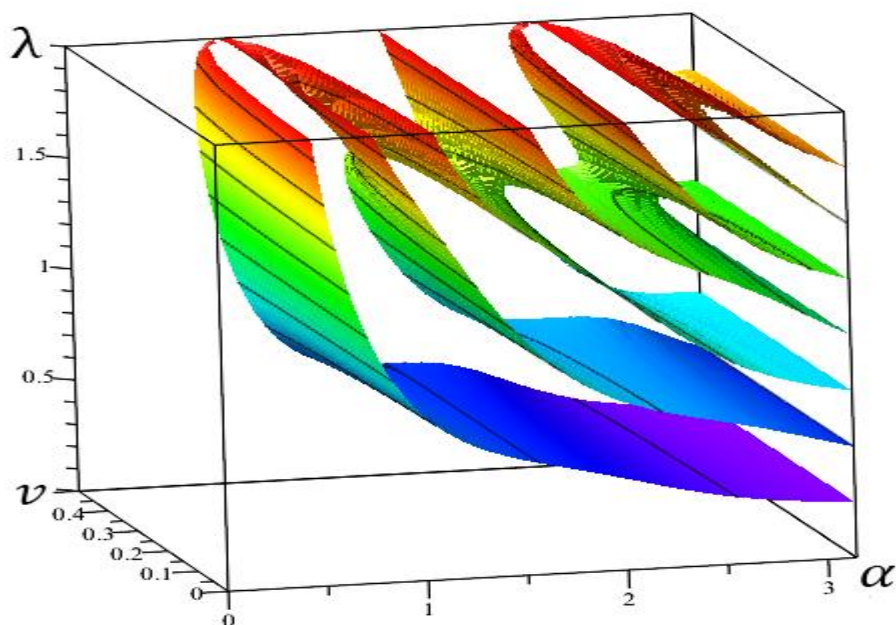


Рис. 2. Зависимость корней характеристического уравнения в случае (I-IV) от угла и коэффициента Пуассона
Fig. 2. The dependence of the roots of the characteristic equation in the case (I-IV) of the angle and Poisson's ratio

На рис. 2 представлены зависимости первых положительных корней характеристического уравнения (10) для случая (I-IV), в зависимости от угла α и коэффициента Пуассона ν .

Анализ уравнения (10) показывает, что для значений угла раствора, при котором возникает сингулярность в напряжениях, практически не зависит от значения коэффициента Пуассона.

Вывод. Рассмотрен случай, когда на поверхности ребра задано специальное граничное условие, моделирующее накладку, и получены характеристические уравнения для определения показателя степенной зависимости асимптотического решения в его окрестности для четырех вариантов граничных условий.

В двух случаях получились трансцендентные уравнения, которые решаются численно. Представлены расчеты первых положительных корней уравнений в зависимости от угла раствора ребра и коэффициента Пуассона.

Определены значения углов, при которых возникает сингулярное поведение у напряжений.

Следует отметить, что в случае сочетания граничных условий (III - IV), сингулярное поведение напряжений наблюдается для угла $\alpha = \pi/8$, тогда как, в случае (III - III) это значение равно $\pi/4$.

Библиографический список:

1. Аксентян О.К. Особенности напряженно-деформированного состояния плиты в окрестности ребра. – Прикладная математика и механика. - 1967, т.31, вып.1.
2. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости - М.: Наука, 1981. 688 с.
3. Мазья В.Г., Пламеневский Б.А. О коэффициентах в асимптотике решений эллиптических краевых задач в областях с коническими точками. - Math. Nachr. 1977, т.76.
4. Каландия А.И. Математические методы двумерной упругости. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат литературы. 1973. –304 с.
5. Белоконов А.В. - Колебания и волны в полуограниченных и ограниченных телах: диссертация ... доктора физико-математических наук: 01.02.04. - Ростов-на -Дону, 1987. - 450 с.: ил. Механика деформируемого твердого тела.
6. B. Sobol, A. Soloviev, A. Krasnoschekov. (2015). The transverse crack problem for elastic bodies stiffened by thin elastic coating. - ZAMM. Z. Angew. Math. Mech. No. 11. pp. 1302-1314.
7. B. Sobol, A. Soloviev, E. Rashidova, P. Vasiliev. (2018). Equilibrium state of the internal crack in the infinite elastic wedge with thin coating. - ZAMM. Z. Angew. Math. Mech., No 98. pp. 659-674. doi:10.1002/zamm.201700246.
8. Александров В.М., Мхитарян С.М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. - М.: Наука, 1983. – 488 с.
9. Kim, C.I., Ru, C.-Q., & Schiavone, P. (2013). A clarification of the role of crack-tip conditions in linear elasticity with surface effects. Mathematics and Mechanics of Solids, No 18(1). pp. 59–66. doi:10.1177/1081286511435227.
10. Kim, C.I., Schiavone, P. & Ru, C.Q. (2013). Effects of boundary reinforcement on local singular fields in linearly elastic materials. - Archives of Mechanics, - № 65(4). pp. 289–300.
11. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending / Y.M. Zhang, D.K. Yi, Z.M. Xiao, Z.H. Huang, S B. Kumar // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2013. Vol. 105-106. pp. 90-102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009
12. Chiodo M.S.G., Ruggieri C. J and CTOD estimation procedure for circumferential surface cracks in pipes under bending // Eng. Fract. Mech. 2010. Vol. 77(3). pp. 415-436. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.001
13. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 119. pp 19- 28. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.004
14. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading // Mathematics and Mechanics of Solids. 2014. Vol. 19(3). pp 289-298. DOI: 10.1177/1081286512463573
15. Predan J., Mocilnik V., Gubeljak N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion // Eng. Fract. Mech. 2013. Vol. 105. pp. 152-168. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.033
16. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending / B. Mechab, B. Serier, B.B. Bouiadjra, K. Kaddouri, X. Feaugas // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2011. Vol. 88(1). pp. 57-63. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.11.001

References:

1. Aksentyan O.K. Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya plity v okrestnosti rebra. – Prikladnaya matematika i mekhanika. - 1967, t.31, vyp.1. [Aksentyan O.K. Features of the stress-strain state of the plate in the vicinity of the rib. - Applied mathematics and mechanics. 1967, t.31, Issue 1. (In Russ)]
2. Parton V.Z., Perlin P.I. Metody matematicheskoy teorii uprugosti - M.: Nauka, 1981. 688 s. [Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of the mathematical theory of elasticity - M.: Nauka, 1981. 688 p. (In Russ)]
3. Maz'ya V.G., Plamenevskiy B.A. O koeffitsiyentakh v asimptotike resheniy ellipticheskikh krayevykh zadach v oblastyakh s konicheskimi tochkami. - Math. Nachr. 1977, t.76. [Mazya V.G., Plamenevsky B.A. On coefficients in the asymptotics of solutions of elliptic boundary value problems in domains with conical points. - Math. Nachr. 1977, Vol. 76. (In Russ)]
4. Kalandiya A.I. Matematicheskiye metody dvumernoy uprugosti. - M.: Nauka, Gl. red. fiz-mat litera-tury. 1973. –304 s. [Kalandia A.I. Mathematical methods of two-dimensional elasticity. - M.: Science, Ch. ed. physical mat literature tours. 1973. 304 p. (In Russ)]
5. Belokon' A.V. - Kolebaniya i volny v poluogranichennykh i ogranichennykh telakh: dissertatsiya ... dok-tora fiziko-matematicheskikh nauk: 01.02.04. - Rostov-na -Donu, 1987. - 450 s.: il. Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela [Belokon A.V. - Oscillations and waves in semi-limited and limited bodies: dissertation ... Doctors of physical and mathematical sciences: 02/01/04. - Rostov-on-Don, 1987 . 450 p.: Ill. Mechanics of a deformable solid (In Russ)]
6. B. Sobol, A. Soloviev, A. Krasnoschekov. (2015). The transverse crack problem for elastic bodies stiffened by thin elastic coating. - ZAMM. Z. Angew. Math. Mech - No. 11. - pp. 1302-1314.
7. B. Sobol, A. Soloviev, E. Rashidova, P. Vasiliev. (2018). Equilibrium state of the internal crack in the infi-nite elastic wedge with thin coating. - ZAMM. Z. Angew. Math. Mech., - No. 98. - pp. 659-674. doi: 10.1002 / zamm.201700246.
8. Aleksandrov V.M., Mkhitarian S.M. Kontaknyye zadachi dlya tel s tonkimi pokrytiyami i prosloyka-mi. - M.: Nauka, 1983. – 488 s. [Alexandrov V.M., Mkhitarian S.M. Contact tasks for bodies with thin coatings and interlayers. M.: Nauka, 1983 . 488 p. (In Russ)]
9. Kim, C.I., Ru, C.-Q., & Schiavone, P. (2013). A clarification of the role of crack-tip conditions in linear elasticity with surface effects. Mathematics and Mechanics of Solids, No. 18 (1). pp. 59–66. doi: 10.1177 / 1081286511435227.
10. Kim, C.I., Schiavone, P. \ & Ru, C.Q. (2013). Effects of boundary reinforcement on local singular fields in linearly elastic materials. - Archives of Mechanics, No. 65 (4). pp. 289-300.
11. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface crack subjected to large plastic bending / Y.M. Zhang, D.K. Yi, Z.M. Xiao, Z.H. Huang, S B. Kumar // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2013 . Vol. 105-106. pp. 90-102. DOI: 10.1016 / j.ijpvp.2013.03.030
12. Chiodo M.S. G., Ruggieri C. J and CTOD assessment procedure for circumferential surface cracks in pipe under bending // Eng. Fract. Mech 2010. Vol. 77 (3). pp. 415-436. DOI: 10.1016 / j.engfracmech.2009.10.000
13. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface crack subjected to biaxial tensile loading // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. p 2014 . Vol. 119. pp. 19- 28. DOI: 10.1016 / j.ijpvp.2014.02.004
14. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading // Mathematics and Mechanics of Solids. p2014 p Vol. 19 (3). pp. 289-298. DOI: 10.1177 / 1081286512463573
15. Predan J., Mocilnik V., Gubeljak N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion // Eng. Fract. Mech p 2013 p Vol. 105. pp 152-168. DOI: 10.1016 / j.engfracmech.2013.03.033
16. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending / B. Mechab, B. Serier, B.B. Bouadjra, K. Kaddouri, X. Feaugas // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. p2011. p Vol. 88 (1). pp. 57-63. DOI: 10.1016 / j.ijpvp.2010.11.001

Сведения об авторах:

Соболь Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий; e-mail: b.sobol@mail.ru

Соловьев Аркадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики; e-mail: solovievarc@gmail.com

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: ventav@mail.ru

Рашидова Елена Викторовна, кандидат физико-математических наук, профессор, кафедра информационных технологий; e-mail: el.rash@mail.ru

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: smdstu@mail.ru

Information about the authors:

Boris V. Sobol', Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Information Technologies; e-mail: b.sobol@mail.ru

Arkady N. Soloviev, Dr. (Physics and Mathematical)), Prof., Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; e-mail: solovievarc@gmail.com

Magomed M. Payzulaev, Cand. Sci. (Technical), Seniorlecturer, Department of Resistance of Materials, Theoretical and Building Mechanics; e-mail: **ventav@mail.ru**

Elena V. Rashidova, Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Prof., Department of Information Technologies; e-mail: **el.rash@mail.ru**

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; e-mail: **smdstu@mail.ru**

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.07.2019.

Принята в печать 25.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.07.2019.

Accepted for publication 25.09.2019.

Для цитирования: Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Абакаров М.С., Алибеков М.С. Расчет стойкости трехслойной конструкции пирамидальным дискретным заполнителем к действию динамической нагрузки с применением метода конечных элементов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (3):167-176. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176

For citation: O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, M.S. Abakarov, M.S. Alibekov Estimation of the Resistance of a three-layered structure with a pyramid discontinuous filler to dynamic stress using the Finite Element Method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(3):167-176. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-167-176

РАСЧЕТ СТОЙКОСТИ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПИРАМИДАЛЬНЫМ ДИСКРЕТНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ К ДЕЙСТВИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Устарханов О.М., Муселемов Х.М. Абакаров М.С., Алибеков М.С.

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

Резюме. Цель. В данной статье рассматривается возможность повышения стойкости трехслойных панелей с пирамидальным заполнителем, наполненной волокнистым материалом, к действию сосредоточенных динамических нагрузок. Динамический удар, проникания твердого тела и пробивания сплошной преграды всегда представляли интерес, прежде всего в военном деле, но в последнее время они привлекли внимание исследователей различных промышленных проблем. **Метод.** Расчёт проводится методом конечных элементов, который в настоящее время находит широкое применение в различных областях, в том числе в строительстве. В этой статье рассматривается возможность расчета движения твердого тела в волокнистом материале при помощи МКЭ, а именно при помощи ПК ЛИРА-САПР. **Результат.** На построенных моделях видно как ударник перемещается внутри волокнистого материала, т.е. использование ПК ЛИРА-САПР позволяет оценить работу наполнителя при движении в нем твердого тела. Результаты расчета перемещения ударника в волокнистом материале в зависимости от скорости тела (ударника), плотности наполнителя (волокна) показаны на рисунках.

