

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, №4, 2019.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 46, No.4, 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; GoogleScholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Соционет, КиберЛенинка.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 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; Cyber-Leninca.

© 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»

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 46, № 4, 2019

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

<p>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 «НИИЦ «Строительство», г. Москва, РФ. Иванов А.П., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой Московского физико-технического института (государственного университета), г. Долгопрудный, РФ. Казачек В.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института жилища - НИПТИС им. Атаева С.С., директор ООО «Мобильная диагностика в строительстве», г. Минск, Республика Беларусь. Каргин Н.И., д.т.н., профессор, проректор, зам. директора Института функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, РФ. Кобзаренко Д.Н., д.т.н., профессор Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, РФ. Кругляков А.А., д.т.н., профессор, генеральный директор научно-коммерческой фирмы WBN, г. Берлин, Германия Кутузов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ. Ларионов А.Н., д.э.н., профессор, генеральный директор ООО «Научно-исследовательский центр «Стратегия», г. Москва, РФ. Лобанов И.Е., д.т.н., ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ. Магомедов М. Х., д-р.физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «САУНО», НПФ, г. Москва, РФ. Мажиев Х.Н., д.т.н., профессор Грозненского государственного нефтяного технического университета им. Академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, РФ. Маркосян М.В., д.т.н., профессор, директор ЗАО «Ереванский НИИ средств связи», г. Ереван, Республика Армения Мелехин В.Б., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Несветаев Г.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, РФ. Рогозин Е.А., д.т.н., профессор Воронежского института Министерства внутренних дел России, г. Воронеж, РФ. Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, научный руководитель НИИ «Микроэлектроники и нанотехнологий» Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. МАХ, НИИ промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, РФ. Финаев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, РФ. Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Шахтарин Б.И., д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ.</p>	<p>Группы научных специальностей 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (по отраслям) 05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ 05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки), 05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки), 05.23.17 – Строительная механика 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 46, №4 Махачкала, 2019 – 208с. Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский</p>
<p>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.</p>	<p>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/</p>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ...8

Гаджиев Х.М., Гаджиев Д.С., Курбанов И.М.

ДЕКОМПРЕССИОННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ОПРЕСНИТЕЛЬ С УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ 8

Евдулов О.В., Габитов И.А., Гюльмагомедов К.С., Кобзаренко Д.Н., Семиляк А.И.

МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ ИЗ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА 19

Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В., Каримов М.Ш., Руденко А.М.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ
УСТАНОВОК АДсорбЦИОННОГО ТИПА 32

Сагдеев Д.И., Абдулагатов И.М., Никулин Н.К., Тюлькин В.И.

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПЛОТНОМЕРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ 42

Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО
РЕЖИМА МОДУЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 53

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 65

Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ
ОРГАНИЗАЦИЕЙ 65

Гебель Е.С., Ибатуллин А.А., Пешко М.С., Гудинов В. Н.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА МОДЕЛИ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ
АТМОСФЕРНОЙ ТРУБЧАТКОЙ 75

Кадиев И.П., Кадиев П.А., Кудиев Б.Р.

РАССЕИВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ «ПАКЕТОВ ОШИБОК» В ИНФОРМАЦИОННЫХ
МАССИВАХ МЕТОДОМ ИНДЕКСНОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ 84

Лобанов И.Е.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ПОЛУКРУГЛЫМИ
ТУРБУЛИЗАТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ 91

Магомедова М.Р., Курбанова З.А., Шангереева Б.А.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАИЛЕНИЯ
ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ АКСАЙ 102

Наздрюхин А.С., Храпцов И.Н., Тушев А.Н.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОВАРНЫХ ЧЕКОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ
И РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ 113

Розозин Е.А., Силка Д.Г., Гуляев О.А. МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ КАНАЛАМ НА ОБЪЕКТЕ ИНФОРМАТИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	123
Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИГУР ЧЕТВЕРТОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКА – ОВАЛА КАССИНИ И ГИПЕРБОЛЫ	134
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	143
Айдемиров К.Р., Агапов В.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИНС	143
Буланин В.А. УЧЕТ ЭНЕРГИИ НА ИСТОЧНИКЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	155
Моргун Л.В., Богатина А.Ю., Моргун В.Н. МАТЕРИАЛЫ И СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ	167
Муртазалиев Г.М., Батдалов М.М., Акаев А.И., Булгаков А.И., Пайзулаев М.М. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ НЕСУЩИХ СЛОЕВ ПОКРЫТИЙ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ПОЛОС АЭРОДРОМОВ	176
Несветаев Г.В., Долгова А.В., Постой Л.В., Хаджишалапов Г.Н. О ВЛИЯНИИ РЕДИСПЕРГИРУЕМЫХ ПОРОШКОВ И НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ	186
Шершенов Р.А., Ефимов А. Ю., Шмаков В.Ю. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	197
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	205

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 . 4 , 2 0 1 9 .

<p>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 NIIZHB, 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. Kobzarenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakow, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland; Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia; Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Gadzhimurad N. Khadzhisalalov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>	<p>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)</p>
<p>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.</p>	<p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 46, No.4 Makhachkala, 2019–208p. Published by decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING	8
<i>H.M. Gadzhiev, D.S. Gadzhiev, I.M. Kurbanov</i> THERMOELECTRIC PROCESSES IN AN EFFICIENT LIGHT-EMITTING TRANSISTOR	8
<i>O.V. Evdulov, I.A. Gabitov, K.S. Gyulmagomedov, D.N. Kobzarenko, A.I. Semilyak</i> A PROTOTYPE DEVICE FOR PRODUCING FRESH WATER FROM ATMOSPHERIC AIR	19
<i>M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, A.M. Rudenko</i> INCREASING THE WORKING EFFICIENCY OF SOLAR POWER ABSORPTION REFRIGERATOR UNITS	32
<i>D.I. Sagdeev, I.M. Abdulagatov, N.K. Nikulin, V.I. Tyulkin</i> MODERNISED DESIGN OF A HYDROSTATIC DENSIMETER FOR MEASURING DENSITY OF HIGHLY VISCOUS OILS	42
<i>Sh.A. Yusufov, A.M. Ibragimova, S.A. Peredkov, T.E. Sarkarov, R.G. Mitarov</i> THERMOELECTRIC SYSTEM FOR PROVIDING A HEAT REGIME FOR MODULAR ELECTRONIC EQUIPMENT	53
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT	65
<i>T.G. Aigumov, V.B. Melekhin</i> DECISION-MAKING MODELLING IN A BUILDING ORGANIZATION MANAGING	65
<i>E.S. Gebel, A.A. Ibatullin, M.S. Peshko, V.N. Gudinov</i> SYNTHESISING THE MODEL OF THE PREDICTIVE MAINTENANCE OF ATMOSPHERIC PIPE STILL	75
<i>I.P. Kadiev, P.A. Kadiev, B.R. Kudaev</i> INTERLEAVING BURST ERROR ELEMENTS IN INFORMATION ARRAYS USING THE METHOD OF INDEX STRUCTURISATION	84
<i>I.E. Lobanov</i> MODELING HEAT EXCHANGE DEPENDING ON THE PRANDTL NUMBER FOR VARIOUS GEOMETRIC AND REGIME PARAMETERS	91
<i>M.R. Magomedova, Z.A. Kurbanova, B.A. Shangereeva</i> COMPUTER SIMULATION OF DETERMINING SILTATION VOLUMES OF WATER RESERVOIR STORAGE ON THE AKSAY RIVER	102
<i>A.S. Nazdryukhin, I.N. Khramtsov, A.N. Tushev</i> PROCESSING IMAGES OF SALES RECEIPTS FOR ISOLATING AND RECOGNISING TEXT INFORMATION	113
<i>E.A. Rogozin, D.G. Silka, O.A. Gulyaev</i> METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SECURITY OF INFORMATION PASSED THROUGH THE TECHNICAL CHANNELS OF A SPECIAL-PURPOSE INFORMATISATION OBJECT	123

<i>B.I. Shakhtarin, T.G. Aslanov, Tetakaev U.R.</i> DETERMINATION OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATES USING THE CASSINI OVAL METHOD WITH SECOND- AND FOURTH-ORDER HYPERBOLA FIGURES	134
BUILDING AND ARCHITECTURE	143
<i>K.R. Aydemirov, V.P. Agapov</i> STUDY OF THE INFLUENCE OF CRACKS ON THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE PLATES USING THE PRINS CALCULATION COMPLEX	143
<i>V.A. Bulanin</i> METHOD FOR MEASURING ENERGY IN HEAT SUPPLY SOURCES	155
<i>L.V. Morgun, A.Yu. Bogatina, V.N. Morgun</i> MATERIALS AND MODERN STRUCTURAL SOLUTIONS FOR BUILDING STRUCTURES	167
<i>G.M. Murtazaliev, M.M. Batdalov, A.I. Akayev, A.I. Bulgakov, M.M. Payzulaev</i> CALCULATION AND DESIGN OF CELLULAR CARRYING LAYERS OF AIRFIELD RUNWAY PAVEMENTS	176
<i>G.V. Nesvetaev, A.V. Dolgova, L.V. Postoy, G.N. Khadzhishalapov</i> INFLUENCE OF REDISPERSIBLE POWDERS AND LOW-MODULAR INCLUSIONS ON THE FROST RESISTANCE OF THE FINE-GRAINED CONCRETE CONTACT ZONE	186
<i>R.A. Shershenov, A.Yu. Efimov, V. Yu. Shmakov</i> INCREASING THE RELIABILITY OF HEATING SYSTEMS	197
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	205

Для цитирования: Гаджиев Х.М., Гаджиев Д.С., Курбанов И.М. Декомпрессионный полупроводниковый термоэлектрический опреснитель с ультрафиолетовым облучением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 8-18. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-8-18

For citation: H.M. Gadzhiev, D.S. Gadzhiev, I.M. Kurbanov. Thermoelectric processes in an efficient light-emitting transistor. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 8-18. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-8-18

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-8-18

ДЕКОМПРЕССИОННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОПРЕСНИТЕЛЬ С УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Гаджиев Х.М., Гаджиев Д.С., Курбанов И.М.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструкции декомпрессионного полупроводникового термоэлектрического опреснителя с ультрафиолетовым облучением. **Метод.** Конструкция декомпрессионного полупроводникового термоэлектрического опреснителя с ультрафиолетовым облучением позволяет за счет изменения давления в опреснителе понизить температуру кипения морской воды, вытекающей пресной воды и рассола, причем, энергоэффективность установки увеличится. **Результат.** Применение декомпрессионного полупроводникового термоэлектрического опреснителя с ультрафиолетовым облучением практически уменьшает температуру кипения морской воды и полностью устраняет паразитные выделения тепла Джоуля. При этом термоэлектрический эффект Пельтье по охлаждению полностью сохраняется, доводя коэффициент полезного действия (КПД) опреснителя практически до 100%, что повышает энергоэффективность опреснителя в целом. **Вывод.** Декомпрессионный полупроводниковый термоэлектрический опреснитель с ультрафиолетовым облучением может быть использован для получения пресной воды и концентрированных растворов из любых водных растворов, а также переработки сточных вод промышленных предприятий с одновременной дезинфекцией бактерий и вирусов. Конструкционные материалы опреснительной установки являются экологически безопасными.

Ключевые слова: декомпрессионный полупроводниковый термоэлектрический опреснитель, опреснение, ультрафиолетовое излучение, морская вода, дезинфекция

DECOMPRESSION SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC DESALINATOR WITH UV RADIATION

H.M.Gadzhiev, D.S.Gadzhiev, I.M.Kurbanov

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

Abstract. Objectives. *The development of a decompression semiconductor thermoelectric desalinator with ultraviolet radiation. Methods.* *The design of a decompression semiconductor thermoelectric desalinator with ultraviolet radiation makes it possible to decrease the boiling points of sea-water and the obtained fresh water and brine by changing the pressure in the desalinator thus increasing the device's energy efficiency. Results.* *The use of the designed decompression semiconductor thermoelectric desalinator with ultraviolet radiation practically reduces the boiling point of seawater, completely eliminating Joule's parasitic heat release. The Peltier thermoelectric effect of heating and cooling is completely preserved, bringing the desalinator efficiency coefficient up to almost 100% and improving its energy-saving characteristics as a whole. Conclusion.* *A decompression semiconductor thermoelectric desalinator with ultraviolet radiation can be used to produce fresh water and concentrated solutions from any aqueous solutions, as well as to treat wastewater from industrial enterprises with simultaneous bacterial and virus disinfection. The construction materials of the desalination device are environmentally friendly.*

Keywords: *decompression semiconductor thermoelectric desalinator, desalination, ultraviolet radiation, sea water, disinfection*

Введение. Современный этап развития человечества сталкивается с большим количеством проблем планетарного масштаба. Наиболее критичными являются экологические вопросы. Жизнь невозможна без воды и большинство живых организмов нуждается в большом количестве пресной воды. Необходима вода пресная не только в чистом виде для употребления внутрь, но и для выращивания растений и животных в больших количествах. Человечество столкнулось с этой проблемой не только в XXI веке, ведь проблема воды всегда была актуальна. Загрязнение источников исторически приводило к войнам, эпидемиям, катастрофам.

В настоящее время существует большое количество различных вариантов для получения чистой воды. Наиболее целесообразно получать чистую воду из морской воды, запасы которой на планете Земля колоссальны.

Имеется также возможность для получения из ледников на вершинах гор или северных и южных полюсов, но проблема транспортировки делает экономически нецелесообразным такой способ получения пресной воды.

В тоже время вблизи морской воды существует множество городов и поселений человека, позволяющих после опреснения морской воды получить необходимое количество пресной воды для проведения сельскохозяйственных мероприятий и обеспечения промышленных предприятий.

Постановка задачи. Как известно, для получения пресной воды существуют различные способы [1-7]. Наиболее распространенными способами являются механическая фильтрация, предполагающая применение молекулярных фильтров и насоса с большим давлением. Но такие фильтры быстро забиваются, требуют замены, и экономически не целесообразно проводить опреснение таким способом.

Существует химические способы очистки, которые требуют приобретение специальных реактивов для очистки воды от всех посторонних компонентов, но такие реактивы удорожают стоимость системы очистки и, кроме того для каждого типа морской воды или грязной воды

требуется свой состав химических реактивов. Поэтому такой способ с экономической точки зрения так же не целесообразен для получения пресной воды в промышленных масштабах.

Следующим способом является замораживание морской воды при условии, что вначале образуется пресный лёд при невысоких отрицательных температурах и, только потом образуется морской солёный лёд. Если не доводить температуру до образования морского льда, то из морской воды будет вымораживаться его пресная часть, которую после нескольких таких процедур можно превратить в пресную воду.

Такой способ предпочтительнее следующего способа по превращению морской воды в пар, так как от комнатной температуры в пределах 20-30 градусов проще понизить температуру до 0 градусов, чем повысить до 100 градусов с учётом большой теплоемкости воды. Это потребует значительных энергозатрат при попытке кипячения морской воды. Но способ кипячения обладает тем преимуществом, что он нейтрализует бактериологическую опасность, содержащуюся в морской воде, и дезинфицирует её.

Кроме того, при замораживании часть микроорганизмов, загрязнения физическими частицами и химическими реактивами могут остаться даже в пресном льду. И это требует различных методов очистки, в том числе зонной плавки.

Однако эти дополнительные расходы сводят все преимущества способа охлаждения до 0 градусов по сравнению со способом кипячения при 100 градусах. Поэтому наиболее распространёнными опреснителями в настоящий момент являются опреснители, которые используют кипячение морской воды, превращение её в пресный пар и после конденсации этого пара использование пресной воды.

Для нагрева воды используются различные системы от использования дров, газа, нефти других расходных энергоресурсов до использования возобновляемых источников энергии типа солнца. Возможно также использование атомных реакторов, как побочный эффект их действия получения электроэнергии, так и специальные опреснительные установки, которые способны преобразовать большие количества морской воды в пресную. Однако, все эти способы энергозатратны, что делает с экономической точки зрения невыгодным получение в больших количествах пресной воды.

Для решения этих проблем необходимо устранить существующие недостатки. В качестве основных видов недостатков можно привести следующий прототип. На рис.1 изображён опреснитель, использующий термоэлектрические устройства для получения пресной воды методом выпаривания.

По трубопроводу 1 из ёмкости с морской водой 4, морская вода поступает в средний контейнер с температурой окружающей среды, и её температура будет повышаться до температуры кипения (парообразования).

Нагрев происходит вначале через тонкие стенки теплообменника, причем, чем выше поднимается морская вода, тем больше она будет нагреваться [6, 9]. После этого термомодуль доводит температуру этой воды до температуры кипения, работая как тепловой насос. Причём тепловой насос будет находиться в энергетически выгодном режиме, когда он прокачивает при 100 градусах температуру от водяного пара к воде, находящейся при температуре кипения 100 градусов [1, 4, 5, 10]. Образовавшийся пар конденсируется на второй стороне термомодуля 5 и поступает в ёмкость 2 и далее к потребителю пресной воды. В ёмкости 3 накапливается рассол, который сливается обратно в море.

Таким образом, функционируют термоэлектрические опреснители, обладающие наибольшими энергоэффективными параметрами [2,3]. Однако такие термомодульные опреснители не позволяют получать в больших промышленных масштабах необходимое количество пресной воды.

Методы исследования. Для устранения существующих недостатков у традиционных опреснителей целесообразно разработать схему опреснителя, который будет использовать преимущества кипячения, совмещая их с преимуществами охлаждения, то есть не высоких температур.

Несмотря на абсурдность такого предположения, оно легко реализуемо с учётом того, что температура кипения воды при 100 градусах соответствует атмосферному давлению в 1 атмосферу. Но при пониженном давлении температура кипения воды также понижается. Причём температура кипения может равняться даже температуре окружающей среды. То есть, если создать декомпрессионную камеру, в которую поместить морскую воду, откачать воздух до значений 0,05 атмосферы, то в этом случае процесс кипения начнётся при незначительных величинах.

В табл. 1 приведена зависимость температуры кипения воды от атмосферного давления.

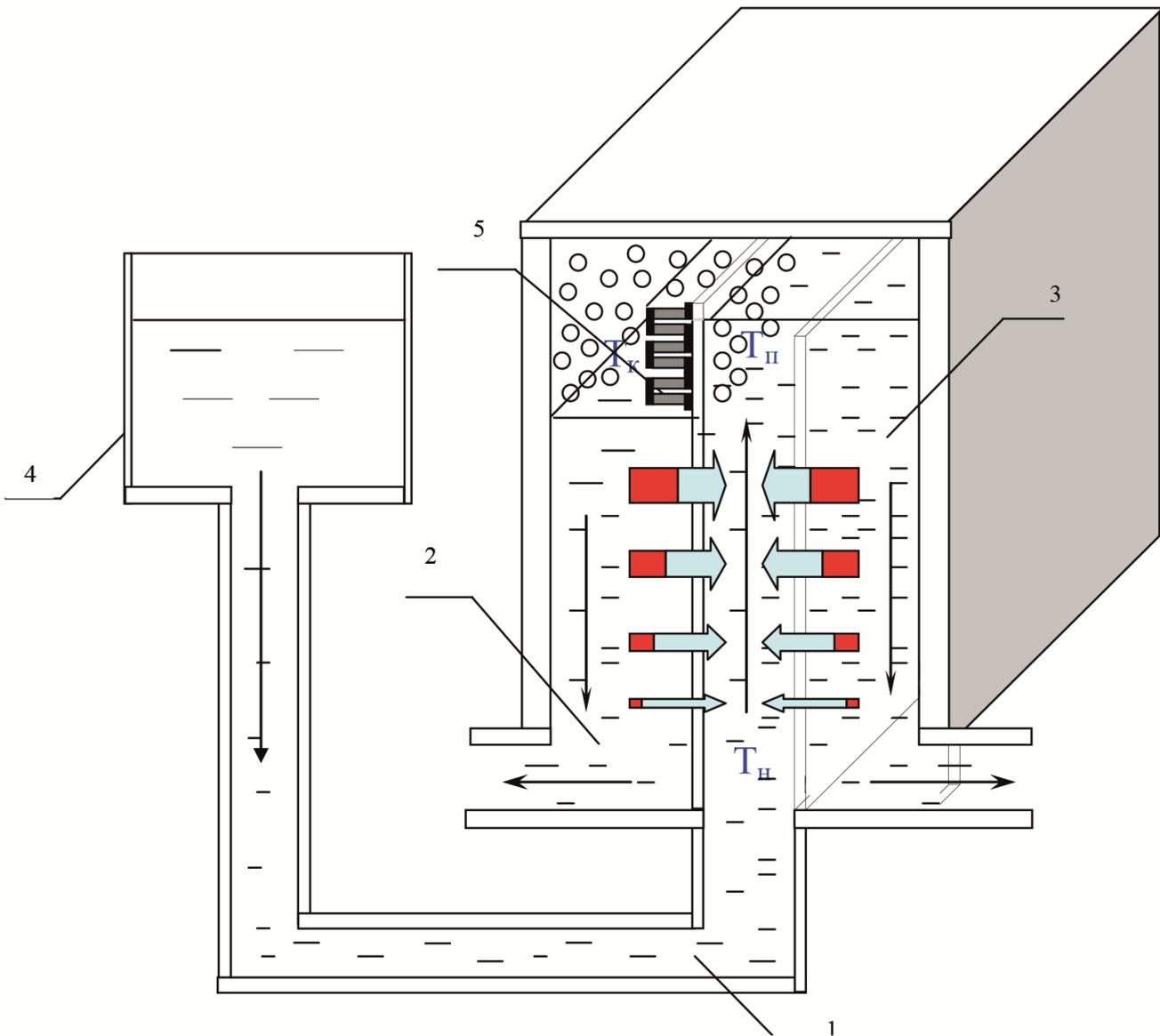


Рис.1. Опреснитель с термоэлектрическим устройством для получения пресной воды методом выпаривания

Fig. 1. Desalination device with a thermoelectric device for producing fresh water by evaporation

Таблица 1. Зависимость температуры кипения воды от атмосферного давления
Table 1. Dependence of the boiling point of water on atmospheric pressure

P		t _к , °C
кПа.	атм.	
0,981	0,01	6,698
1,961	0,02	17,20
3,923	0,05	28,64
9,807	0,1	45,45
19,61	0,2	59,67
29,42	0,3	68,68
39,23	0,4	75,42
49,03	0,5	80,86
58,84	0,6	85,45
68,65	0,7	89,45
78,45	0,8	92,99
88,26	0,9	96,18
98,07	1,0	99,09
101,3	1,033	100,00
147,1	1,5	110,79
196,1	2,0	119,62

Преимущество способа заключается в том, что вместо того, чтобы нагревать киловаттными устройствами воду до кипячения, можно компрессором с мощностью 200 Вт откачать воздух в контейнере и спровоцировать кипение с последующей конденсацией водяного пара. Это позволит на порядок понизить энергозатраты установки опреснения в целом.

Кроме того, нет необходимости для последующего охлаждения кипящей дистиллированной воды. То есть это также снизит энергозатраты, правда у кипятка было преимущество, что он убивал микроорганизмы, поэтому очищенная вода при температуре, к примеру, 20 градусов не убивает микробы и бактерии. Но, тем не менее, существует много различных способов, позволяющих осуществить очистку от бактерий, например, с помощью ультрафиолетового облучения. Такой способ даже будет более эффективен, чем кипячение.

На рис. 2 приведена схема опреснителя декомпрессионного типа. В контейнер 2 поступает морская вода из трубопровода 16 через электромагнитный клапан 6. Морская вода наполняет контейнер и через перегородку от него находится в контейнере 3 ёмкость для пресной воды. Электрический компрессор 1 через клапан электромагнитный 11 осуществляет откачку воздуха через клапан 7 из контейнера 2 и 3.

После того, как давление будет понижено до величины 0,05 атмосферы, начнется процесс кипения воды.

Пластина 21 представляет собой светодиодный термоэлектрический модуль, у которого одни спаи охлаждаются, а вторые излучают ультрафиолет в обе стороны перпендикулярно поверхности пластины.

После того как морская вода заполнила полностью до максимального уровня контейнер 2, клапан 6 перекрывается, клапан 7 открывается, клапан 10 перекрывается, клапан 12 перекрывается, клапан 11 открывается, включается электрический компрессор 1, и он начинает откачку воздуха через клапан 11 и 7 из декомпрессионных емкостей.

После понижения давления начинается процесс кипения морской воды, она превращается в пресный пар при температуре окружающей среды. Этот пар, коснувшись перегородки 21, находящейся в состоянии охлаждения и излучения ультрафиолета, будет конденсироваться, и стекать в виде пресной воды в контейнер 3.

После того как необходимая часть в контейнере 2 морской воды превратится в пар и необходимая часть будет набрана в заданной части пресной воды в контейнере 3, процесс прекращается и атмосферное давление впускается в эти декомпрессионные камеры. Затем можно открыть клапан электромагнитный 8 и слить морской рассол обратно в море через патрубок 20. А электромагнитный клапан 9 откроется и сольёт пресную воду через патрубок 19 к потребителю. Таким образом, работает половина опреснителя.

Для повышения энергоэффективности целесообразно сделать его двухтактным. Перед тем, как сбросить с 0,05 давления атмосферы до 1 атмосферы, можно перераспределить равномерно давление между двумя камерами. То есть, если вначале открыть клапан 12, то во второй части контейнера 4 и 5 зеркально представляющий собой декомпрессионные камеры для соленой воды и пресной, то там 1 атмосфера, соединившись с 0,05 атмосферы декомпрессионной камеры 2 и 3, выровняется до 0,5 атмосферы.

Таким образом, уже половина работы электрического компрессора будет выполнена и ему нужно будет только довести в камере 4 и 5 давление от 0,5 атмосферного до 0,05 атмосферного, что в два раза легче и быстрее. После того как давление достигнет заданного уровня можно осуществить опреснение морской воды в контейнере 5, превратив её в пресную воду в контейнере 4, для того чтобы через электромагнитный клапан 14 направить через трубопровод 19 к потребителю, а через клапан 15 через трубопровод 20 слить рассол в море.

Обсуждение результатов. Предложенный вариант работы декомпрессионного опреснителя обладает высокой энергоэффективностью за счёт того, что поэтапно осуществляет декомпрессию. Панель термоэлектрическая 21 предназначена для охлаждения и облучения ультрафиолетом. Одни полупроводниковые переходы термоэлектрической панели 21 - там, где электроны теряют энергию, будут поглощать тепло и создавать конденсат. Вторые полупроводниковые переходы термоэлектрической панели 21, там, где электроны трансформируют свою энергию в ультрафиолетовое излучение, будет проводиться дезинфекция пресной воды.

Для конденсации из парообразного состояния в жидкое пресной воды используется термоэлектрическое устройство. Термоэлектрическое устройство представляет собой конструкцию, состоящую из полупроводниковых ветвей р-п типов проводимости, энергия электронов которых подобрана таким образом, что при переходе электрона из одной зоны р в зону n избыток энергии превращается не в тепловую энергию, а в энергию излучения. Причём перепад энергии настолько велик, что энергия излучения расположена не в инфракрасном или красном диапазоне, а в ультрафиолетовой области спектра, что позволяет отвести большое количество энергии в виде ультрафиолетового излучения.

В других случаях, когда электрон переходит из зоны р в зону n, он теряет энергию и охлаждает полупроводниковые атомы в кристаллической решетке. Чем больше энергии будет выпущено излучающим спаем, тем больше энергии будет поглощено на другом спае [8, 11- 14].

Таким образом, эффективность такого устройства будет высокой и одновременно энергия излучения будет использована для уничтожения бактерий и вирусов в очищаемой воде. Так как перегородки будут зеркальными, то после многократного отражения они будут поглощены этими стенками и, тем самым, все фотоны, так или иначе, уничтожат все проявления биологических паразитов. В то же время КПД такой батареи будет выше за счёт того, что она выполнена в виде тонких пленок. Обычно термоэлектрические тепловые насосы делаются с определенной толщиной с учётом того, что перепад температур приводит к паразитному теплопереносу.

Но в нашем случае при наличии тонкой пленки теплопереноса не будет, так как нет перепада температур, а есть только низкая температура и излучающий ультрафиолет р-п переход.

Таким образом, так как площадь поперечного сечения р и п полупроводниковых модулей намного больше, чем высота этих модулей или толщина их, то Джоулево сопротивление таких модулей будет стремиться к нулю, и тепловые потери будут тоже сводиться к нулю и ими можно пренебречь. А эффект Пельтье остаётся в полном объёме также как и светоизлучающий эффект. Такой модуль позволяет нам с высокой эффективностью преобразовать электрическую энергию в охлаждающую поверхность и светоизлучающую поверхность в ультрафиолетовом диапазоне. Такая конструкция обладает высокой надёжностью и способна круглосуточно работать в составе декомпрессионного опреснителя.

Предложенный вариант конструкции декомпрессионного опреснителя обладает большими преимуществами по сравнению с энергоэффективным опреснителем, предложенным на рис. 1.

С точки зрения энергоэффективности можно привести расчет количества тепла, необходимого для понижения температуры в приведённой формуле (1) за счет изменения температуры при парообразовании.

$$Q_{\text{в}} = cm_{\text{в}}\Delta t \quad (1)$$

где $Q_{\text{в}}$ – количество теплоты для нагрева воды,
 c – теплоемкость воды,
 $m_{\text{в}}$ – масса воды,
 Δt – изменение температуры.

При кипении воды даже при комнатной температуре или температуре окружающей среды будет происходить отбор тепла для парообразования, что приведено в формуле (2).

$$Q_{\text{п}} = \lambda m_{\text{п}} \quad (2)$$

где $Q_{\text{п}}$ – количество теплоты для парообразования,
 λ – удельная теплоемкость,
 $m_{\text{п}}$ – масса пара.

Таким образом, можно оценить какой перепад температур будет достигнут, то есть с каким запасом нужно будет осуществить охлаждение для того, чтобы произошла конденсация полученного пара, формула (3).

$$\Delta t = \frac{\lambda m_{\text{п}}}{cm_{\text{р}}} \quad (3)$$

где Δt – изменение температуры,
 λ – удельная теплоемкость,
 c – теплоемкость воды,
 $m_{\text{п}}$ – масса пара,
 $m_{\text{р}}$ – масса рассола.

Массу рассола можно вычислить по формуле (4):

$$m_{\text{в}} = m_{\text{п}} + m_{\text{р}} \quad (4)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса воды,
 $m_{\text{п}}$ – масса пара,
 $m_{\text{р}}$ – масса рассола.

При конденсации основные процессы происходят на полупроводниковой термоэлектрической панели. Энергетический баланс определяется по формуле (5):

$$Q_k = -JPt + J^2Rt - E \quad (5)$$

где Q_k – количество теплоты, отводимой при конденсации,

J – электрический ток,

P – коэффициент Пельтье,

t – время,

R – электрическое сопротивление полупроводниковой термоэлектрической панели,

E – энергия ультрафиолетового излучения.

Приведённые математические соотношения подтверждают энергоэффективность декомпрессионного опреснителя с ультрафиолетовым облучением.

Вывод. Данная установка может быть использована в перспективе для получения медицинских препаратов в фармакологии, где выпаривание концентратов не допускает высоких температур. А также может быть использована в парфюмерной промышленности для получения различных ароматов, где также недопустима высокая температура при выпаривании концентрированных жидкостей.

Имеются перспективы для использования в химической промышленности в различных технологических процессах.

Декомпрессионный полупроводниковый термоэлектрический опреснитель с ультрафиолетовым облучением будет использоваться для получения пресной воды и концентрированных растворов из любых водных растворов, а также переработки сточных вод промышленных предприятий с одновременной дезинфекцией бактерий и вирусов. Конструкционные материалы опреснительной установки являются экологически безопасными.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. – С.-Пб.: ОАО «Издательство «Политехник»», 2005. – 534 с.
2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. – М.: «Академия», 2012. – 136 с.
3. Патент RU №2368877. МПК: G01K 7/22. Термостат с дискретными полупроводниковыми термоэлектрическими преобразователями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Гафуров К.А. // Оpubл. 08.08.2006. Бюл. №27.
4. Патент RU №2535597, МПК: F28D 15/06. Способ интенсификации теплообмена в тепловой трубе / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Оpubл. 20.12.2014. Бюл. №35.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. Высокоэффективные полупроводниковые термоэлектрические устройства и приборы. – Махачкала: ИПЦ ФГБОУ ВПО «ДГТУ», 2014. – 112 с.
6. Патент RU №2156424. МПК: F28D7/10, F28D21/00. Термоэлектрический полупроводниковый теплообменник / Исмаилов Т.А., Магомедов К.А., Гаджиева С.М., Мурадова М.М. // Оpubл. 20.09.2000.
7. Патент RU №2575650. МПК: G02F 1/04, B01D 1/22, B01D 5/00/ Способ опреснения морской воды при помощи тонкопленочного полупроводникового термоэлектрического теплового насоса цилиндрической формы / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гафурова З.М., Челушкин Д.А., Челушкина Т.А. // Оpubл. 20.09.2016.
8. Патент RU №2405230, МПК: H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. 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. // Оpubл. 01.06.2009. Бюл. №33.
9. Патент RU №2205279, МПК: F01P3/20. Термоэлектрический автомобильный радиатор / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Зарат А., Гафуров К.А. // Оpubл. 27.05.2003. Бюл. №27.
10. Патент RU №2098725, МПК: F25B21/02, H01M10/50. Способ охлаждения объекта каскадной термоэлектрической батареей и устройство для его осуществления / Манухин В.В., Дубинин Н.И., Колобаев В.А., Кудрявцев А.В., Волков В.Ю., Марковский М.А. // Оpubл. 10.12.1997.
11. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Многослойное излучающее термоэлектрическое устройство // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013.- №1. С.90-93.
12. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М. Тонкопленочные термоэлектрические устройства с отводом тепла в виде излучения для охлаждения микросистемной техники // Научное приборостроение. - 2013. – Т.23. -

№3. - С.120-124.

13. Патент RU №2507613. МПК: G12B 15/06, H01L 23/34, H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.// Оpubл. 20.02.2014. Бюл. №5.

14. Исмаилов Т.А. Гаджиев Х.М. Микроэлектронные компоненты с интегральным использованием эффекта Пельтье и оптического излучения. – Махачкала: ИПЦ ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2015. –112 с.