Вывод. Проведённые численные исследования показали, что расхождение между результатами расчета трехслойной конструкции при действии динамических нагрузок с помощью МКЭ и с помощью аналитических зависимостей составил около 10%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).

Ключевые слова: метод конечных элементов, динамический удар, проникание, волокнистый материал, пробивание

BUILDING AND ARCHITECTURE

ESTIMATION OF THE RESISTANCE OF A THREE-LAYERED STRUCTURE WITH A PYRAMID DISCONTINUOUS FILLER TO DYNAMIC STRESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, M.S. Abakarov, M.S. Alibekov

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

Abstract Objectives. In this research, we set out to explore the possibility of increasing the resistance of three-layered panels with a pyramid filler filled with fibrous material to dynamic loads. Although issues associated with dynamic impact, penetration of solid bodies and breaking of solid barriers have always been of interest, particularly in military affairs, they are increasingly attracting the attention of researchers investigating various industrial problems. **Method.** A calculation was performed using the finite element method (FEM), which is widely used in various areas including construction. The possibility of calculating the movement of a solid body in fibrous material using the FEM, namely using the LIRA-SAPR software, was considered. **Results.** From the constructed models, it can be seen how the striker moves inside the fibrous material. Therefore, using the SC LIRA-SAPR allows the work of the filler to be assessed while a solid body moves inside it. The results of the calculation of striker movement in fibrous material depending on the speed of the body (striker) and the density of the filler (fibre) are shown in figures. **Conclusion.** The conducted numerical studies showed that a discrepancy between the calculation results for a three-layered structure under dynamic loads using the FEM and analytical dependencies was about 10%.

Acknowledgments The work was carried out with financial support from the President of the Russian Federation (Grant MK-6112.2018.8).

Keywords: finite element method, dynamic impact, penetration, fibrous material, breaking

Введение. Настоящее время в строительстве и других областях находят широкое применение многослойные конструкции, в том числе трехслойные [12]. Обладая рядом несомненных преимуществ, как: высокая жесткость, прочность, легкость и др. трехслойные конструкции (ТК) слабо сопротивляются при действии сосредоточенных сил, как динамических, так и статических.

Постановка задачи. В процессе эксплуатации на несущие и ограждающие конструкций, применяемые в различных зданиях, сооружениях, на судостроительную и машиностроительную технику, на космические аппараты и др. могут воздействовать различные тела, летящие с высокой скоростью. В этом случае эти конструкции (в том числе трехслойные конструкции) должны обладать определенной стойкостью к действию динамических сил. В то же время, сохраняя высокие требования к жесткости, прочности, легкости и при действии статических сил. В статье рассматривается возможность применения метода конечных элементов (МКЭ) при расчете трехслойных конструкций (ТК) на действие динамических сосредоточенных сил.

Динамический удар, проникания твердого тела и пробивания сплошной преграды всегда представляли интерес, прежде всего в военном деле, но в последнее время они привлекли внимание исследователей различных проблем.

Проникание может быть определено как перемещение тела в преграде без выхода его из последней; это явление связано либо с вдавливанием ударника, либо с его отскоком и образованием кратера. С другой стороны, пробивание обозначает полный проход ударника через преграду. До сих пор еще не найдено полное описание сложного механизма, связанного с этим процессом, хотя за многие годы было накоплено большое число эмпирических сведений в области баллистики. Эта информация, в первую очередь, полученная в связи с опытным изучением проникания снарядов может быть найдена в ряде источников [4,9-11,13-18]. Если рассматри-

вать процесс динамического воздействия ударника с многослойной конструкцией то полное исследование, включающее все другие явления, связанные с пробиванием, практически почти неосуществимо и необходимы существенные упрощения, для того чтобы создать удовлетворительную аналитическую модель. В этом случае движению ударника сопротивляются несколько слоев с различными физико-механическими характеристиками.

Для повышения стойкости трехслойных панелей, к действию сосредоточенных динамических нагрузок нами была принята ТК с пирамидальным заполнителем, наполненной волокнистым материалом (рис.1). Работ, посвященных расчету трехслойных конструкций на действие динамических сосредоточенных нагрузок немного, так как эта область еще не полностью изучена. Сейчас эта область, как было отмечено выше, считается перспективной и весьма актуальной.

Методы исследования. Решение трехмерных уравнений движения тела в многослойных оболочках сопряжены со значительными трудностями и получены для ряда частных случаев [1,2,6,7], поэтому важным для решения практических задач являются разработка и решения уравнений движения многослойных оболочек, построенных на основе приближенных подходов.

Одним из таких методов является метод конечных элементов, который в настоящее время находит широкое применение в различных областях, в том числе строительстве [3,5,8]. В этой статье рассматривается возможность расчета движения твердого тела в волокнистом материале при помощи МКЭ, а именно при помощи ПК ЛИРА. В качестве многослойной оболочки в статье принят трехслойный элемент с пирамидальным заполнителем, наполненный волокнистым материалом.

Геометрическая форма пирамидальной ячейки и фрагмент трехслойной конструкции показаны на рис. 1.

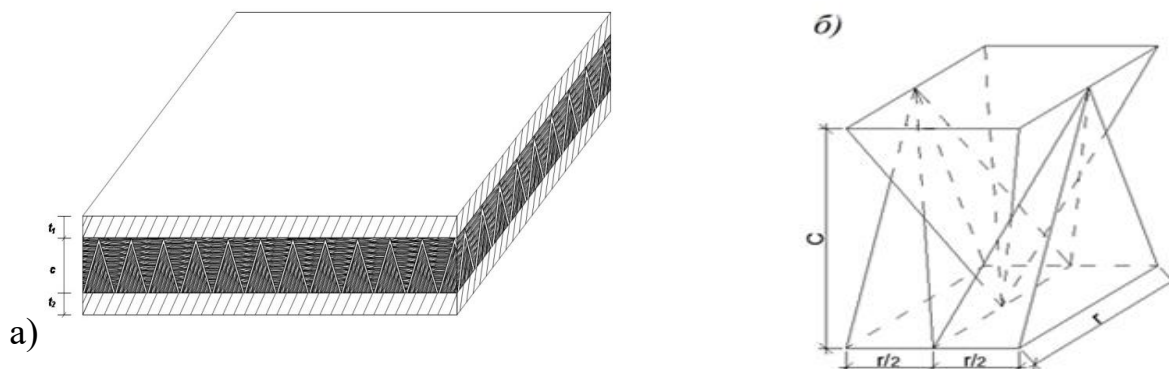


Рис.1. Фрагмент трехслойной конструкции (а) и геометрическая форма (б) пирамидальной ячейки

Fig. 1. Fragment of a three-layer structure (a) and geometric shape (b) of a pyramidal cell

Расчетная схема пирамидальной ячейки, для расчета по МКЭ, показана на рис. 2. На рис.1 элементарная ячейка разбита на вертикальные и горизонтальные элементы. Внешняя нагрузка через несущие слои действует на ячейку. В примере, несущие слои (горизонтальные пластины) имеют толщину 1мм, материал - алюминий АМГ2-Н ($E=69000\text{МПа}$, $\nu=0,35$, $\rho=26,8\text{кН/м}^3$).