References:

1. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. – S.-Pb.: OAO «Izdatel'stvo «Politekhnik»», 2005. – 534 s. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - S.-Pb.: OJSC Polytechnic Publishing House, 2005. 534 p. (In Russ)]

2. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye teplovydelyayushchikh komponentov mikroelektronnoy tekhniki. – M.: «Akademiya», 2012. – 136 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Thermoelectric cooling of fuel components of microelectronic equipment. - M.: "Academy", 2012. - 136 p. (In Russ)]

3. Patent RU №2368877. МПК: G01K 7/22. Термостат с дискретными полупроводниковыми термоэлектрическими преобразователями/ Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Gafurov K.A.// Opubl. 08.08.2006. Byul. №27. [Patent RU No. 2368877. IPC: G01K 7/22. Thermostat with discrete semiconductor thermoelectric converters / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M., Gafurov K.A.// Publ. 08/08/2006. Bull. No. 27. (In Russ)]

4. Patent RU №2535597, МПК: F28D 15/06. Способ интенсификации теплообмена в тепловой трубе / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D.// Opubl. 20.12.2014. Byul. №35 [Patent RU No. 2535597, IPC: F28D 15/06. The method of intensification of heat transfer in a heat pipe / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D.// Publ. 12/20/2014. Bull. No. 35 (In Russ)]

5. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. Vysokoeffektivnyye poluprovodnikovyye termoelektricheskiye ustroystva i pribory. – Makhachkala: IPTS FGBOU VPO «DGTU», 2014. –112 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. Highly efficient semiconductor thermoelectric devices and devices. - Makhachkala: CPI FSBEI HPE DGTU, 2014. 112 p. (In Russ)]

6. Patent RU №2156424. МПК: F28D7/10, F28D21/00. Термоэлектрический полупроводниковый теплообменник / Ismailov T.A, Magomedov K.A, Gadzhieva S.M, Muradova M.M.// Opubl. 20.09.2000. [Patent RU No. 2156424. IPC: F28D7 / 10, F28D21 / 00. Thermoelectric semiconductor heat exchanger / Ismailov T.A., Magomedov K.A., Gadzhieva S.M., Muradova M.M.// Publ. 09/20/2000. (In Russ)]

7. Patent RU №2575650. МПК: G02F 1/04, B01D 1/22, B01D 5/00/ Способ опреснения морской воды при помощи тонкопленочного полупроводникового термоэлектрического теплового насоса цилиндрической формы / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gafurova Z.M., Chelushkin D.A., Chelushkina T.A. // Opubl. 20.09.2016. [Patent RU No. 2575650. IPC: G02F 1/04, B01D 1/22, B01D 5/00 / Method of desalination of sea water using a thin-film semiconductor thermoelectric heat pump of cylindrical shape / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gafurova Z.M., Chelushkin D.A., Chelushkina T.A. // Publ. 09/20/2016. (In Russ)]

8. Patent RU №2405230, МПК: H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A.// Opubl. 01.06.2009. Byul. №33. [Patent RU No. 2405230, IPC: H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. 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. Bull. No. 33. (In Russ)]

9. Patent RU №2205279, МПК: F01P3/20. Термоэлектрический автомобильный радиатор / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Zarat A., Gafurov K.A.// Opubl. 27.05.2003. Byul. №27. [Patent RU No. 2205279, IPC: F01P3 / 20. Thermoelectric automobile radiator / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Zarat A., Gafurov K.A.// Publ. 05/27/2003. Bull. No. 27. (In Russ)]

10. Patent RU №2098725, МПК: F25B21/02, H01M10/50. Способ охлаждения объекта каскадной термоэлектрической батареей и устройство для его осуществления / Manukhin V.V., Dubinin N.I., Kolobayev V.A., Kudryavtsev A.V., Volkov V.YU., Markovskiy M.A.// Opubl. 10.12.1997. [Patent RU No. 2098725, IPC: F25B21 / 02, H01M10 / 50. A method of cooling an object with a cascade thermoelectric battery and a device for its implementation / Manukhin V.V., Dubinin N.I., Kolobayev V.A., Kudryavtsev A.V., Volkov V.Yu., Markovskiy M.A. // Publ. . 12/10/1997. (In Russ)]

11. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Gadzhieva S.M. Mnogosloynoye izluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. – 2013. - №1.- S.90-93. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Gadzhieva S.M. Multilayer emitting thermoelectric device // News of higher educational institutions of Russia. Radio Electronics 2013. No. 1. pp.90-93. (In Russ)]

12. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Gadzhieva S.M. Tonkoplenochnyye termoelektricheskiye ustroystva s otvodom tepla v vide izlucheniya dlya okhlazhdeniya mikrosistemnoy tekhniki // Nauchnoye priborostroyeniye. - 2013. – T.23. - №3. - S.120-124. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Gadzhieva S.M. Thin-film thermoelectric devices with heat dissipation in the form of radiation for cooling microsystem technology // Scientific instrument making. - 2013. Vol.23. No. 3. pp. 120-124. (In Russ)]

13. Patent RU №2507613. МПК: G12B 15/06, H01L 23/34, H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezh-

vedilov T.D., Chelushkina T.A. // Opubl. 20.02.2014. Byul. №5. [Patent RU No. 2507613. IPC: G12B 15/06, H01L 23/34, H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // Publ. 02/20/2014. Bull. No. 5. (In Russ)]

14. Ismailov T.A. Gadzhiev KH.M. Mikroelektronnyye komponenty s integral'nyim ispol'zovaniyem effekta Pel't'ye i opticheskogo izlucheniya. – Makhachkala: IPTS FGBOU VO «DGTU» [Ismailov T.A. Hajiyev H.M. Microelectronic components with integrated use of the Peltier effect and optical radiation. - Makhachkala: CPI FSBEI HE "DSTU" 112 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

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

Гаджиев Даниял Солтанович, аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: danik.g.s@mail.ru

Курбанов Ислам Магомедович, аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: m.i.kurbanow@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

Daniyal S. Gadzhiev, Postgraduate, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: danik.g.s@mail.ru

Islam M. Kurbanov, Postgraduate, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: m.i.kurbanow@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.09.2019.

Принята в печать 27.09.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.09.2019.

Accepted for publication 27.09.2019.

Для цитирования: Евдулов О.В., Габитов И.А., Гюльмагомедов К.С., Кобзаренко Д.Н., Семияк А.И. Модель установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4):19-31. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-19-31

For citation: O.V. Evdulov, I.A. Gabitov, K.S. Gyuulmagomedov, D.N. Kobzarenko, A.I. Semiyak. A prototype device for producing fresh water from atmospheric air. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4):19-31. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-19-31

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-19-31

МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ ИЗ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Евдулов О.В.¹, Габитов И.А.¹, Гюльмагомедов К.С.¹, Кобзаренко Д.Н.², Семияк А.И.¹

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

²Институт проблем геотермии,
367000, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 39А, Россия

Резюме. Цель. Целью статьи является разработка конструкции, физическое и математическое моделирование установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха в прибрежных районах. **Метод.** Разработана конструкция, физическая и математическая модель установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха путем конденсации ее на холодной поверхности, точка росы на которой будет создаваться за счет использования естественного холода морской воды с применением для ее циркуляции энергии движущихся волн, а также нагреве при поверхностного к ней воздушного слоя солнечными концентраторами с целью интенсификации процесса конденсации влаги. **Результат.** Получены данные о количестве получаемой пресной воды (ее массы) с единицы площади поверхности конденсации (1 м^2) за 1 час в зависимости от разности температур между поверхностью конденсации и морской воды, влиянии характеристик солнечного концентратора и жидкостного теплоотвода с морской водой на параметры установки. **Вывод.** Установлено, что значение полученной пресной воды из атмосферного воздуха сильно зависит от разности температур над поверхностью конденсации и морской воды. Так, согласно расчетам при увеличении последней на 45 К, масса пресной воды получаемой с 1 м^2 поверхности конденсации за 1 час увеличивается примерно вдвое и составляет примерно 5,8 кг.

Ключевые слова: пресная вода, атмосферный воздух, морская вода, прибрежные районы, солнечные концентраторы, физическая и математическая модель, численный эксперимент

A PROTOTYPE DEVICE FOR PRODUCING FRESH WATER FROM ATMOSPHERIC AIR

O.V. Evdulov¹, I.A. Gabitov¹, K.S. Gyulmagomedov¹, D.N. Kobzarenko², A.I. Semilyak¹

¹Daghestan State Technical University,

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

²Institute of Geothermal Problems,

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

Abstract. Objectives. The aim of the article is to develop the design and carry out the physical and mathematical modelling of a device for producing fresh water from atmospheric air in coastal areas, as well as under the conditions of sea transport. A **Method** for constructing the device for producing fresh water from atmospheric air is developed on the basis of a physical and mathematical model. Fresh water is obtained by condensation on a cold surface, which dew point is created using the natural cold of seawater with the application of the energy of moving waves for its circulation. The heating of the surface air layer adjacent to the cold surface by solar concentrators intensifies the process of the moisture condensation. **Results.** Data is obtained on the quantity (mass) of fresh water produced per unit of condensation surface area (1 m^2) for 1 hour depending on the temperature difference between the condensation surface and seawater. The influence of the characteristics of solar concentrator and liquid heat remover with seawater on the device parameters is studied. **Conclusion.** It is established that the amount of the fresh water obtained from atmospheric air strongly depends on the temperature difference between the condensation surface and seawater. Thus, according to calculations, with an increase of the latter by 45 K, the mass of fresh water obtained from a condensation surface of 1 m^2 in 1 hour approximately doubles to 5.8 kg.

Keywords: fresh water, atmospheric air, seawater, coastal areas, solar concentrators, physical and mathematical model, numerical experiment

Введение. В настоящее время нехватка воды становится одним из ключевых факторов, сдерживающих развитие цивилизации во многих регионах Земли. Суточный расход воды на личные нужды жителя современного города составляет примерно 100-350 л [1, 2]. В то же время во многих регионах Земли эта цифра снижается до 20-70 л, в результате чего почти 1 млрд. человек на земле не обеспечен питьевой водой. Основными источниками пресной воды на Земле сейчас считаются воды рек, озер, артезианских скважин и опресненная морская вода. Запасы пресной воды в них составляют около 1,2 тысячи км³. Для сравнения количество воды, находящейся в каждый данный момент в атмосфере, равно 14 тыс. км³. Ежегодно с поверхности суши и океана испаряется 577 тысяч км³, столько же затем выпадает в виде осадков. Из сравнения общего количества испаряющейся влаги и количества воды в атмосфере следует, что в течение года она обновляется в атмосфере 45 раз [1, 2]. Таким образом, основной источник пресной воды – вода в атмосферном воздухе, оказывается неиспользуемым.

Постановка задачи. В этой связи является целесообразным разработку специальных технических средств для извлечения влаги из атмосферы и использования ее для нужд населения Земли [3]. Представляется перспективным извлечение ее из атмосферного воздуха путем конденсации на холодной поверхности, точка росы на которой будет создаваться за счет использования естественного холода морской воды с применением для ее циркуляции энергии волн, а также нагрева приповерхностного к ней воздушного слоя солнечными концентраторами с целью интенсификации процесса конденсации влаги.

При проведении исследования авторами изучены существующие аналоги. В качестве них выступают установки для получения пресной воды из морской на основе процессов выпаривания или вымораживания, приборы с применением фильтрующих мембран, устройства для выделения пресной воды из влажного воздуха. К ним на сегодняшний день можно отнести такие

аппараты, как Osmo и DESAL (компания GE Osmonics, США), P-5000, Coway ССК-288 (компания Woonjin Coway Ltd., Южная Корея), HF-550 (компания Hydra Filter Ltd., Израиль), VENTURA 150 MPC (компания Spectra Watermakers, США), Sea Recovery Ultra Whisper DX (компания Cathelco, США), Aqua Matic (компания Sea Recovery, Австралия) [4-9]. Каждое из перечисленных устройств имеет существенные недостатки, к числу которых относятся: значительные отложения на поверхностях теплообмена, мембран и т.п.; большие удельные энергетические затраты; наличие большого количества сменных материалов, комплектующих, дополнительного расхода химических реагентов; экологическая опасность в процессе эксплуатации установок; необходимость в высокой квалификации обслуживающего персонала, высокая стоимость.

Предлагаемое техническое решение позволит в большой мере устранить перечисленные недостатки, в частности за счет использования в качестве основы функционирования установки возобновляемых источников энергии в виде солнечного излучения и энергии движущихся волн. Данные процессы либо вообще не требуют источников энергии, либо требуют расхода энергии в минимальном количестве. При этом количество пресной воды, которую можно получить из влажного воздуха будет определяться его температурой и влажностью, температурой поверхности конденсации, что соответствует температуре морской воды, параметрами солнечных концентраторов.

Целью работы является разработка конструкции, физическое и математическое моделирование установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха в прибрежных районах.

Методы исследования. Разработана конструкция установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха, структурная схема которой показана на рис.1.

Прибор состоит из емкости 1 с открытым верхом, погруженной в водоем с морской водой так, чтобы ее стенки выходили за поверхность воды и препятствовали попаданию внутрь емкости 1 брызг от ее волн. Внутри емкости 1 находится сквозной тракт 2 для протекания морской воды, расположенный между двумя противоположными стенками емкости 1 и размещенный так, чтобы один конец тракта находился у поверхности воды, а другой ниже с наклоном, находящемся в пределах 20-45°. Тракт в поперечном сечении имеет форму треугольника, основание 3 которого обращено к дну емкости 1, а вершина 4 к поверхности водоема. Длина основания треугольника меньше ширины емкости 1 в направлении, перпендикулярном размещению тракта 2. Угол между боковыми ребрами 5 треугольника лежит в пределах 90-140°.

Над трактом 2 на специальном держателе 6 на фокусном расстоянии установлен концентратор солнечной энергии 7. В непосредственной близости от находящегося выше конца тракта 2 в морской воде размещен преобразователь энергии волн 8, выполненный, например, в виде «утки Солтера». Преобразователь энергии волн 8 крепится снаружи к боковой поверхности емкости 1 за счет крепежного приспособления 9. На дне емкости 1 находится сосуд для пресной воды 10. Нахождение емкости 1 у поверхности водоема обеспечивается поплавками. Емкость 1 помещается в водоем и фиксируется в требуемом положении посредством фиксаторов. После погружения емкости 1 в водоем через тракт 2 начнет протекать морская вода за счет его наклона под соответствующим углом под действием гравитационных сил. Морская вода будет охлаждать тракт 2 в общем и в частности его верхнюю поверхность, образуя тем самым зону конденсации влаги. Непрерывное движение морской воды по тракту 2 осуществляется преобразователем энергии волн 6, обеспечивающим ее постоянное нагнетание в тракт 2 со стороны, расположенной у поверхности водоема. Размещенный над трактом 2 с помощью держателя 6 концентратор солнечной энергии 7 будет обеспечивать дополнительный прогрев воздушной среды над верхней поверхностью тракта, что даст возможность интенсифицировать процесс конденсации пресной воды.

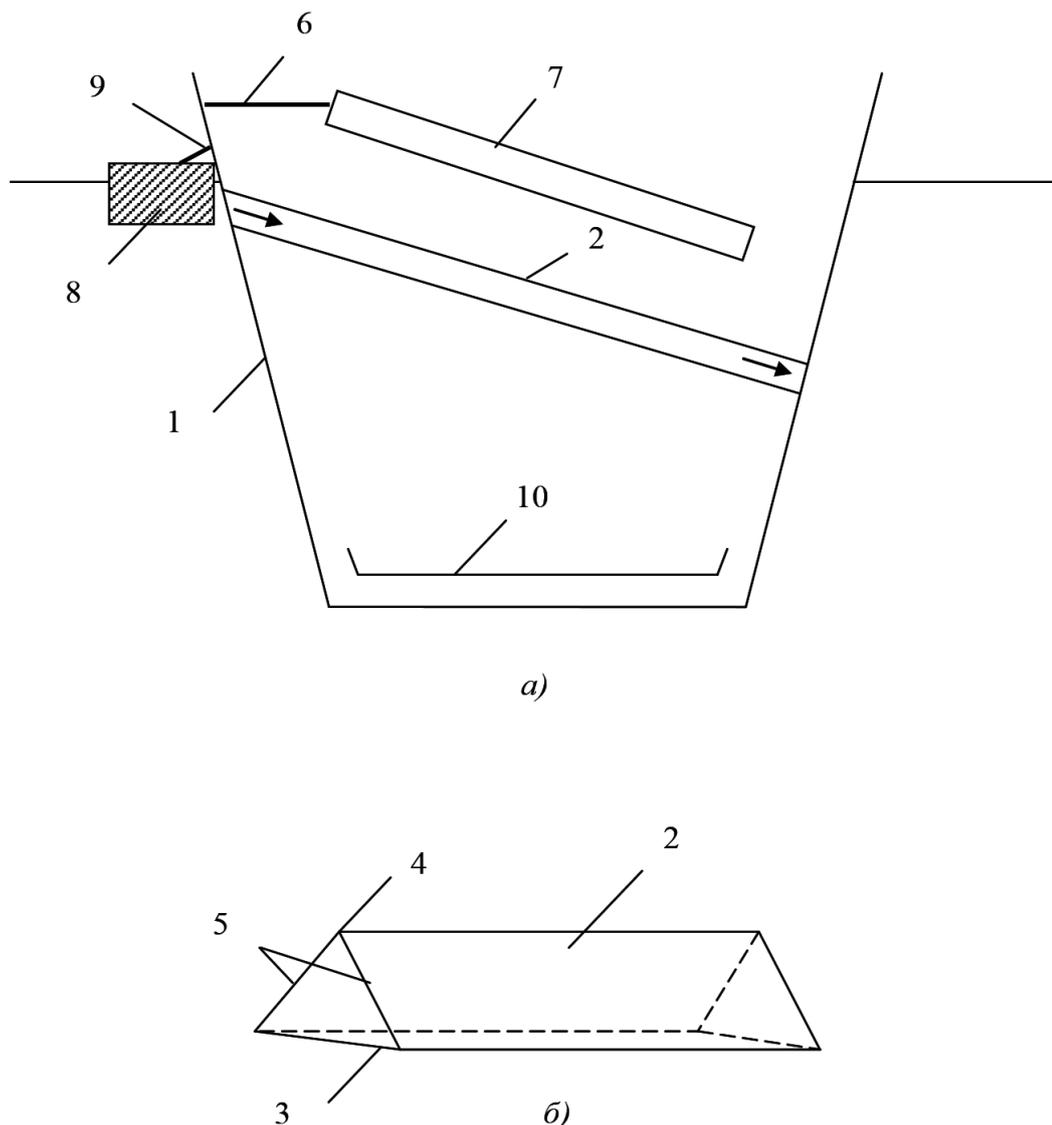


Рис.1. Структурная схема установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха
Fig. 1. Block diagram of the installation for fresh water from atmospheric air

Конденсируемая из воздуха влага будет стекать в сосуд для сбора пресной воды 8 за счет действия гравитационных сил и специального исполнения тракта 2, в сечении имеющего форму треугольника с основанием 3, вершиной 4 и боковыми ребрами 5, имеющими наклон по отношению к горизонтальной оси. Поплавки обеспечивают постоянное нахождение емкости 1 у поверхности водоема. В соответствии с конструктивным описанием установки и принципа ее работы разработана физическая модель прибора, имеющая вид, представленный на рис.2. На нем 1- солнечный концентратор, 2 - поверхность конденсации, 3 - тракт для движения морской воды, 4- морская вода.

Анализ физической модели установки, в частности ее структурных элементов, позволяет сделать вывод о необходимости разбиения ее математической модели на три составные части: расчет теплопритоков на поверхность конденсации за счет солнечной радиации, в частности определение характеристик концентратора солнечной энергии, расчет системы отвода теплоты в тракте - моделирование движения морской воды, непосредственный расчет процесса конденсации [10].

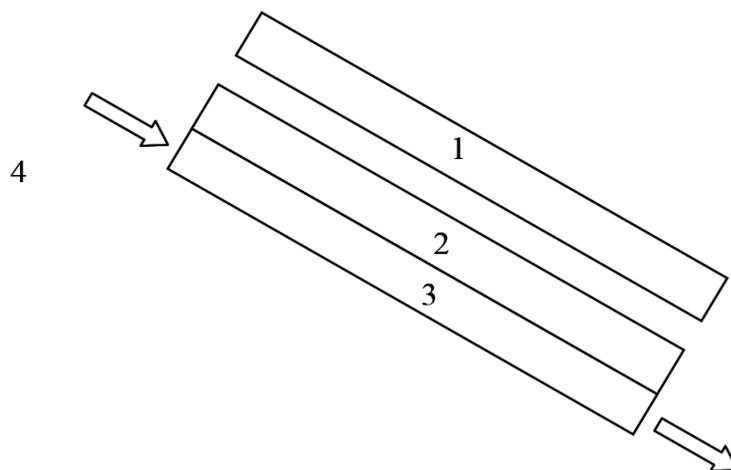


Рис.2. Физическая модель установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха
Fig. 2. Physical model of a plant for producing fresh water from atmospheric air

Первая задача решена достаточно подробно в [11-13], где получены зависимости характеристик параболического солнечного концентратора от интенсивности солнечного излучения, времени суток, внешних условий. Поэтому подробнее рассмотрим последние две задачи.

Расчет жидкостного тракта. Количественная оценка системы жидкостного теплоотвода в виде тракта, по которому протекает морская вода, состоит из расчета контура, в котором циркулирует вода переменной плотности, и теплотехнического расчета коэффициента теплопередачи [14]. Гидродинамический расчет тракта ведется в следующей последовательности [15].

1. Количество циркулирующей в системе воды

$$G = \frac{Q_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad (1)$$

где Q_0 - мощность, выделяющаяся на горячих спаях термобатареи;

ε_1 и ε_2 - энтальпия воды соответственно при наиболее низкой и наиболее высокой температурах в контуре.

2. Задавая скорость циркуляции воды в системе, определяем суммарное проходное сечение подъемных труб контура:

$$f_0 = \frac{G}{3,6 \cdot 10^3 W_0 \gamma}, \quad (2)$$

где G - количество циркулирующей воды;

W_0 - скорость циркуляции;

γ - плотность воды при средней температуре в контуре.

Значение γ может быть определено из соответствующих таблиц. В зависимости от конфигурации тракта определяются их проходные сечения. Естественно, что скорость циркуляции воды в тракте будет такой же.

3. Динамическое сопротивление тракта движущейся по нему воде определяется по формуле

$$\Delta P = \frac{\lambda \ell \bar{W}^2 \gamma}{2gd}, \quad (3)$$

где λ - коэффициент трения вода-металл;

ℓ - длина тракта, м;

\bar{W} - средняя скорость движения воды в трубе;

d - ширина тракта;

g - ускорение силы тяжести.

Величина λ может быть определена из графика, приведенного на рис.3 [16].

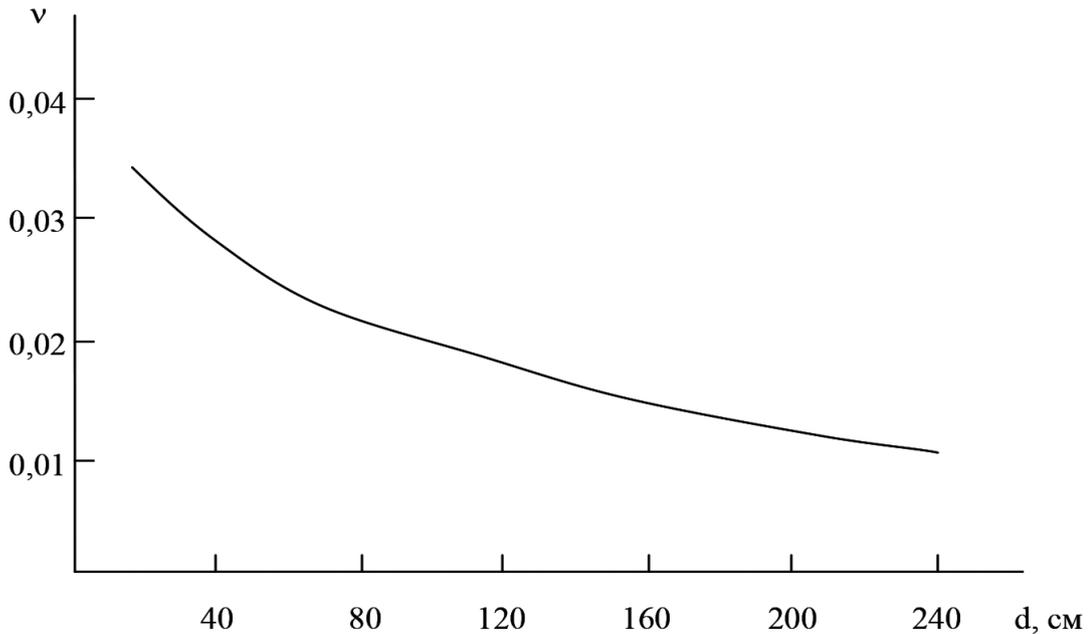


Рис.3. Зависимость коэффициента трения от ширины тракта
Fig. 3. The dependence of the coefficient of friction on the width of the path

Для определения коэффициента отдачи тепла при заданных скоростях циркуляции воды в контуре с достаточной степенью точности могут быть использованы формулы, относящиеся к естественной конвекции жидкости в свободном объеме. Коэффициент теплопередачи от спаев ТЭБ к воде может быть определен по формуле

$$\alpha = \frac{0,135\delta}{\ell} (\text{Pr Gr})^{1/3}, \quad (4)$$

где δ - коэффициент теплопроводности воды;
 ℓ - определяющий размер теплообменной поверхности;
 Pr - критерий Прандля;
 Gr - критерий Грасгофа.

Произведение критерия Прандля на критерий Грасгофа определяется соотношением

$$\text{Pr Gr} = \frac{g \ell^3 \beta \Delta T}{\mu a}. \quad (5)$$

Здесь g - ускорение силы тяжести;
 μ - коэффициент кинематической вязкости воды;
 a - коэффициент температуропроводности воды;
 β - коэффициент объемного расширения воды;
 ΔT - разность температур ребро-вода.

С достаточной степенью точности среднее значение величины коэффициента теплопередачи для заданной поверхности теплообмена может быть определено по формуле

$$\alpha = 2,28 \cdot 10^5 f_0 W_0 \gamma \lg \frac{T - T_1}{T - T_2}, \quad (6)$$

где f_0 - сечение трубопроводов;
 W_0 - скорость циркуляции воды;
 γ - плотность воды при средней температуре в контуре;
 T - средняя температура поверхности теплообмена;
 T_1 - температура воды, входящей в контур;
 T_2 - температура воды, выходящей из контура.

Расчет процесса конденсации. При конденсации, как и во всех других процессах теплоотдачи, используют уравнение теплоотдачи. Согласно уравнению конвективной теплоотдачи, называемому также законом Ньютона, тепловой поток прямо пропорционален разности температур жидкости и стенки и площади поверхности теплообмена [17]:

$$Q = \alpha(T_H - T_c), \quad (7)$$

или

$$Q = \alpha \Delta T_a F, \quad (8)$$

или

$$q = \alpha T_a, \quad (9)$$

где Q - тепловой поток, Вт;

$q = Q / F$ - поверхностная плотность теплового потока,

α - коэффициент теплообмена,

$\Delta T_a = T_H - T_c$ - температурный напор,

F - площадь поверхности теплообмена,

T_c - температура поверхности теплообмена;

T_H - температура жидкости вдали от стенки (полагаем, что она постоянна вдоль всей поверхности теплообмена и равна температуре насыщения конденсирующейся жидкости при заданном давлении).

Средний коэффициент теплоотдачи от пара к стенке вычисляется по выражению [18]:

$$\alpha = \frac{Q}{F(T_H - T_c)}. \quad (10)$$

Для рассматриваемого случая необходима корректировка вышеприведенной формулы с учетом того, что конденсация влажного воздуха происходит на наклонной поверхности. Тогда для различных случаев течения жидкости вдоль поверхности получим.

Теплоотдача при ламинарном движении пленки:

$$Re = 3.77 \cdot Z^{0.75} \cdot \varepsilon_T \varepsilon_\varphi, \quad (11)$$

где Re - число Рейнольдса,

$Z = h \Delta T A(T_H)$ - приведенная высота,

h - высота поверхности, $A(T_H) = \frac{4}{\rho \mu}$,

g - удельная теплота конденсации,

μ - вязкость пленки конденсата,

$\varepsilon_T = \left[\left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_c} \right)^3 \right]^{\frac{1}{8}}$ - поправка, учитывающая зависимость свойств конденсата от температуры,

ры,

$\varepsilon_\varphi = \sqrt[4]{\cos \varphi}$ - поправка, учитывающая отклонение поверхности от вертикали,

φ - угол отклонения от вертикали,

λ - коэффициент теплопроводности пленки конденсата, индекс c соответствует свойствам конденсата при T_c

$$\alpha = 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta T h}} \cdot \varepsilon_T \varepsilon_\varphi, \quad (12)$$

где ρ - плотность пленки конденсата.

Теплоотдача при ламинарно-волновом движении пленки:

$$Re = 3.8 \cdot Z^{0.78} \cdot \varepsilon_T \varepsilon_\varphi \quad (13)$$

Теплоотдача при смешанном движении пленки

$$Re = \left[253 + 0.069 \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0.025} \cdot Pr^{0.5} \cdot (Z - 2300) \right]^{\frac{4}{3}} \quad (14)$$

где Pr - число Прандтля.

Для расчета средней теплоотдачи при смешанном характере течения конденсатной пленки на вертикальных поверхностях была принята формула Д.А. Лабунцова [19].

По найденному значению Q из выражения [20]

$$Q = mC\Delta T_a \quad (15)$$

может быть найдена масса m сконденсировавшейся пресной воды из атмосферного воздуха, где C ее теплоемкость.

Обсуждение результатов. На основе математической модели произведен численный эксперимент. Численный эксперимент осуществлялся отдельно для каждой расчетной задачи. На основе расчетов получены графики зависимости изменения количества теплоты в единицу времени, поступающей на поверхность конденсации, от интенсивности солнечного излучения, характеристик солнечного концентратора (рис.4-5).

Расчеты проводились при следующих параметрах параболического концентратора: диаметр - 0,35 м; общая площадь - 0,72 м²; эффективная площадь сбора солнечного излучения - 0,48 м²; суммарная площадь отражения - 0,52 м²; фокусное расстояние - 0,6 м; максимальная температура в точке фокуса - 230°C.

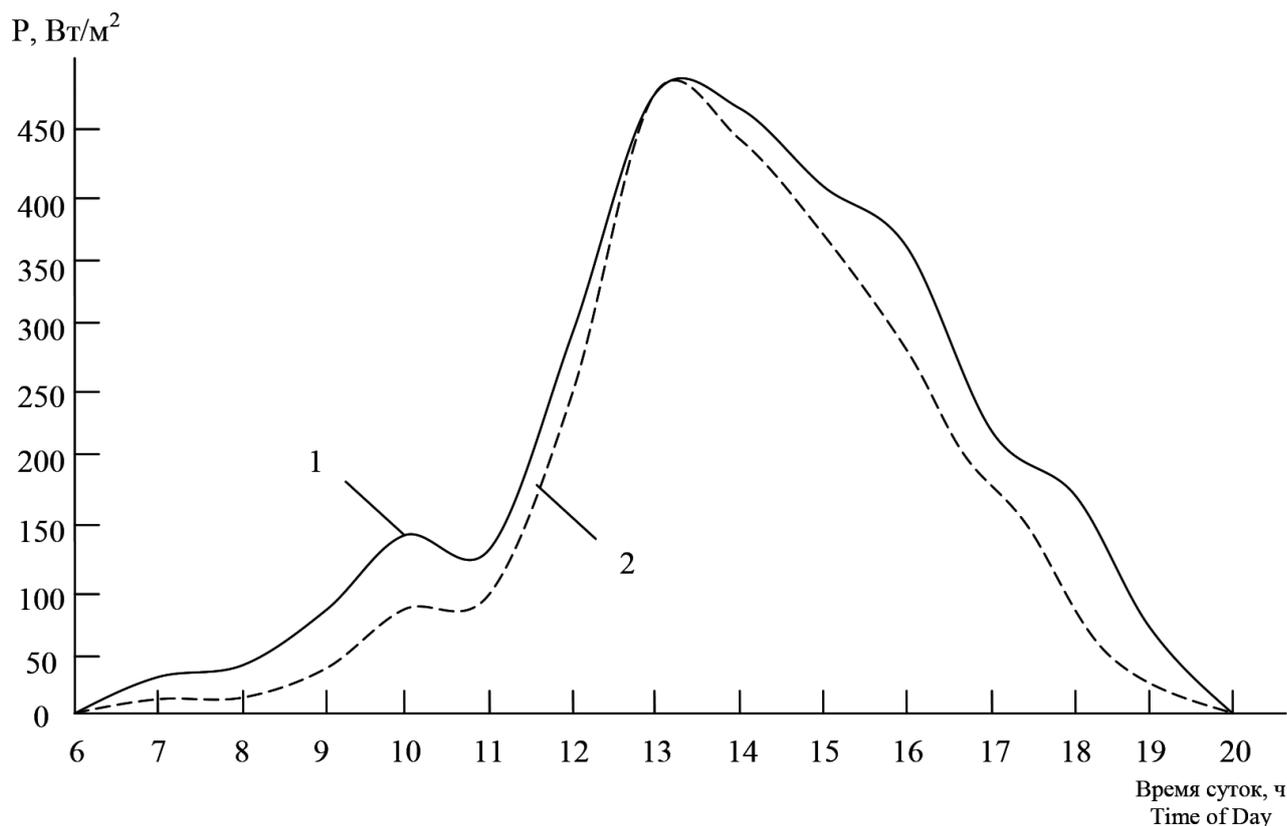


Рис.4. Зависимость тепловой мощности P , поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения на юге (1) и средней полосе (2) России в зависимости от времени суток

Fig. 4. Dependence of the thermal power P absorbed by the heat receiver due to solar radiation in the south (1) and the middle band (2) of Russia depending on the time of day