Сотовый пирамидальный заполнитель (вертикальные пластины) изготовлен из сплава алюминия Д16-АТ ($E=69000\text{МПа}$, $\nu=0,35$, $\rho=26,8\text{кН/м}^3$). Толщина листов сплава алюминия равна 0,24мм. Размеры грани пирамидальной ячейки $r = 1,25\text{ см}$, $c = 6,00\text{ см}$;

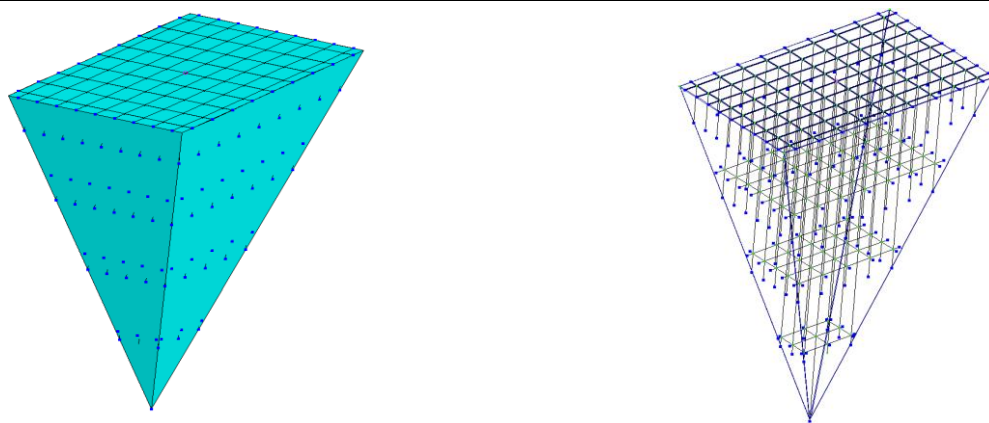


Рис. 2. Расчетная схема пирамидального заполнителя с волокном

Fig. 2. The design scheme of the pyramidal filler with fiber

Расчет движения твердого тела в заполнителе наполненного волокном был произведен с помощью МКЭ 10 с численным описанием (рис.3.)

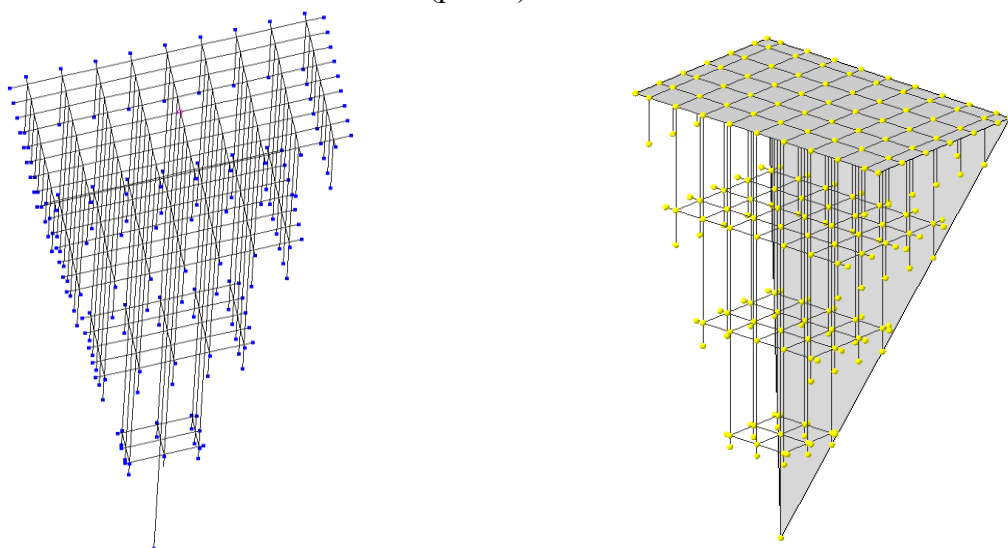


Рис.3. Модель волокна и сечение пирамидального заполнителя

Fig. 3. Fiber Model and Pyramidal Aggregate Cross Section

Усредненная величина силы импульса/удара и продолжительность воздействия определялись по методике, изложенной в справочной системе ПК ЛИРА-САПР (рис.4).

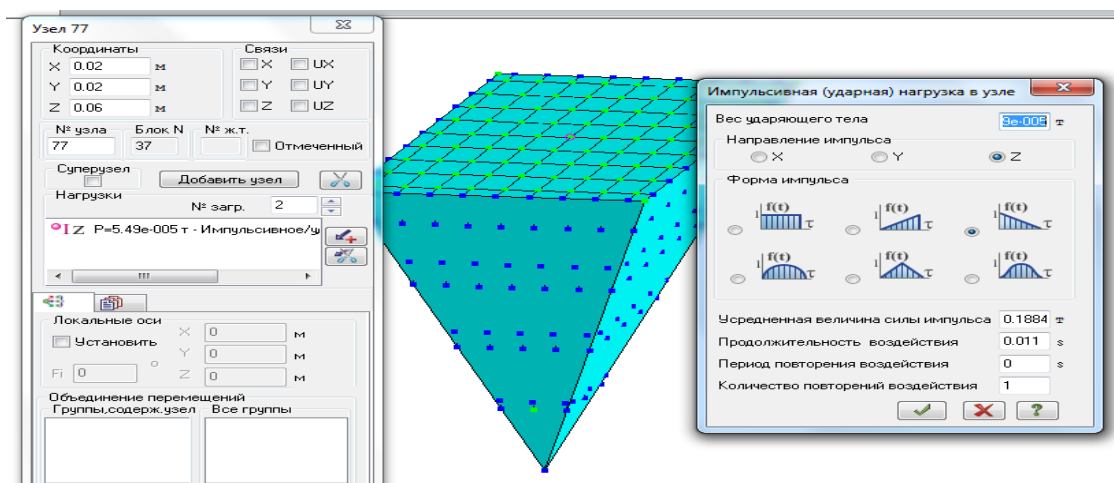


Рис.4. Схема приложения динамической нагрузки
Fig. 4. Dynamic Load Application Scheme

Обсуждение результатов. По результатам расчета видно, как волокно деформируется (рис.5). На рисунках в шкале по цветам показаны величины перемещений (см).