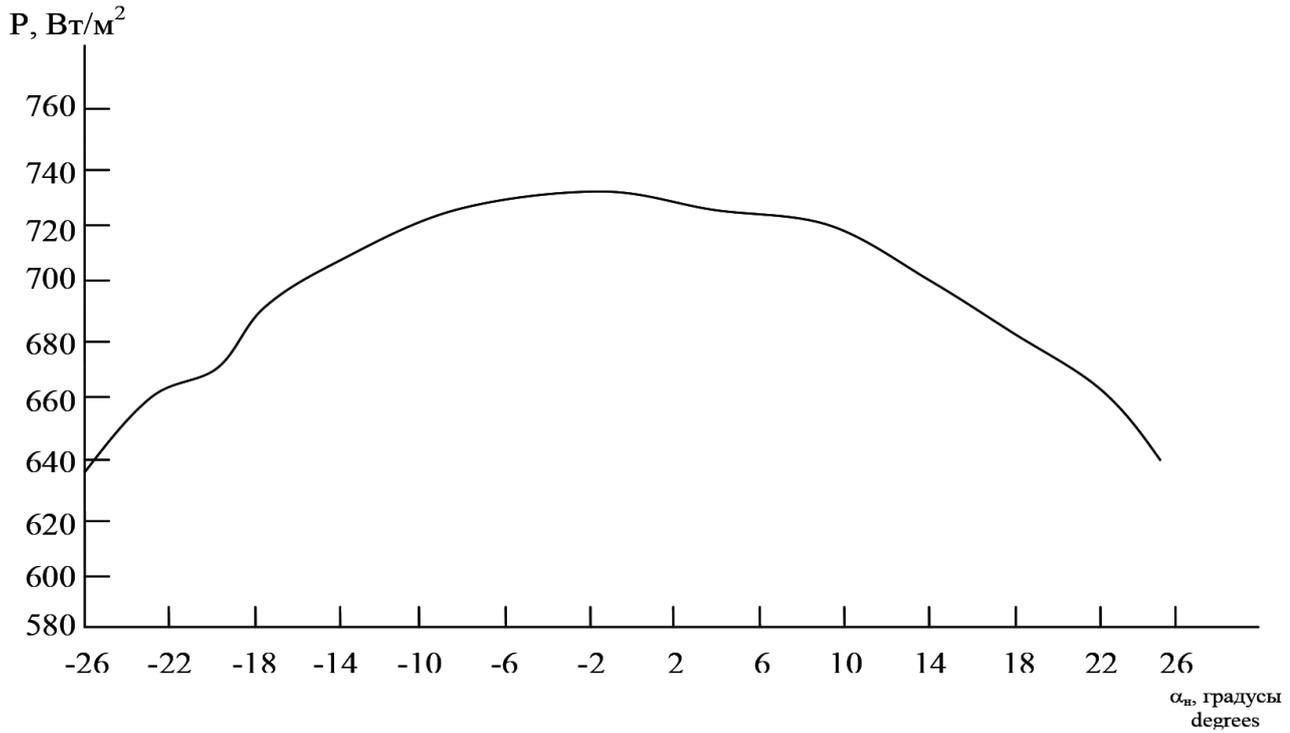


Рис.5. Зависимость тепловой мощности, поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения на юге России днем от угла между нормалью к плоскости концентратора и линией падения лучей
Fig. 5. Dependence of the heat power absorbed by the heat receiver due to solar radiation in the south of Russia during the day from the angle between the normal to the concentrator plane and the line of incidence of the rays

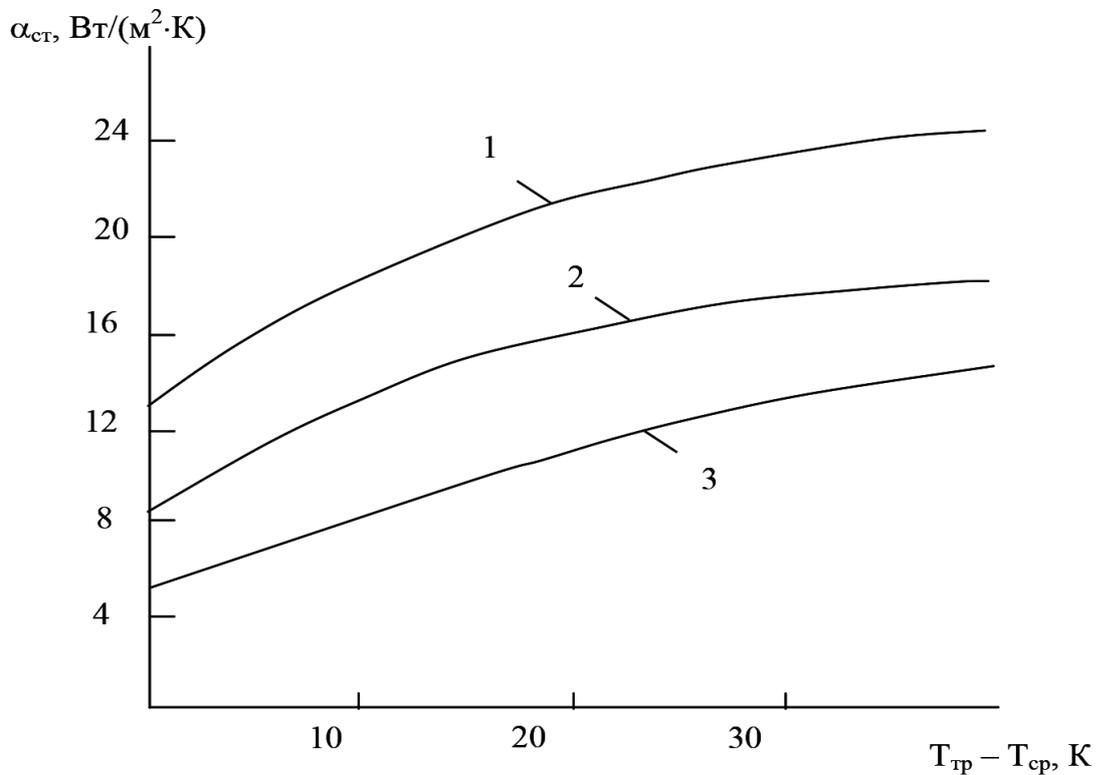


Рис.6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева тракта при различных скоростях движения морской воды 1 - 1.5 м/с; 2 - 1 м/с; 3 - 0.5 м/с
Fig. 6. The dependence of the heat transfer coefficient on overheating of the tract at various speeds of movement of sea water 1 - 1.5 m / s; 2 - 1 m / s; 3 - 0.5 m / s

На рис.4 показана зависимость тепловой мощности P , поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения, приведенной к 1 м^2 на юге (1) и средней полосе (2) Российской Федерации в зависимости от времени суток [4].

Как показывают представленные зависимости значительное расхождение в мощности, поглощаемой горячими спаями ТЭБ за счет солнечного излучения, наблюдается утром (до 11 ч.), затем примерно до 14 ч. 30 мин. Данные значения отличаются незначительно (не более 20 Вт/м^2), и после 15 ч. различие резко растет. В местах наибольшего расхождения данных величина разности в тепловом потоке достигает $80\text{-}100 \text{ Вт/м}^2$. Утром (6 ч.) и вечером (21 ч.) величина тепловой мощности, поглощаемой горячими спаями ТЭБ за счет солнечного излучения близка к нулю.

На рис.5 изображено изменение тепловой мощности P , поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения, приведенной к 1 м^2 на юге России днем от характеристики концентратора солнечной энергии, выраженной в угле между нормалью к плоскости концентратора и линией падения лучей α_n . Согласно представленным данным с уменьшением значения данного угла мощность поглощаемая горячим спаем термоэлектрической структуры растет. При этом максимуму поглощения теплоты, что очевидно, приходится на угол, равный нулю и составляет порядка 720 Вт/м^2 . Изменению угла между нормалью к плоскости концентратора и линией падения лучей изменяет поглощаемую тепловую мощность примерно на 70 Вт/м^2 .

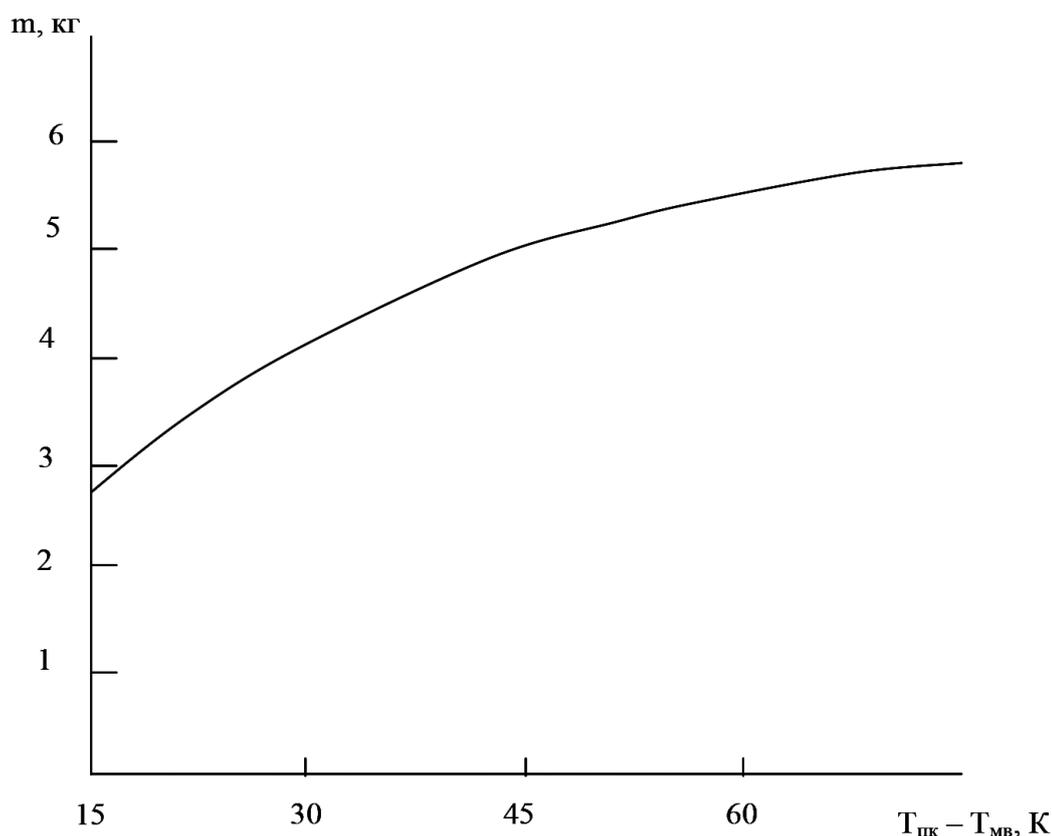


Рис.7. Зависимость массы получаемой пресной воды с единицы площади поверхности конденсации (1 м^2) за 1 час в зависимости от разности температур между поверхностью конденсации и морской воды
Fig. 7. Dependence of the mass of fresh water received per unit condensation surface area (1 м^2) per 1 hour depending on the temperature difference between the condensation surface and sea water

В соответствии с рассмотренной методикой расчета жидкостного теплоотвода, используемого для поверхности конденсации, получены графики зависимости изменения ее коэффициента теплоотдачи от перегрева тракта с морской водой (рис.6). Предполагалось что материал тракта – алюминий, его длина и ширина соответственно 500 мм и 100 мм.

Согласно графику, характеризующему жидкостной теплоотвод по тракту, следует, что для обеспечения интенсивного отвода теплоты от зоны конденсации вполне достаточно применение жидкостного теплоотвода. При этом очевидно, что повышение скорости протекания воды является более выгодным с точки зрения уровня отвода теплоты. Так, при скорости течения морской воды 1,5 м/с при перегреве тракта 30 К значение коэффициента теплоотдачи составляет $24 \alpha_{ст}$, Вт/(м²·К), что соответствует 90 Вт отводимой мощности.

Получены данные о количестве получаемой пресной воды (ее массы) с единицы площади поверхности конденсации (1 м²) за 1 час в зависимости от разности температур над поверхностью конденсации (непосредственно над ней) и морской воды, представленные на рис.7. Согласно ему значение полученной пресной воды из атмосферного воздуха сильно зависит от разности температур над поверхностью конденсации и морской воды. Так, согласно расчетам при увеличении последней на 45 К, масса пресной воды получаемой с 1 м² поверхности конденсации за 1 час увеличивается примерно вдвое и составляет примерно 5, 8 кг. Данное обстоятельство подтверждает возможность получения заявляемых в техническом задании характеристик установки.

Вывод. 1. Разработана конструкция и физическая модель установки для получения пресной воды из атмосферного воздуха путем конденсации ее на холодной поверхности, точка росы, на которой будет создаваться за счет использования естественного холода морской воды с применением для ее циркуляции энергии движущихся волн, а также нагрева приповерхностного к ней воздушного слоя солнечными концентраторами с целью интенсификации процесса конденсации влаги.

2. Разработана математическая модель, включающая в себя три составные части: расчет теплопритоков на поверхность конденсации за счет солнечной радиации, в частности определение характеристик концентратора солнечной энергии, расчет системы отвода теплоты в тракте - моделирование движения морской воды, непосредственный расчет процесса конденсации.

3. В результате численного эксперимента получены данные об изменении массы получаемой пресной воды с единицы площади поверхности конденсации (1 м²) за 1 час в зависимости от разности температур между поверхностью конденсации и морской воды, влиянии характеристик солнечного концентратора и жидкостного теплоотвода с морской водой на параметры установки.

4. Установлено, что значение полученной пресной воды из атмосферного воздуха сильно зависит от разности температур над поверхностью конденсации и морской воды. Так, согласно расчетам при увеличении последней на 45 К, масса пресной воды получаемой с 1 м² поверхности конденсации за 1 час увеличивается примерно вдвое и составляет примерно 5,8 кг.

Библиографический список:

1. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. - СПб.: Наука и техника. 2014. С.30-67.
2. Рубан С.С. Нетрадиционные источники энергии. М.: Энергия. 2003. С.10-27.
3. Минин В. А., Дмитриев С.Г. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Bellona. 2007.
4. <https://www.lenntech.com/products/membrane/osmonics/osmonics.htm>.
5. <http://www.coway.com>.
6. <https://www.hydra-filter.com>.
7. <http://www.marinewarehouse.net/spectra.html>.
8. <http://www.cathelco.com>.
9. <http://www.searecovery.com>.
10. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. - Москва: ДМК Пресс. 2011.
11. Евдулов Д.В., Сулин А.Б. Математическая модель выпрямителя переменного напряжения, выполненного на базе термоэлектрического преобразователя энергии // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. №39 (4). С. 21-30.
12. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И. Виссарионова. М.: Издательский дом МЭИ. 2008.

13. Г. Раушенбах Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат. 2002.
14. Шило Г.Н., Гапоненко Н.П., Огренич Е.В. Проектирование радиаторов с оптимальными массогабаритными параметрами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2011. №1-2.
15. Коробков, В. А. Преобразование энергии океана / В. А. Коробков. Л.: Судостроение. 1986.
16. Дульнев Г.Н. Механика жидкости и газа СПб: ИТМО. 2001.
17. Брюханов О.Н., Шевченко С.Н., Теплообмен. М: АСВ. 2005.
18. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. СПб.: НИУ ИТМО. 2012.
19. Елисеев В.Н., Товстоногов В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014.
20. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа. 2001.

References:

1. Germanovich V., Turilin A. Al'ternativnyye istochniki energii i energosberezheniye. - SPb.: Nauka i Tekhnika. - 2014. [Germanovich V., Turilin A. Alternative sources of energy and energy conservation. - SPb.: Science and Technology. 2014. pp.30-67. (In Russ)]
2. Ruban S.S. Netraditsionnyye istochniki energii. - M.: Energiya. - 2003. [Ruban S.S. Unconventional energy sources. M.: Energy. 2003. pp. 10-27. (In Russ)]
3. Minin V. A., Dmitriyev S.G. Perspektivy osvoyeniya netraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov energii na Kol'skom poluostrove. - Murmansk: Bellona. - 2007. [Minin V. A., Dmitriyev S. G. Prospects for the development of alternative and renewable energy sources on the Kola Peninsula. Murmansk: Bellona. 2007. (In Russ)]
4. <https://www.lenntech.com/products/membrane/osmonics/osmonics.htm>. (In Russ)]
5. <http://www.coway.com>. (In Russ)]
6. <https://www.hydra-filter.com>. (In Russ)]
7. <http://www.marinewarehouse.net/spectra.html>. (In Russ)]
8. <http://www.cathelco.com>. (In Russ)]
9. <http://www.searecovery.com>. (In Russ)]
10. Kashkarov A.P. Vetrogeneratory, solnechnyye batarei i drugiye poleznyye konstruksii. - Moskva: DMK Press. - 2011. [Kashkarov A.P. Wind generators, solar panels and other useful designs. - Moscow: DMK Press. - 2011. (In Russ)]
11. Yevdulov D.V., Sulin A.B. Matematicheskaya model' vypryamitelya peremennogo napryazheniya, vpolnennogo na baze termoelektricheskogo preobrazovatelya energii // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. - 2015. - №39 (4). - S. 21-30. [Evdulov D.V., Sulin A.B. A mathematical model of an alternating voltage rectifier based on a thermoelectric energy converter // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science. 2015. No. 39 (4). pp. 21-30. (In Russ)]
12. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. Solnechnaya energetika: Uchebnoye poso-biye dlya vuzov / Pod red. V.I. Vissarionova. – M.: Izdatel'skiy dom MEI. - 2008. [Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. Solar Energy: A Textbook for Universities / Ed. IN AND. Vissarionova. - M.: Publishing house MPEI. 2008. (In Russ)]
13. G. Raushenbakh Spravochnik po proyektirovaniyu solnechnykh batarey. M.: Energoatomizdat. - 2002. [G. Rauschenbach Handbook on the design of solar panels. M.: Energoatomizdat. - 2002. (In Russ)]
14. Shilo G.N., Gaponenko N.P., Ogrnich Ye.V. Proyektirovaniye radiatorov s optimal'nymi massogabaritnymi parametrami // tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. - 2011. - №1-2. [Shilo G.N., Gaponenko N.P., Ogrnich E.V. Design of radiators with optimal weight and size parameters // technology and design in electronic equipment. 2011. No. 1-2. (In Russ)]
15. Korobkov, V. A. Preobrazovaniye energii okeana / V. A. Korobkov. - L.: Sudostroyeniye. - 1986. [Korobkov, V. A. Transformation of ocean energy / V. A. Korobkov. - L.: Shipbuilding. - 1986. (In Russ)]
16. Dul'nev G.N. Mekhanika zhidkosti i gaza SPb: ITMO. - 2001 [Dulnev G.N. Fluid and gas mechanics SPb: ITMO. 2001. (In Russ)]
17. Bryukhanov O.N., Shevchenko S.N., Teplomassoobmen. - M: ASV. - 2005. [Bryukhanov ON, Shevchenko SN, Heat and mass transfer. M: DIA. 2005. (In Russ)]
18. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. - SPb.: NIU ITMO. - 2012. [Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. SPb.: NIU ITMO. 2012. (In Russ)]
19. Yeliseyev V.N., Tovstonogov V.A. Teploobmen i teplovyye ispytaniya materialov i konstruksiy aerokosmicheskoy tekhniki pri radiatsionnom nageve. - M.: MGTU im. N. E. Baumana. - 2014. [Eliseev V.N., Tovstonogov V.A. Heat transfer and thermal testing of materials and structures of aerospace engineering during radiation heating. - M.: MSTU. N.E. Bauman. - 2014. (In Russ)]
20. Kartashov E.M. Analiticheskiye metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel. - M.: Vysshaya shkola. - 2001. [Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. - M.: Higher school. 2001. (In Russ)]

Сведения об авторах.

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

Габитов Ильдар Азатович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: gabitovia@mail.ru.

Гюльмагомедов Казиахмед Самудинович, ассистент кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии; e-mail: kaziakhmed@mail.ru.

Кобзаренко Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией информационных технологий в энергетике; e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Семиляк Александр Иванович, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: asemilyak@mail.ru

Information about the authors:

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

Ildar A. Gabitov, Cand.Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: gabitovia@mail.ru.

Kaziakhmed S. Gyulmagomedov, Assistant, Department of Electric Power and Renewable Energy Sources e-mail: kaziakhmed@mail.ru.

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

Alexander I. Semilyak, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: asemilyak@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.09.2019.

Принята в печать 06.10.2019.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.09.2019.

Accepted for publication 06.10.2019.

Для цитирования: Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В., Каримов М.Ш., Руденко А.М. Повышение эффективности работы гелиоэнергетических холодильных установок адсорбционного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(4): 32-41. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41
For citation: M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, A.M. Rudenko. Increasing the working efficiency of solar power absorption refrigerator units. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 32-41. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК. 621.576:614.8.084

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-32-41

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК АДСОРБЦИОННОГО ТИПА

Руденко М.Ф.¹, Шипулина Ю.В.¹, Каримов М.Ш.², Руденко А.М.¹

¹Астраханский государственный технический университет,
¹414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия,

²Атырауский государственный университет им. Х.Досмухамедова,
²060011, г. Атырау, пр. Студенческий, 212, Казахстан

Резюме. Цель. Разработать холодильную установку адсорбционного типа циклического действия, реализующую технологию получения холода из энергии солнечной радиации. Отличительной особенностью ее является сильно развитая гелиоприемная часть, состоящая из двух параллельно соединенных генераторов-адсорберов, реакторы которых устанавливаются в индивидуальных теплоизолированных корпусах типа «горячий ящик». **Метод.** Геометрические характеристики генератора-адсорбера основаны на расчетах оптической и теплоэнергетической эффективности моделей аппарата. **Результат.** Проведены исследования физико-химических характеристик активных углей (АС) различного производства. Определена адсорбционная способность рабочих пар: АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин. Получены расчетные коэффициенты для структурных уравнений Дубинина-Радушкевича. Испытана экспериментальная гелиоэнергетическая холодильная установка на рабочей паре АС-аммиак на открытом полигоне. Доказана работоспособность модернизированной установки. По разработанному программному алгоритму на основе упрощенного термодинамического цикла определены зависимости эксергетических коэффициентов. Определены области возможного применения и использования гелиоэнергетических холодильных установок на исследуемых рабочих парах. **Вывод.** Повышенная эффективность установки заключается в оптимальной компоновке всех элементов генератора-адсорбера, включающего реактор, два плоских зеркальных концентратора, тепловую подложку, уменьшенного объема внутреннего воздушного пространства, стеклопакет из двух стекол и рациональной толщины теплоизолирующего рипора.

Ключевые слова: солнечная энергия, адсорбционная холодильная установка, модернизированный генератор-адсорбер, АС-аммиак, АС-метиламин, АС- этиламин, эксергетические коэффициенты

INCREASING THE WORKING EFFICIENCY OF SOLAR POWER ABSORPTION REFRIGERATOR UNITS

M.F. Rudenko¹, Yu.V. Shipulina¹, M.Sh. Karimov², A.M. Rudenko¹

¹Astrakhan State Technical University,

¹16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia,

²Kh. Dosmukhamedov Atyrau State University,

²212 Student Ave., Atyrau 060011, Kazakhstan

Abstract. Objectives. The aim of the study is to develop a cyclic absorption refrigerator unit that implements technology for producing cold from solar radiation energy. Its distinctive feature comprises a highly developed solar receiving unit, consisting of two parallel-connected absorber generators whose reactors are installed in individual heat-insulated "hot box" cabinets. **Method.** The geometric characteristics of the absorber generator are based on the calculations of the optical and heat energy efficiency of the device models. **Results.** The physicochemical characteristics of activated carbons (AC) of various production are studied. The absorption capacity of the following working pairs is determined: AC-ammonia, AC-methylamine, AC-ethylamine. The calculated coefficients for the Dubinin-Radushkevich structural equations are obtained. An experimental solar energy refrigerator unit is tested using a working pair of AC-ammonia in an open test area. The operability of the upgraded device is proven. Exergetic coefficient dependencies are determined according to the developed software algorithm based on a simplified thermodynamic cycle. The areas of possible application and use of solar power refrigerator units with the studied working pairs are determined. **Conclusion.** The increased unit efficiency consists in the optimal layout of all elements of the absorber generator, including the reactor, two flat mirror concentrators, a thermal substrate, a reduced internal air space volume, a double-glazed window made of two sheets of glass and a calculated thickness of heat-insulating Ripor foamed polyurethane.

Keywords: solar power, absorption refrigerator unit, modernised generator-absorber, AC-ammonia, AC-methylamine, AC-ethylamine, exergetic coefficients

Введение. В гелиоэнергетических холодильных установках адсорбционного типа реализуется новая важная технологическая задача: преобразование энергии солнечной радиации в энергию теплоты и холода, что является эффективным способом экономии традиционного энергетического сырья (угля, нефти, газа, урана) и обеспечения чистоты окружающей среды [1].

В основе физического процесса адсорбции лежит способность сгущаться парообразным молекулам хладагента над твердой поверхностью сорбента и затем конденсироваться в пористую структуру с понижением температуры последнего при отводе теплоты. Этот процесс обратим, и при подводе к сорбенту тепловой энергии в нем происходит десорбция - выделение хладагента [2].

Постановка задачи. В установках адсорбционного типа циклического действия применяют простые сорбенты (активные угли, силикагель, цеолит) и озонобезопасные хладагенты (аммиак, вода, метанол, этанол). Такие установки можно использовать для охлаждения и хранения медикаментов, замораживания пищевых продуктов, получения льда, кондиционирования воздуха и подогрева воды теплом адсорбции [3-5].

В связи с этим изучалась возможность повышения эффективности работы гелиоэнергетической холодильной установки адсорбционного типа за счет: совершенствования конструкций основных аппаратов, входящих в общую компоновку и поиска новых хладагентов, эффективных для работы таких установок.

Объектом исследования являлась экспериментальная гелиоэнергетическая холодильная установка, представленная на рис.1. Особенностью установки является сильно развитая гелиоприемная часть, представляющая два соединенных параллельно аппарата – генератора-адсорбера, реакторы которых расположены в отдельных изолированных корпусах типа «горячий ящик».

Генератор-адсорбер совмещенного действия, попеременно выполняет обратимые действия (днем работает как генератор, ночью – как адсорбер). Реакторы расположены параллельно уровню земли, но на некоторой высоте друг от друга. Гелиоприемная часть обращена строго на юг, под оптимальным углом наклона к горизонту, что составлял 45° для Астраханской области в период вероятной эксплуатации таких установок в данной местности. В установку входят и другие аппараты, позволяющие осуществлять периодически полный цикл работы установки: водяной конденсатор, ресивер, холодильная камера с испарителем и регулирующая арматура.

Методы исследования. Принцип работы установки основан на использовании теплоты получаемой от энергии солнечной радиации днем и суточном изменении температуры окружающей среды, позволяющим создавать в аппаратах установки необходимые для работы давления. Цикл работы установки состоит из двух процессов: регенерация, когда днем насыщенный сорбент в реакторах генератора-адсорбера нагревается и идет процесс десорбции с выделением из сорбента паров хладагента, который сжижается в конденсаторе и накапливается в ресивере; зарядка, когда ночью в реакторах генератора-адсорбера идет процесс адсорбции с поглощением хладагента сорбентом, при этом в испарителе кипит хладагент производя эффект охлаждения в изолированной камере. Вечером, охлажденный до температуры окружающей среды хладагент из ресивера при помощи регулирующего вентиля подается в испаритель.

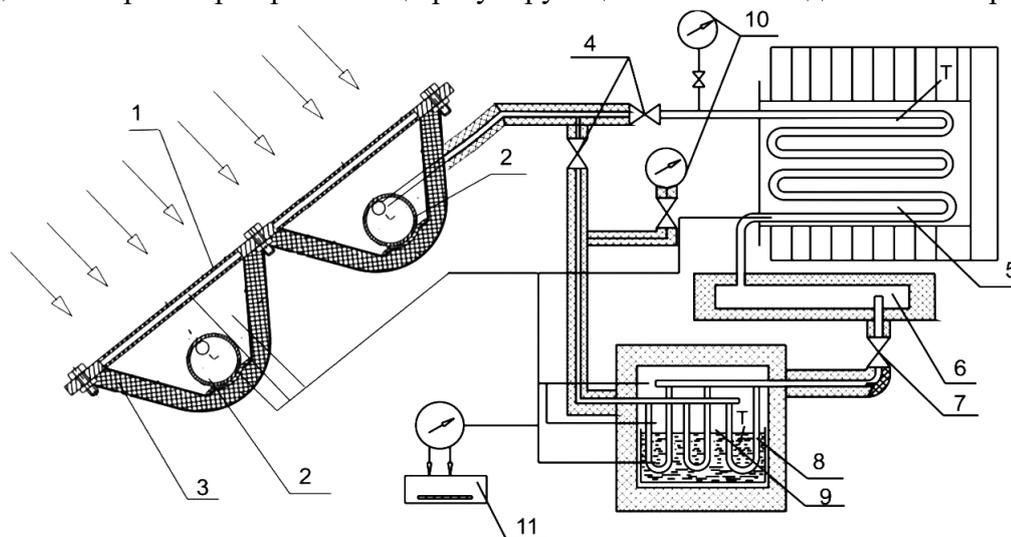


Рис.1 Гелиоэнергетическая холодильная установка:
генератор-адсорбер, 2- реактор, 3- гелиоприемное устройство «горячий ящик», 4 – венти-
ли, 5- конденсатор, 6- ресивер, 7- вентиль подачи хладагента, 8- испаритель, 9- холодильная каме-
ра, 10 – манометры, 11- цифровой микроамперметр В7-40

Fig. 1 Solar energy refrigeration unit:
adsorber generator, 2- reactor, 3 “hot box” solar receiving device, 4 - valves, 5- condenser, 6- receiver, 7-
refrigerant supply valve, 8- evaporator, 9-chamber, 10 - pressure gauges, 11- digital microammeter В7-40

Разделение двух аппаратов генераторов-адсорберов одного назначения и установление их в разных теплоизолирующих каркасах типа «горячий ящик» позволяют сократить объем воздушного пространства внутри аппарата, в котором возможно формирование нежелательных конвективных потоков, а двойное остекление прозрачной стенки, за счет установления вакуумного стеклопакета, значительно уменьшило потери теплоты через него днем; в торцах гелиоприемника, предусмотрены открывающиеся пробки, которые ночью извлекаются из теплоизо-

лирующего каркаса, для лучшего охлаждения реакторов, дном пробки снова устанавливаются на место.

Интенсивность обогрева реактора осуществляется дном за счет централизованного фокусирования энергии солнечной радиации плоскими зеркальными концентраторами и металлической подложки на круглую цилиндрическую поверхность реактора.

Реактор цилиндрической конструкции представляет цельнотянутую трубу диаметром $\varnothing 76 \times 4$ мм, внутри которой в верхней части установлен перфорированный оребренный хладопровод в форме цилиндра диаметром $\varnothing 24 \times 2$ мм. Реактор аппарата через запорные вентили подключается в зависимости от режима работы либо к конденсатору, либо к испарителю. В качестве запорных вентилей при автоматическом регулировании могут устанавливаться обратные клапаны.

Для улучшения контакта между подложкой и поверхностью соприкосновения реактора в генераторе-адсорбере зазор обрабатывается теплопроводящей пастой КПП-8. Для исключения теплового контакта хладопровода выходящего из реактора устанавливается текстолитовая втулка.

Зазор между стеклопакетом на пластмассовой основе и металлическим корпусом гелиоприемника уплотняется мягкой резиновой прокладкой. Теплоизоляция основного корпуса гелиоприемного устройства с внутренней части обработана напылением рипора. Остекленная площадь поверхности каждого гелиоприёмного устройства $0,64 \text{ м}^2$. Наружная солнцезащитная часть поверхности реактора обработана селективным покрытием, выполненное по патенту [6].

Основные геометрические параметры конструкции генератора-адсорбера выполнены на основании исследований оптических и теплоэнергетических модельных конструкций (рис. 2).

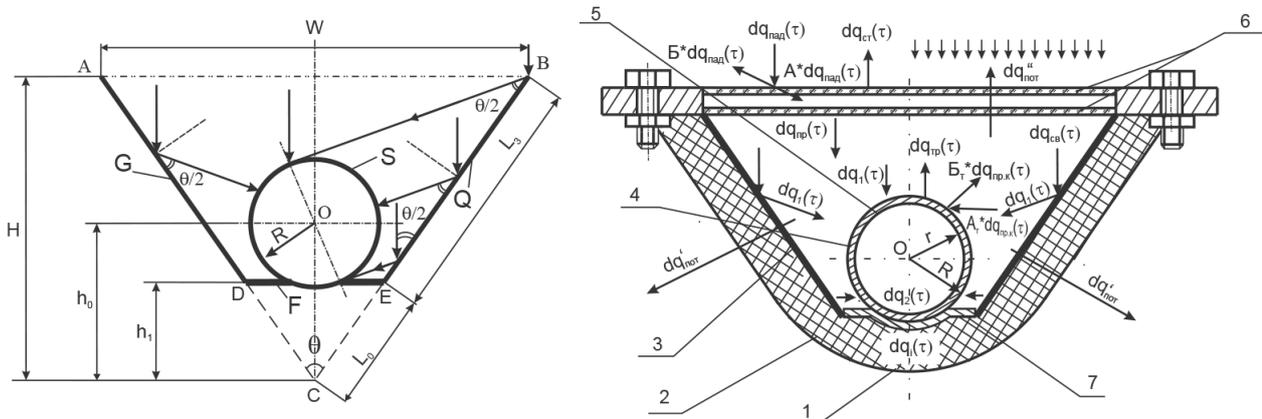


Рис.2 Модели оптической (а) и теплоэнергетической (б) эффективности генератора-адсорбера (1-наружный корпус гелиоприемника типа «горячий ящик», 2- изоляция корпуса, 3 – плоские зеркальные отражатели, 4 – корпус реактора, 5 – адсорбент (активированный уголь), 6 – стеклопакет, 7 – металлическая подложка.

Fig. 2 Models of the optical (a) and heat energy (b) efficiency of the adsorber generator (1-external housing of the "hot box" type solar receiver, 2 - housing insulation, 3 - flat mirror reflectors, 4 - reactor vessel, 5 - adsorbent (activated coal), 6 - a double-glazed window, 7 - a metal substrate.

Модель оптической эффективности конструкции генератора-адсорбера представлена таким образом, что солнечный луч, падающий перпендикулярно оси симметрии всей конструкции, полностью отражается от зеркальных поверхностей, и на наружную поверхность реактора, падают прямые и отражаемые лучи.

Ширина раскрытия зеркал W (м), площади поверхности зеркал Q и G (м^2) и площадь поверхности трубки реактора S (м^2) связаны аналитическими зависимостями с радиусом реактора R (м) и углом раскрытия плоских зеркал θ (град). F - площадь металлической подложки (м^2), L_3 – длина зеркала (м), H (м), h_0 (м), h_1 (м) – соответствующие высоты концентратора.