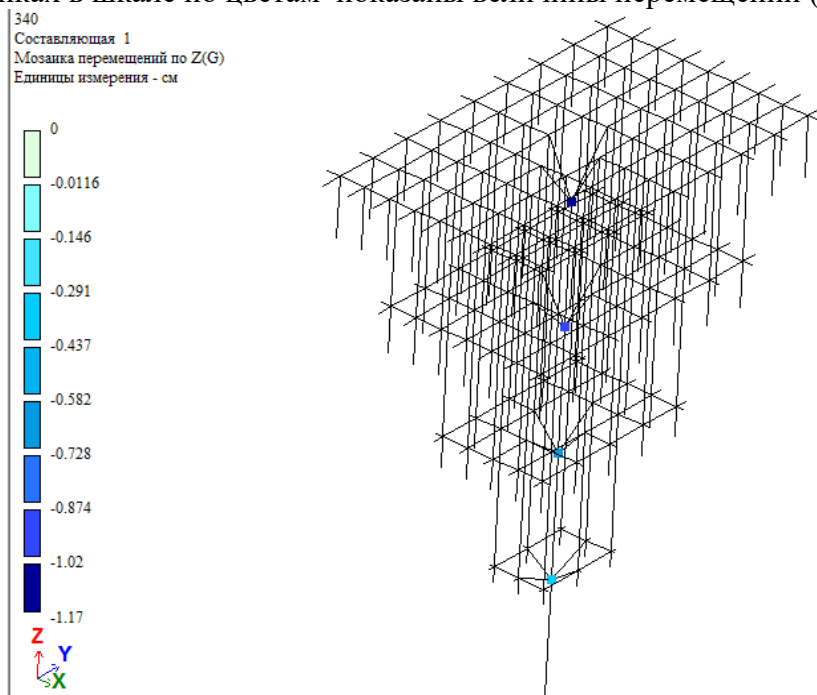


Рис. 5. Деформирование наполнителя (волокна)

Fig.5. Deformation of the filler (fiber)

На рис. 6-9 показаны усилия в наполнителе при скорости движущегося тела $V=340\text{м/с}$. На рисунке в вертикальной шкале по цветам показаны величины усилий (тс). На полученных рисунках видно как ударник перемещается внутри волокнистого материала, т.е. использование ПК ЛИРА-САПР позволяет оценить работу наполнителя при движении в нем твердого тела.

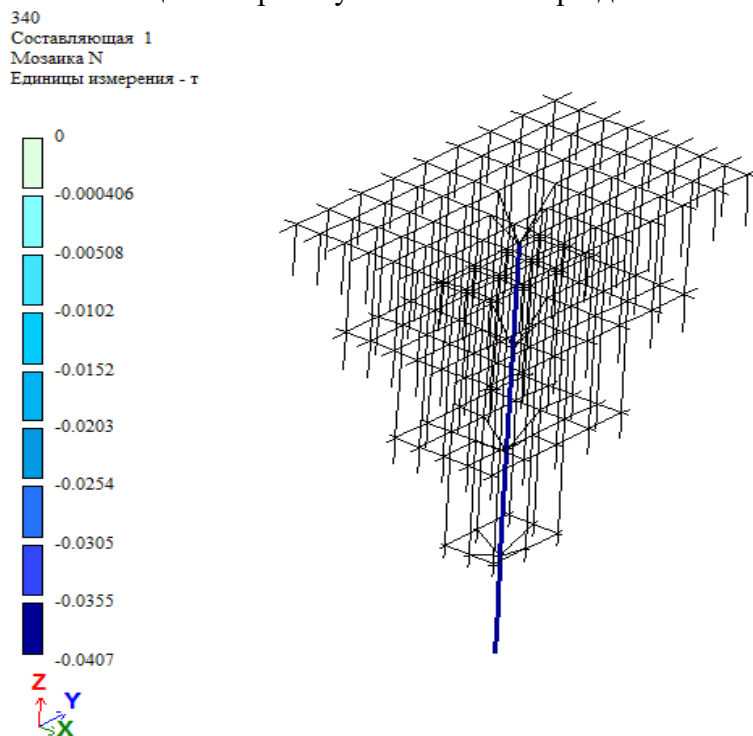


Рис.6. Продольные усилия N в волокне при скорости движения твердого тела $V=340\text{м/с}$

Fig. 6. Longitudinal forces N in the fiber at a speed of movement of a solid body $V = 340\text{м / s}$

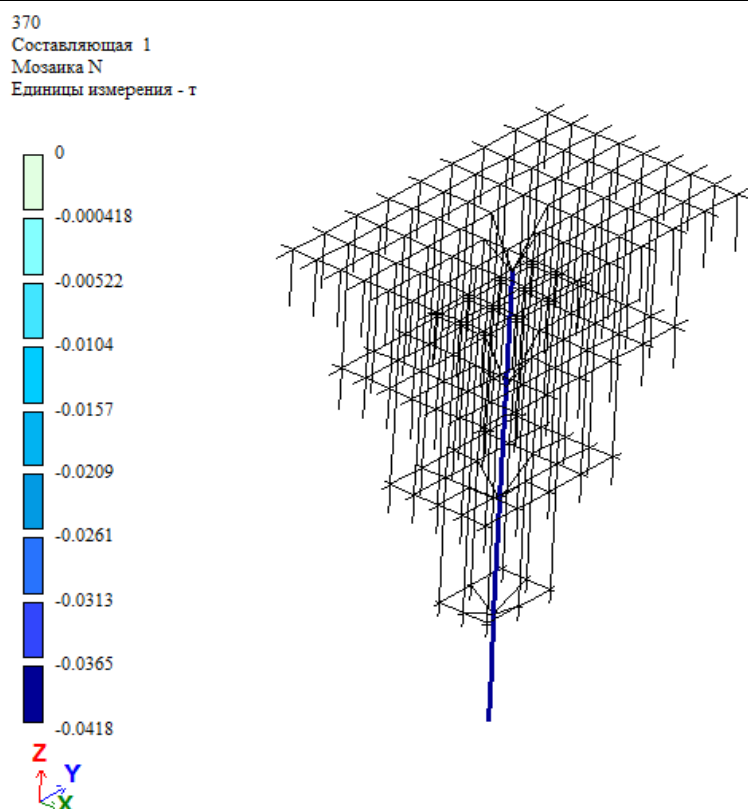


Рис. 7. Продольные усилия N в волокне при $V=370\text{м/с}$
 Fig. 7. Longitudinal forces N in the fiber at $V = 370\text{м} / \text{s}$