На основании анализа коэффициентов оптической и оптико-энергетической концентрации плоских зеркал [7] наибольшие значения их достигают при соотношениях в диапазоне от $W/2 \cdot R = 3,5$ до $W/\pi \cdot R = 3,5$. Угол раскрытия был выбран $\theta = 55^\circ$.

При конструировании оптической части генератора-адсорбера были заложены следующие аналитические соотношения:

$$\begin{aligned} W/\pi \cdot R = 3,5; \quad H = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [2 \cdot (\operatorname{tg} \theta / 2)]; \quad h_1 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot (\operatorname{tg} \theta / 2)]; \quad (1) \\ L_0 = \pi \cdot 3,5 \cdot R / [8 \cdot (\sin \theta / 2)]; \quad L_3 = 3 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot R / [4 \cdot (\sin \theta / 2)]; \quad h_0 = h_1 + R. \end{aligned}$$

В основе теплоэнергетической модели лежат тепловые энергетические балансы: днем - между падающей энергией солнечной радиации и энергии, отводимой в конденсаторе; ночью - между теплотой, отводимой в испарителе и теплотой адсорбции.

$$dq_{\text{пад}}(\tau) = dq_{\text{дес}}(\tau) + dq_{\text{из}}(\tau) + dq_{\text{пот}}(\tau) = dq_{\text{кон}}(\tau) \quad (2)$$

где $dq_{\text{пад}}(\tau)$ - энергия солнечной радиации, падающая на прозрачную поверхность гелиоприемного устройства за конкретный промежуток времени ($\tau = 1$ ч); $dq_{\text{дес}}(\tau)$ - энергия идущая на осуществления процесса десорбции в реакторе генератора-адсорбера; $dq_{\text{из}}(\tau)$ - энергия идущая на процесс изостерического процесса подогрева адсорбата и адсорбента в реакторе; $dq_{\text{пот}}(\tau)$ - энергия тепловых потерь в гелиоприемном устройстве генератора-адсорбера в дневное время; $dq_{\text{кон}}(\tau)$ - энергия отводимая в конденсаторе.

$$dq_{\text{ад}}(\tau) = dq_0(\tau) + dq'_{\text{из}}(\tau) \quad (3)$$

где $dq_{\text{ад}}(\tau)$ - отводимая энергия из реактора генератора-адсорбера в процессе адсорбции; $dq_0(\tau)$ - энергия подводимая в испарителе охлаждающей камеры в ночное время; $dq'_{\text{из}}(\tau)$ - энергия отводимая от реактора при изостерическом процессе охлаждения адсорбата и адсорбента.

Экспериментально установлено, что время протекания процессов адсорбции больше, чем время протекания процессов десорбции. Методика расчета гелиоэнергетической части аппарата изложена в работе [8].

Количество загруженного адсорбента в реактор составляло 12 кг.

В АГТУ были проведены исследования физико-химических характеристик некоторых типов активных углей российского и казахстанского производства по методике [9]. Исследовались удельная (истинная d и кажущаяся δ) масса, г/см³; суммарный объем пор $V_{\text{сум}}$, см³/г; пористость, %; кислотность $\text{pH} = \lg C_{\text{H}^+}$.

Лучшим из отечественных образцов по комплексу изученных характеристик является активный уголь кубанского производства из косточек фруктов.

Обсуждение результатов. Авторами были получены изотермы адсорбции аммиака, метиламина и этиламина на активных углях различного производства и определены структурные коэффициенты для уравнения Дубинина-Радужкевича (D-R):

$$a(P, T) = \rho(T) \cdot W_0 \cdot \exp\{-D \cdot [T \cdot \ln(P_s/P)]^n\} \quad (4)$$

где $a(P, T)$ - пропорциональная зависимость массы хладагента в сорбенте к массе сухого адсорбата, кг/кг; W_0 - максимальный объем адсорбционного пространства, м³/кг; $\rho(T)$ - плотность жидкого хладагента, кг/м³; T - температура изотермического процесса, К; P_s, P - давление насыщенного и равновесного состояния процесса, Па, D - энергетический коэффициент адсорбции для определенной рабочей пары адсорбент-хладагент; n - показатель распределения размерности пор.

Текущий объем адсорбционного пространства адсорбента (м³/кг),

$$W = a(P, T) / \rho(T). \quad (5)$$

На рис. 3 показаны зависимости изменения адсорбционного пространства активных углей различного производства при адсорбции паров аммиака, метиламина и этиламина в логарифмической анаморфозе. Разброс расчетных значений не превышает 16%.

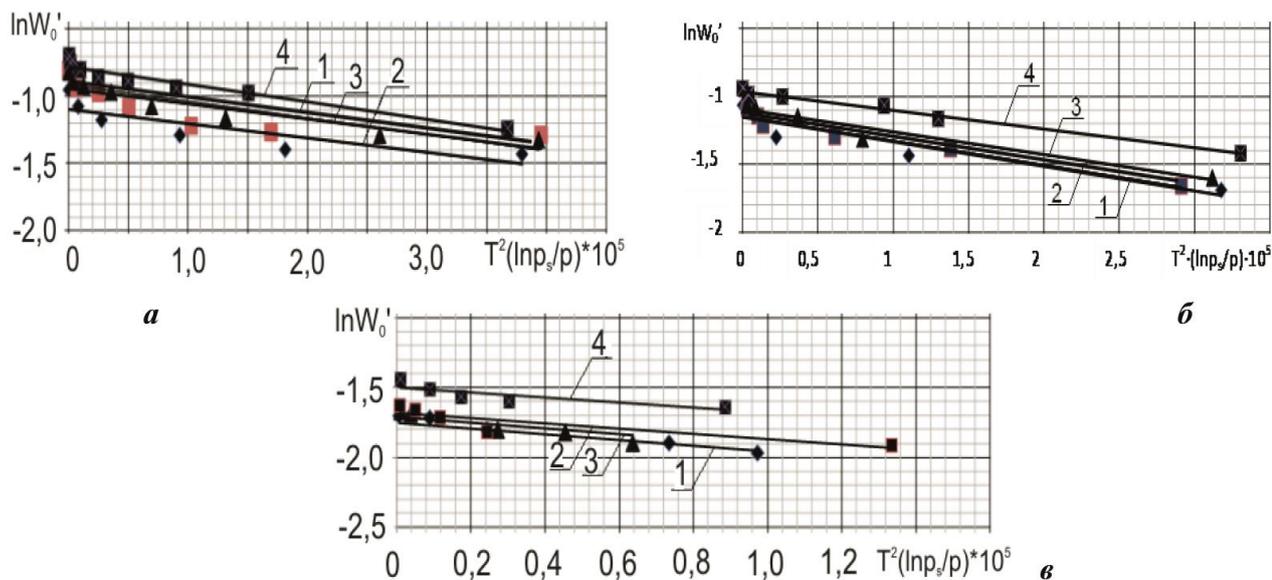


Рис.3 Зависимости изменения величины адсорбционного пространства рабочих пар (а - АС-аммиак, б - АС-метиламин, в - АС-этиламин) для активных углей различных видов (1-алматинский, 2- усть-каменогорский, 3-казанский, 4-краснодарский)

Fig. 3 Dependences of changes in the adsorption space of working pairs (a - AC-ammonia, b - AC-methylamine, c - AC-ethylamine) for active carbons of various types (1-Almaty, 2-Ust-Kamenogorsk, 3-Kazan, 4 Krasnodar)

Усредненные расчетные коэффициенты для уравнения (D-R):

- для рабочей пары АС-аммиак $W_{o(амм)} = 442,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{(амм)} = 12,17 \cdot 10^{-7}$; $n=2$;
- для рабочей пары АС-метиламин $W_{o(мет)} = 355,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{(мет)} = 16,58 \cdot 10^{-7}$; $n=2$;
- для рабочей пары АС-этиламин $W_{o(эtm)} = 201,2 \cdot 10^{-6}$ кг/м³; $D_{(эtm)} = 21,17 \cdot 10^{-7}$; $n=2$.

Проведены экспериментальные исследования суточного цикла работы гелиоэнергетического термотрансформатора на рабочей паре АС-аммиак.

На рис. 4 представлены зависимости измеряемых температур в различных точках гелиоэнергетической холодильной установки в суточном режиме. Утром тепловая энергия солнечной радиации разогревает реакторы в генераторе-адсорбере, прогревается насыщенный сорбент, температура которого растет и затем начинается процесс десорбции. Термопары (1 - 4), установленные в различных точках реактора, показывают неравномерность нагрева сорбента. Максимальная температура и давление достигается днем в момент максимального солнцестояния, но затем, по мере склонения солнца, спадает энергия солнечной радиации и снижается температура нагрева реакторов и давление. К 17.00 начинается процесс изостерического охлаждения. Переключаются запорные вентили. Охлаждается не только адсорбент (АС), но и жидкий хладагент, накапливаемый в ресивере установки. В 19.30 часов через регулирующий вентиль хладагент поступает в испаритель холодильной камеры, в которой находится емкость с водой, служащей аккумулятором холода при превращении воды в лед.

Сначала наблюдается резкое падение давления и быстрое понижение температуры, за счет бурного испарения и поглощения паров хладагента. Затем, по мере насыщения сорбента, медленно растет давление в испарителе и снижается температура кипения хладагента. Охлаждающий эффект производится установкой в течение всего ночного времени до утра. В ночное время за счет теплоты адсорбции нагреваются реакторы генератора-адсорбера. Утром запорные вентили снова переключаются. Охлаждающий эффект днем поддерживается за счет холода создаваемого тающим льдом.

Максимальные дневные температуры на поверхностях реактора генератора достигали 138 – 142 °С, температурная неравномерность нагрева поверхности реактора составляла 6-12 °С, темпы роста температуры днем на реакторе 0,5 – 1 °С/мин.; температура поверхности адсорбера ночью достигала 64,6 – 65,3 °С, суточные колебания давления в установке при

охлаждении водой днем достигало 2,53 МПа., а ночью – 0,14 МПа. После открытия регулирующего вентиля наблюдается падение давления в испарителе и снижение температуры испарителя до -6,4 - -8,2 °С, происходит подмораживание влаги. Температура воздуха в холодильной камере изменяется в пределах +4 - +12 °С за сутки.

Анализ полученных экспериментальных зависимостей температур в суточном режиме работы холодильной установки (май – сентябрь) на открытом полигоне показал аналогичный характер изменения по данным работ [10, 11].

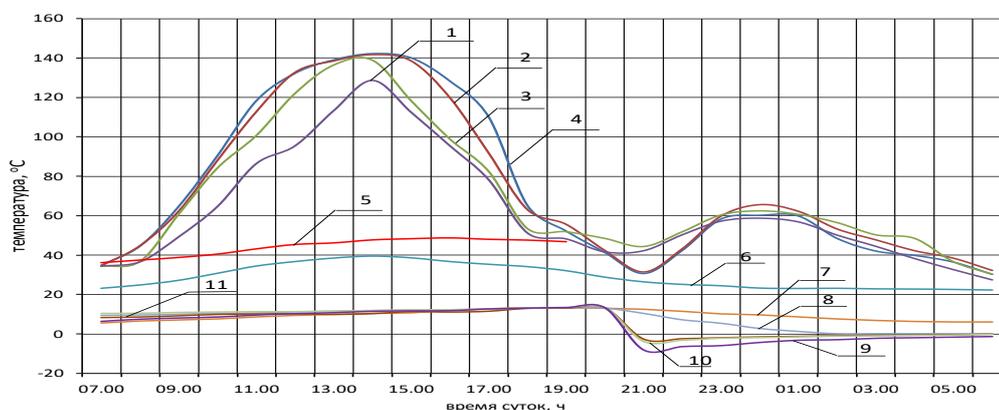


Рис. 4. Зависимости измеряемых температур гелиоэнергетической холодильной установки на различных аппаратах в течение суточного цикла времени: 1-4 – температуры нагрева поверхности реактора генератора-адсорбера в различных точках по поверхности; 5 – температура конденсатора; 6 – температура окружающего воздуха; 7 – температура в охлаждающей камере; 8 – температура охлаждения воды в камере; 9 – 10 – температуры поверхности испарителя.

Fig. 4. The dependences of the measured temperatures of the solar energy refrigeration unit on various devices during the daily cycle of time: 1-4 - the temperature of the surface of the reactor of the generator-adsorber at various points on the surface; 5 - temperature of the condenser; 6 - ambient temperature; 7 - temperature in the cooling chamber; 8 - temperature cooling water in the chamber; 9 - 10 - surface temperature of the evaporator.

Были разработаны программные алгоритмы расчета и проанализированы степени термодинамического совершенства по упрощенному циклу работы гелиоэнергетической холодильной установки на трех рабочих парах (АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин) по математической модели, описанной в работе [12].

Эксергетический коэффициент определялся по уравнению:

$$\eta_{\text{экс}} = (\mathcal{E}_{\text{хол}} / \mathcal{E}_{\text{ген}}), \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_{\text{хол}} = r_0 \cdot \Delta a \cdot [(T_{\text{осд}} - T_0) / T_0]$ – эксергия, отводимая от охлаждающей камеры;

$\mathcal{E}_{\text{ген}} = (Q_{\text{из}} + Q_{\text{дес}}) \cdot [T_{\text{дес}} - T_{\text{осн}} / T_{\text{осн}}]$ – эксергия, подводимая к генератору термотрансформатора, для производства холода; Δa – масса адсорбата (хладагента), циркулирующая в термотрансформаторе; r_0 – скрытая теплота парообразования соответствующего адсорбата; $Q_{\text{из}}$ – теплота изостерического процесса нагрева рабочей пары в реакторе генератора, равная произведению их массы, теплоемкости и соответствующего прироста температуры; $Q_{\text{ген}} = q_d \cdot \Delta a$ – теплота изобарического процесса десорбции; $T_{\text{дес}}$, T_0 , $T_{\text{осд}}$, $T_{\text{осн}}$ – абсолютные температуры соответственно десорбции в реакторе генератора, кипения в испарителе, окружающей среды днем и ночью; $q_d = r_0 + R \cdot T \cdot \ln(P_s/P) + (\alpha \cdot R) \cdot (n \cdot D) \cdot [\ln(P_s/P)]^{-1}$ – удельная теплота десорбции; R – универсальная газовая постоянная; α – коэффициент расширения жидкой фазы адсорбата.

На рис. 5 показаны зависимости эксергетического коэффициента гелиоэнергетической холодильной установки работающей на различных рабочих парах.

Если соединить экстремальные точки на графиках, то можно оценить параметры работы термотрансформатора в диапазонах предполагаемых температур.

Рабочую пару АС-метиламин предпочтительнее использовать для охлаждения и кондиционирования.

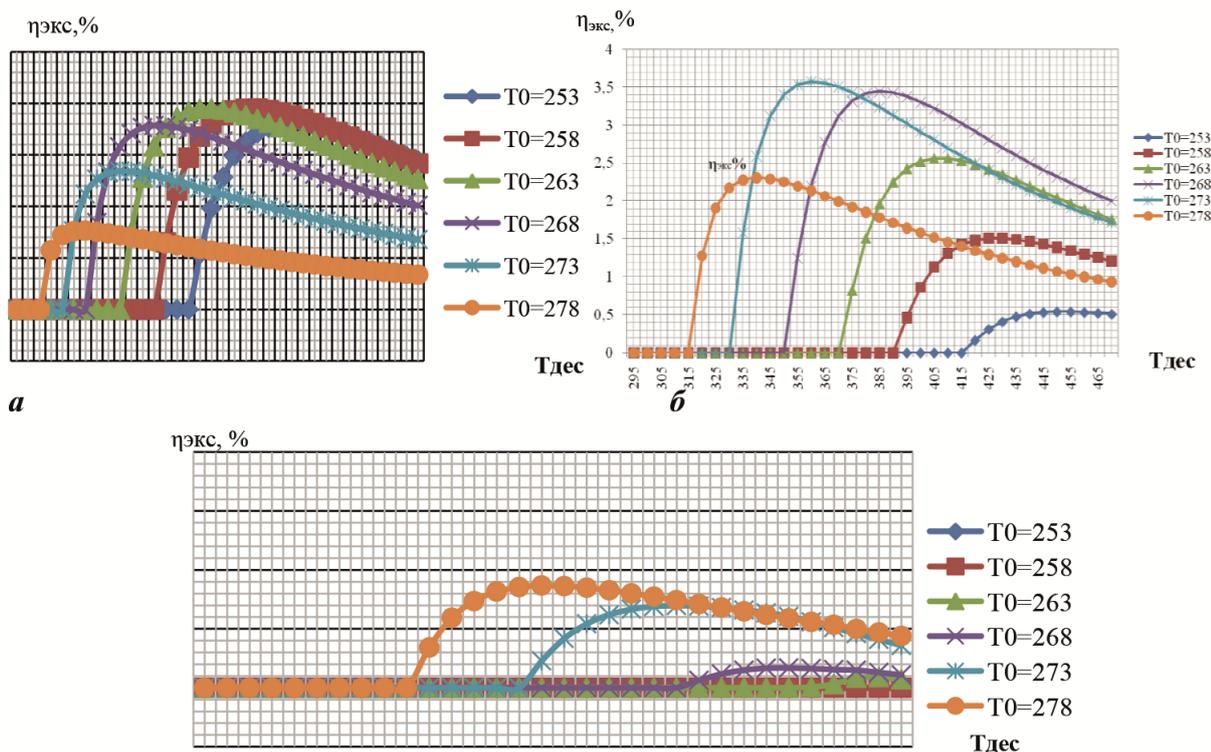


Рис. 5 Зависимости эксергетического коэффициента $\eta_{\text{экс}}$ от температуры десорбции рабочих пар активный уголь-аммиак (а); АС-метиламин (б); АС- этиламин для различных температур кипения хладагента при постоянных температурах $T_{\text{адс}}$, $T_{\text{конд}}$, $T_{\text{ос}}$.
Fig. 5 Dependences of the exergy coefficient η_{ex} on the desorption temperature of active carbon-ammonia working vapor pairs (a); AC-methylamine (b); AC-ethylamine for various refrigerant boiling points at constant temperatures T_{ads} , T_{cond} , T_{os} .