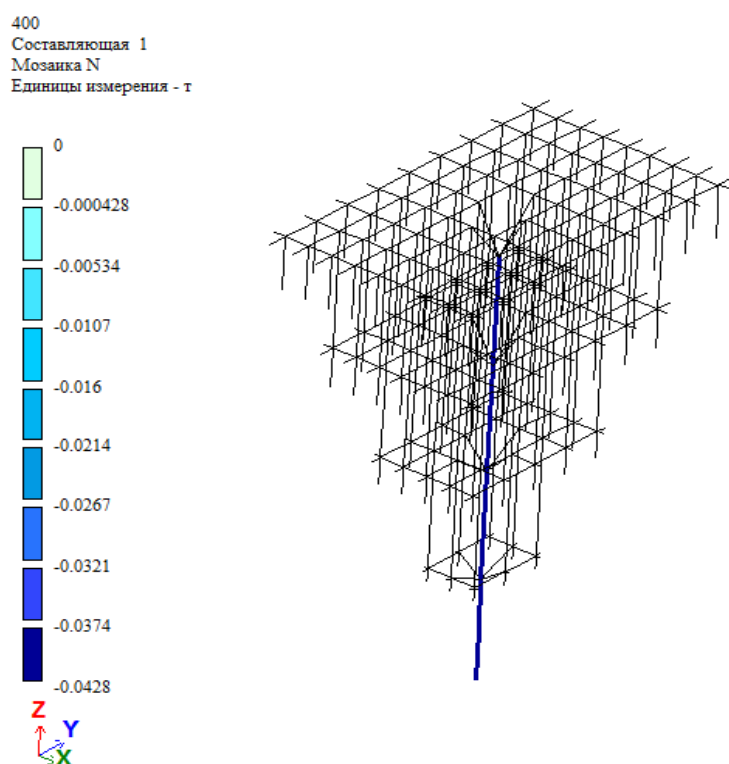


Рис. 8. Продольные усилия N в волокне при $V=400\text{м/с}$
 Fig. 8. The longitudinal forces N in the fiber at $V = 400\text{м} / \text{s}$

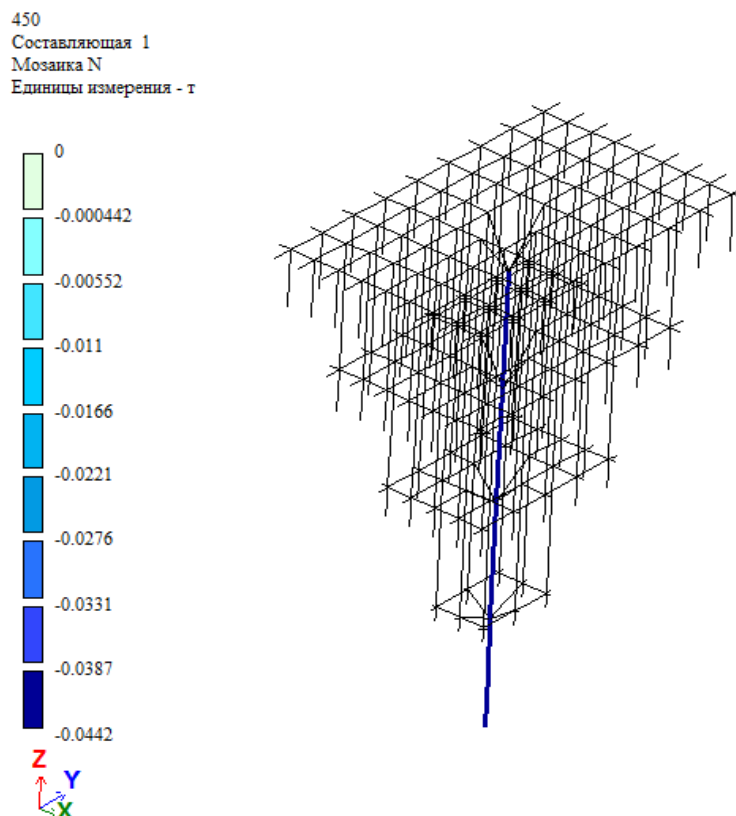


Рис. 9. Продольные усилия N в волокне при $V=450\text{ м/с}$

Fig. 9. The longitudinal forces N in the fiber at $V = 450 \text{ m / s}$

Результаты расчета перемещения ударника в волокнистом материале в зависимости от скорости тела (ударника), плотности наполнителя (волокна) показаны на рис. 10.

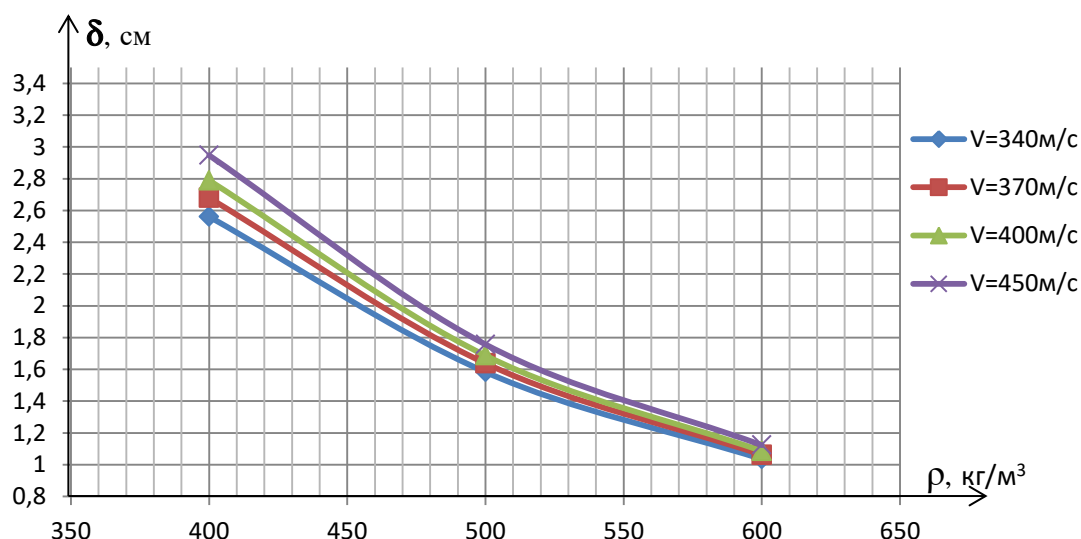


Рис.10. Графики перемещения ударника в волокне, в зависимости от плотности наполнителя, при различных скоростях движения тела (ударника)

Fig. 10. Graphs of the movement of the striker in the fiber, depending on the density of the filler, at various speeds of movement of the body (striker)

Полученные графики говорят, о том, что перемещение ударника в наполнителе зависит от ее скорости и плотности волокон. Это говорит о том, что при проектировании трехслойных конструкций, для определенного сооружения, можно оптимизировать вес с учетом предполагаемой скорости ударника.

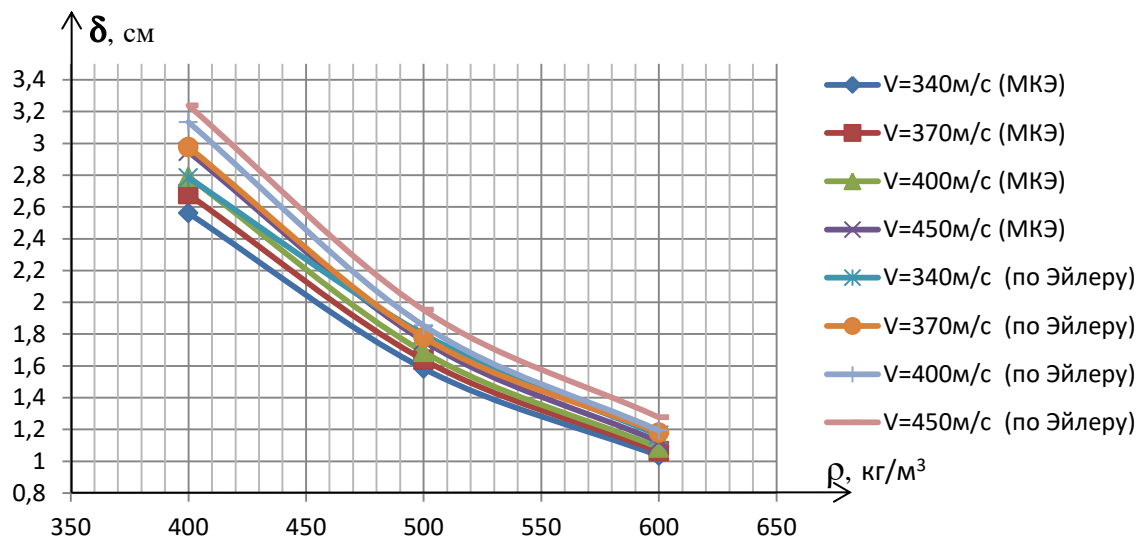


Рис.11. Графики перемещения ударника в волокне, в зависимости от плотности наполнителя, при различных скоростях движения тела (ударника) по МКЭ и с помощью уравнений (1)

Fig. 11. Graphs of the movement of the striker in the fiber, depending on the density of the filler, at various speeds of the body (striker) according to the FEM and using equations (1)

Для проверки правильности расчетов, проведенных при помощи МКЭ, авторы произвели расчет движения твердого тела в волокнистом материале при помощи уравнений полученных авторами ранее [10]:

$$\Delta N_{xz} + \Delta N_z = \Delta l \cdot \rho \cdot s \cdot \frac{\Delta^2 W}{\Delta t^2} \quad (10)$$

здесь $\Delta l \cdot s \cdot \rho = m$ - масса элемента;

ΔN_{xz} - усилия сдвига между элементами на которые разбит волокнистый материал (рис.2.):

ΔN_z - усилие в элементе волокна под движущимся телом (рис.5);

$\frac{\Delta^2 W}{\Delta t^2}$ - ускорение движущегося тела.

Уравнение решалось методом Эйлера с пересчётом. Сравнительные результаты расчета по обоим методам приведены на рис. 11.

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что расхождение между результатами расчета трехслойной конструкции при действии динамических нагрузок с помощи МКЭ и с помощью аналитических зависимостей составил около 10%. Это говорит о возможности использования метода конечных элементов при расчете трехслойных конструкций на действие динамических сосредоточенных сил.

Библиографический список:

1. Вольмир А.С., Терских В.Н. Исследование динамики конструкций из композитных материалов на основе метода суперэлементов// Механика композитных материалов. 1979. №4. С. 652-655.
2. Витман Ф.Ф., Златин Н.А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделирование// ЖТФ, 1963. 982с.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: 1984г., 424с.
4. Гольдсмит В. Удар. Литературы по строительству. М.:1965. 448 с.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009г, 360стр.
6. Колесник И.А., Иманходжаев Ц.У. Исследование нелинейных колебаний трехслойной оболочки, несущей подвижную инерциальную нагрузку// Прикладная механика. М., т.16(1). 1981. С. 16-40.
7. Новичков Ю.Н., Арутюнян Г.В. Исследование собственных колебаний многослойных плит// Динамика и прочность машин: Тр. МЭИ. Вып. 164. М., 1973. С. 30-37.

8. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988, 284с.
9. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грешчук Л.Б., Курран Д.Р. Динамика Удара: Пер. с англ. М.: «Мир», 1985. 296с.
10. Керимов Р.М., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчёт трёхслойных конструкций при динамическом нагружении сосредоточенной нагрузкой. Вестник ДГТУ, Технические науки. 2015. №38. С.110-118.
11. Устарханов О.М. Напряженно-деформированное состояние волокнистого материала при динамическом ударе. Научно-тематический сборник. Махачкала. 1995. С. 135-140.
12. Устарханов О.М. «Вопросы прочности трехслойных конструкций с регулярным дискретным заполнителем»: Дисс. д-ра техн наук. Ростов-на-Дону. 2000.
13. Chang J-S and Chen H-C Free vibrations of sandwich plates of variable thickness// J. Sound Vib. 155(2), 1992. pp.195-208.
14. Gautham BP and Gancsan N. Vibration and damping characteristics of spherical shells with a viscoelastic core// J. Sound Vib. 170(3), 1994. pp.289-301.
15. Hwu C and Hu JS Buckling and postbuckling of delaminated composite sandwich beams// AIAA J 30(7), 1992, pp.1901-1909.
16. Granz C. Lehrbuch der Ballistik. 1: Aussere Ballistik. Berlin, J. Springer, 1925, 457.
17. Helie F. Traite de balistique experimentale. Paris, Dumaine, 1884.
18. Robertson H.P. Terminal Ballistics. Washington, National Research Council, 1941.

References:

1. Vol'mir A.S., Terskikh V.N. Issledovaniye dinamiki konstruksiy iz kompozitnykh materialov na osnove metoda superelementov// Mekhanika kompozitnykh materialov. 1979. №4. S. 652-655. [Volmir A.S., Terskikh V.N. The study of the dynamics of structures made of composite materials based on the method of superelements // Mechanics of composite materials. 1979. No. 4. pp. 652-655. (In Russ)]
2. Vitman F.F., Zlatin N.A. O protsesse soudareniya deformiruyemykh tel i yego modelirovaniye// ZHTF, 1963. 982s. [Vitman F.F., Zlatin N.A. On the process of collision of deformable bodies and its modeling // ZhTF, 1963. 982c. (In Russ)]
3. Gallager R. Metod konechnykh elementov. M.: 1984g, 424s. [Gallager R. The finite element method. M.: 1984, 424p. (In Russ)]
4. Gol'dsmit V. Udar. Literaturny po stroitel'stvu. M.:1965. 448 s. [Goldsmith W. Impact. Literature on construction. M.: 1965. 448 p. (In Russ)]
5. Gorodetskiy A.S., Yevzerov I.D. Komp'yuternyye modeli konstruksiy. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2009g, 360str. [Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures. M.: Publishing house of the Association of construction universities. 2009, 360 p. (In Russ)]
6. Kolesnik I.A., Imankhodzhayev TS.U. Issledovaniye nelineynykh kolebaniy trekhslonnoy obolochki, neshchey podvizhnuyu inertsiyal'nyuyu nagruzku// Prikladnaya mekhanika. M., t.16(1). 1981. S. 16-40. [Kolesnik I.A., Imankhodzhayev Ts.U. Investigation of nonlinear vibrations of a three-layer shell that does not carry a mobile inertial load // Applied Mechanics. M., T. 16 (1). 1981. pp. 16-40. (In Russ)]
7. Novichkov YU.N., Arutyunyan G.V. Issledovaniye sobstvennykh kolebaniy mnogoslonykh plit// Dinami-ka i prochnost' mashin: Tr. MEI. Vyp. 164. M., 1973. S. 30-37. [Novichkov Yu.N., Harutyunyan G.V. Study of natural vibrations of multilayer plates // Dynamics and machine strength: Tr. MPEI. Vol. 164.M., 1973. pp. 30-37. (In Russ)]
8. Rikards R.B. Metod konechnykh elementov v teorii obolochek i plastin. Riga: Zinatne, 1988, 284s. [Rickards R.B. The finite element method in the theory of shells and plates. Riga: Zinatne, 1988, 284p.
9. Zukas Dzh. A., Nikolas T., Swift KH.F., Greshchuk L.B., Kurran D.R. Dinamika Uudara: Per. s angl. M.: «Mir», 1985. 296s. [Zukas J. A., Nicholas T., Swift H.F., Greshchuk LB, Kurran D.R. Impact Dynamics: Per. from English M.: "World", 1985. 296 p. (In Russ)]
10. Kerimov R.M., Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M. Raschot trokhsloynykh konstruksiy pri dinamicheskom nagruzhении sosredotochennoy nagruzkoy. Vestnik DGTU, Tekhnicheskiye nauki. 2015. №38. S.110-118. [Kerimov R.M., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Calculation of three-layer structures under dynamic loading with concentrated load. Bulletin of DSTU, Engineering. 2015. №38. pp. 110-118. (In Russ)]
11. Ustarkhanov O.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye voloknistogo materiala pri dinamicheskom udare. Nauchno-tematicheskiy sbornik. Makhachkala. 1995. S. 135-140. [Ustarkhanov O.M. Stress-strain state of a fibrous material under dynamic impact. Scientific and thematic collection. Makhachkala. 1995.pp 135-140. (In Russ)]
12. Ustarkhanov O.M. «Voprosy prochnosti trekhslonykh konstruksiy s regul'yarnym diskretnym zapolni-telem»: Diss. d-ra tekhn nauk. Rostov-na-Donu. 2000. [Ustarkhanov O.M. "Strength issues of three-layer structures with a regular discrete filler": Diss. Doctor of technical sciences. Rostov-on-Don. 2000. (In Russ)]
13. Chang J-S and Chen H-C Free vibrations of sandwich plates of variable thickness // J. Sound Vib. 155 (2), 1992. pp.195-208.

14. Gautham BP and Gancsan N. Vibration and damping characteristics of spherical shells with a viscoelastic core // J. Sound Vib. 170 (3), 1994. pp.289-301.
15. Hwu C and Hu JS Buckling and postbuckling of delaminated composite sandwich beams // AIAA J 30 (7), 1992, pp.1901-1909.
16. Granz C. Lehrbuch der Ballistik. 1: Aussere Ballistik. Berlin, J. Springer, 1925, 457.
17. Helie F. Traite de balistique experimentale. Paris, Dumaine, 1884.
18. Robertson H.P. Terminal Ballistics. Washington, National Research Council, 1941.

Сведения об авторах:

Устарханов Осман Магомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail: **dgtu.pgs@mail.ru**

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail: **hairulla213@mail.ru**

Абакаров Марат Саидович, заместитель руководителя Управления Росреестра по Республике Дагестан; e-mail: **05_upr@rosreestr.ru**

Алибеков Митхат Султанмахмудович, ассистент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail: **mithat@yandex.ru**

Information about the authors:

Osman M. Ustarkhanov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail: **dgtu.pgs@mail.ru**

Hayrulla M. Muselemov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail: **hairulla213@mail.ru**

Marat S. Abakarov, Deputy Head of the Office of the Federal Register for the Republic of Daghestan; e-mail: **05_upr@rosreestr.ru**

Mithat S. Alibekov, Assistant, Department of Construction Structures and Hydraulic Engineering Structures; e-mail: **mithat@yandex.ru**

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 15.07.2019.

Принята в печать 10.09. 2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.07.2019.

Accepted for publication 10.09. 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 (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.

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 ImamaShamilya 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 46– №3 – 2019.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 46, No.3, 2019.

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 30.09.2019г. Сдано в печать 30.09.2019г.

Формат 60x84 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.