Из графиков на рис. 5 видно, что эксергетические коэффициенты для трех исследуемых рабочих пар при повышении температуры реактора, а, следовательно, и насыщенного хладагентом активного угля сначала остается постоянной до определенной критической температуры – границы между изостерическим процессом нагрева и процессом десорбции. Затем начинается резкое повышение коэффициента до максимальных значений, это связано с лавинообразным процессом выделения парообразного хладагента из прогретых наружных слоев адсорбата, и затем наблюдается снижение значений коэффициента на 10-12% от максимальных значений.

Таким образом, эксергетический коэффициент холодильной установки при изменении температур кипения в испарителе и температуры десорбции в реакторе сохраняет максимальные значения в пределах оптимального диапазона.

Результаты расчетов: средняя холодопроизводительность разработанной установки около $Q_0=102$ Вт. Термодинамические коэффициенты, соответственно на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{(\text{амм})}=0,22$; $\eta_{(\text{мет})}=0,058$; в режимах кондиционирования $\eta_{(\text{амм})}=0,342$; $\eta_{(\text{мет})}=0,254$; $\eta_{(\text{этл})}=0,2$.

Степень термодинамической эффективности, соответственно на рабочих парах АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин в режимах низкотемпературного охлаждения $\eta_{\text{экс(амм)}}=0,075$; $\eta_{\text{экс(мет)}}=0,015$; в режимах кондиционирования $\eta_{\text{экс(амм)}}=0,03$; $\eta_{\text{экс(мет)}}=0,023$; $\eta_{\text{экс(этл)}}=0,0092$. Рабочее давление в холодильной установке на рабочей паре АС-этиламин меньше, чем на рабочей паре АС-метиламин в 2,4-2,2 раза, а на рабочей паре АС-метиламин меньше, чем на рабочей паре АС-аммиак в 3,3 – 2,6 раза. Такие перспективные показатели приводят к снижению весовых характеристик холодильного оборудования.

Вывод. На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Новые конструктивные схемные решения и усовершенствованная конструкция генератора-адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки позволили получить высокие энергетические показатели работы установки и добиться положительного эффекта ее работы.
2. Исследование адсорбционной способности рабочих пар АС-аммиак, АС-метиламин, АС-этиламин показали, что лучшими адсорбционными свойствами обладает АС-аммиак, а худшими – АС-этиламин, однако все они могут применяться в холодильных установках адсорбционного типа, причем при выборе хладагента следует и учитывать массовые характеристики проектируемых аппаратов.
3. Расчетные зависимости эксергетических коэффициентов и области максимальных их значений определяют области развития и применения гелиоэнергетических холодильных установок с новыми рабочими парами, например рабочие пары АС-аммиак лучше использовать для замораживания и охлаждения, АС-метиламин – для охлаждения и кондиционирования, АС- этиламин – для кондиционирования.

Библиографический список:

1. Руденко М.Ф. Концепция развития экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства тепла и холода // Безопасность жизнедеятельности. 2006. №10. С.46-50.
2. Руденко, М.Ф. Адсорбционные свойства активного угля для гелиохолодильных установок / М.Ф. Руденко, И.А.Палагина, Ж.А.Анихуви, С.В.Золотокопова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1999. №12. С.22-23.
3. Руденко М.Ф. Разработка и исследование эффективности экологически безопасной адсорбционной гелиохолодильной установки / М.Ф. Руденко, Ю.В. Чивиленко, В.И. Черкасов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №8. С.26-28.
4. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator / G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa // Renewable Energy. 2016. Vol.86. pp. 238-250
5. Pan, Q.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, R.Z. Wang, Z.S. Lu, L.W.Wang // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol.72. pp. 275-282.
6. Патент РФ № 2365676, С1 от 27.08.2009. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь. 2008. Бюл.№24
7. Руденко, М.Ф. Эффективность гелиоприемных устройств с концентраторами для систем тепло- и хладоснабжения / Саратов. Лаборатория нетрадиционной энергетики ОЭП СНЦ РАН, 2001. 64 с.
8. Шипулина, Ю.В. Методика определения тепловых нагрузок на реактор генератора- адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки / Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2013. № 1. С.148-154
9. Руденко, М.Ф. Определение физических характеристик активного угля для адсорбционных холодильных машин / М.Ф. Руденко, И.А. Палагина, Ж.А. Анихуви, С.В. Золотокопова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №8. С. 39-40.
10. Wang, L.W. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // L.W. Wang, Z.Y.Xu, Q.W.Pan, S.Du, Z.Z.Xia. // Appl Energy. – 2016.Vol. 169 - P. 846-856.
11. Xu S.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon–ammonia working pair / S.Z. Xu, L.W. Wang, R.Z. Wang // Energy Conversion and Management. - 2016. Vol.117. pp. 31-42.
12. Шипулина, Ю.В. Моделирование термодинамического цикла работы адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора / Ю.В. Шипулина, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. 2011. №3. С.136-140.

References:

1. Rudenko M.F. Kontseptsiya razvitiya ekologicheskii bezopasnoy geliioenergeticheskoy tekhniki dlya proizvodstva tepla i kholoda // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2006. №10. S.46-50. [Rudenko M.F. The concept of development of environmentally friendly solar energy technology for the production of heat and cold // Life safety. 2006. No. 10. pp.46-50. (In Russ)]
2. Rudenko, M.F. Adsorbtsionnyye svoystva aktivnogo uglya dlya geliokholodil'nykh ustanovok / M.F. Rudenko, I.A.Palagina, ZH.A.Anikhuvi, S.V.Zolotokopova // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. 1999. №12. S.22-23. [Rudenko, M.F. Adsorption properties of activated carbon for solar refrigeration units / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, J.A. Anihuvi, S.V. Zolotokopova // Chemical and oil and gas engineering. 1999. No. 12. pp.22-23. (In Russ)]
3. Rudenko, M.F. Razrabotka i issledovaniye effektivnosti ekologicheskii bezopasnoy adsorbtsionnoy geliokholodil'noy ustanovki / M.F. Rudenko, YU.V. Chivilenko, V.I. Cherkasov // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. 2006. №8. S.26-28. [Rudenko, M.F. Development and study of the effectiveness of environ-

- mentally friendly adsorption solar refrigeration unit / M.F. Rudenko, Yu.V. Chivilenko, V.I. Cherkasov // Chemical and oil and gas engineering. 2006. No8. pp.26-28. (In Russ)]
4. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator / G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa // Renewable Energy. 2016. Vol. 86. pp. 238-250
 5. Pan, Q.W. Experimental investigation of an adsorption refrigeration prototype with the working pair of composite adsorbent-ammonia // Q.W. Pan, R.Z. Wang, Z.S. Lu, L.W. Wang // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 72. pp. 275-282.
 6. Patent RF № 2365676, S1 of 27.08.2009. Elektrolit dlya osazhdeniya chernykh antikorroziyonnykh oksidnykh pokrytiy na stal'. 2008. Byul.№24 [RF patent No. 2365676, C1 of 08.27.2009. Electrolyte for the deposition of black anticorrosive oxide coatings on steel. 2008. Bull.№24(In Russ)]
 7. Rudenko, M.F. Effektivnost' geliopriyemnykh ustroystv s kontsentratorami dlya sistem teplo- i khladosnabzheniya / Saratov. Laboratoriya netraditsionnoy energetiki OEP SNTS RAN, 2001. 64 s. [Rudenko, M.F. Efficiency of solar receiving devices with concentrators for heat and cold supply systems / Saratov. Laboratory of Alternative Energy OEP SSC RAS, 2001. 64 p. (In Russ)]
 8. Shipulina, YU.V. Metodika opredeleniya teplovykh nagruzok na reaktor generatora- adsorbera gelienergeticheskoy kholodil'noy ustanovki / YU.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko // Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2013. No. 1. pp.148-154 [Shipulina, Yu.V. Methodology for determining thermal loads on the reactor of an adsorber generator of a solar energy refrigeration unit / Yu.V. Shipulina, M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko // Bulletin of the ASTU. Series: Marine Engineering and Technology. 2013. No. 1. pp.148-154(In Russ)]
 9. Rudenko, M.F. Opredeleniye fizicheskikh kharakteristik aktivnogo uglya dlya adsorbtsionnykh kholodil'nykh mashin / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, ZH.A. Anikhuvi, S.V. Zolotokopova // Khimicheskoye i neftega-zovoye mashinostroyeniye. 2000. No.8. s. 39-40 [Rudenko, M.F. Determination of physical characteristics of activated carbon for adsorption refrigeration machines / M.F. Rudenko, I.A. Palagina, J.A. Anihuvi, S.V. Zolotokopova // Chemical and oil and gas engineering. 2000. No8. pp. 39-40. (In Russ)]
 10. Wang, L.W. Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures // L.W. Wang, Z.Y.Xu, Q.W. Pan, S. Du, Z.Z.Xia. // Appl Energy. 2016.Vol. 169 pp. 846-856.
 11. Xu, S.Z. Thermodynamic analysis of single-stage and multi-stage adsorption refrigeration cycles with activated carbon – ammonia working pair / S.Z. Xu, L.W. Wang, R.Z. Wang // Energy Conversion and Management. 2016. Vol.117. pp. 31-42.
 12. Shipulina, YU.V. Modelirovaniye termodinamicheskogo tsikla raboty adsorbtsionnogo gelienergeticheskogo termotransformatora / YU.V. Shipulina, M.F. Rudenko // Vestnik AGTU. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. No.3. s.136-140. [Shipulina, Yu.V. Modeling the thermodynamic cycle of the adsorption solar energy thermal transformer / Yu.V. Shipulina, M.F. Rudenko // Bulletin of the ASTU. Marine engineering and technology. 2011. No3. pp.136-140. (In Russ)]

Сведения об авторах.

Руденко Михаил Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

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

Каримов Марат Шойдаллаулы, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Программная инженерия»; e-mail: rudenko@astu.org

Руденко Александра Михайловна, студент направления «Программный инженеринг» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»; e-mail rudenko@astu.org

Information about the authors.

Mikhail F. Rudenko, Dr. Scie. (Technical), Prof., Department of Life Safety and Environmental Engineering; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Julia V. Shipulina, Cand. Scie. (Technical), Assoc.Professor, Department of Life Safety and Environmental Engineering»; e-mail: aleera78@mail.ru

Marat Sh. Karimov, Cand. Scie. (Technical), Senior Lecturer, Department of Software Engineering; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Alexandra M. Rudenko, Student of the Direction "Software Engineering"; e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.10.2019.

Принята в печать 06.11.2019.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.10.2019.

Accepted for publication 06.11.2019.

Для цитирования: Сагдеев Д.И., Абдулагатов И.М., Никулин Н.К., Тюлькин В.И. Модернизированная конструкция гидростатического плотномера для измерения плотности высоковязких нефтей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4): 42-52. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

For citation: D.I. Sagdeev, I.M. Abdulagatov, N.K. Nikulin, V.I. Tyulkin. Modernised design of a hydrostatic densimeter for measuring density of highly viscous oils. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4): 42-52. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 532.14:678

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПЛОТНОМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Сагдеев Д.И.¹, Абдулагатов И.М.², Никулин Н.К.³, Тюлькин В.И.³

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,

¹1420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Россия,

²Дагестанский государственный университет,

²367000, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43-а, Россия,

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

³105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Россия

Резюме. Цель. Целью данной работы является модернизация плотномера ВТ-КХТИ, работающего по методу гидростатического взвешивания, для исследования плотности высоковязких нефтей и нефтепродуктов в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении. **Метод.** Из многочисленных методов исследования плотности в ходе исследования применены: пьезометры постоянного и переменного объемов, метод гидростатического взвешивания. **Результат.** Представлены результаты исследования плотности высоковязких нефтей Республики Татарстан в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении следующих марок: Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН); Куакбаишская нефть (сернистая), Кичуйская нефть и Девонская нефть. Произведен анализ и выбор методик измерения плотности. Приведена методика оценки погрешности и калибровки плотномера. Рассмотрена модернизированная конструкция гидростатического плотномера для измерения плотности высоковязких нефтей. Выполнен вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания. **Вывод.** Плотномер ВТ-КХТИ для вакуумных рабочих жидкостей модернизирован и откалиброван для научно-исследовательских работ по измерению коэффициента динамической вязкости реовискозиметром ВТ-КХТИ, как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-19-00478).

Ключевые слова: плотность, нефть, гидростатический плотномер, методы измерения плотности, метод гидростатического взвешивания

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

MODERNISED DESIGN OF A HYDROSTATIC DENSIMETER FOR MEASURING DENSITY OF HIGHLY VISCOUS OILS

D.I. Sagdeev¹, I.M. Abdulagatov², N.K. Nikulin³, V.I. Tyulkin³

¹Kazan National Research Technological University,

¹68 Karl Marx St., Kazan 1420015, Russia,

²Daghestan State University,

²43-a Gadzhieva St., Makhachkala 367000, Russia,

³Bauman Moscow State Technical University,

³5 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

Abstract. Objectives. The aim of this work is to modernise a VT-KHTI densimeter operated by the method of hydrostatic weighing in order to study the density of highly viscous oils and oil products in the temperature range from 293 K to 473 K at atmospheric pressure. **Method.** Among the many methods for studying density, the following were used in the course of the study: the constant- and variable-volume piezometer method and the method of hydrostatic weighing. **Results.** The results of the densimetric study of highly viscous oils obtained from the Republic of Tatarstan in the temperature range from 293 K to 473 K at atmospheric pressure. The following grades are presented: Ashalchinskaya oil (super-viscous, SVO); Kuakbash oil (sulphur), Kichuy oil and Devon oil. Following an analysis and selection of methods for measuring density, a technique for error estimation and densimeter calibration is presented. A calculated expression for the hydrostatic weighing method, derived from the modernised hydrostatic densimeter design for measuring the density of highly viscous oils, is presented. **Conclusion.** The VT-KHTI densimeter for vacuum working fluids has been modernised and calibrated for research work on measuring the dynamic viscosity coefficient of both Newtonian and non-Newtonian liquids.

Acknowledgments The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 18-19-00478).

Keywords: density, oil, hydrostatic densimeter, density measurement methods, hydrostatic weighing method

Введение. Плотность, наряду с другими коэффициентами (вязкости, диффузии и теплопроводности) явлений переноса, является важнейшей структурно-механической характеристикой материала, определяющей его технологические, эксплуатационные и потребительские свойства. Плотность является практически важной теплофизической характеристикой свойств в технологических процессах при нефтедобыче, в нефтехимии, биохимии, пищевой, косметической, лакокрасочной и других отраслях промышленности. Плотность как важная расчетная величина необходима для теоретических расчетов, включая околокритическую область [1,2].

Постановка задачи. Неудовлетворительное состояние отечественного приборостроения и фантастические цены на высокоточное зарубежное оборудование, недоступные даже для промышленных предприятий, вынуждают ученых заниматься вопросами импортозамещения, разрабатывать и изготавливать необходимые для научной работы приборы и экспериментальные установки по исследованию плотности высоковязких нефтей и других жидкостей в различных отраслях промышленности [3,4].

Целью данной работы является модернизация плотномера ВТ-КХТИ, работающего по методу гидростатического взвешивания, для исследования плотности высоковязких нефтей и нефтепродуктов в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении.

Методы исследования. Из многочисленных методов исследования плотности [5] наиболее разработанными являются: пьезометры постоянного и переменного объемов, метод гидро-

статического взвешивания. Приведем краткое описание с последующим выбором метода гидростатического взвешивания

Пьезометр постоянного объема. Различают пьезометры разгруженные [6] и не разгруженные от давления [7]. Наиболее простым в изготовлении является неразгруженный пьезометр с балластным капилляром, позволяющий получить данные с погрешностью $\pm 0,15\%$.

Погрешность метода обусловлена наличием балластного объема и возможными изменениями давления при отсечении измеряемого объема конусами запорных вентилях. При отборе пробы происходит разгерметизация системы, что затрудняет работу с гигроскопичными жидкостями.

Пьезометр переменного объема. Наиболее простым для определения $p-v-T$ данных является метод, основанный на перемещении поршня [8]. Применение этого метода не исключает возможности утечек через неплотности и не обеспечивает сохранность чистоты исследуемых веществ. Другой метод - сифонного пьезометра, предложенный Бриджменом [9], получил усовершенствование в работах [10-12] и успешно реализован при давлениях до 1000 МПа.

Сифон, заполненный жидкостью, подвергается гидростатическому давлению. Изменение внутреннего объема определяется по изменению высоты сифона. К преимуществам этого способа следует отнести высокую - до 0,1% - точность измерения сжимаемости жидкостей. Метод имеет ряд ограничений: он не позволяет работать с вязкими жидкостями ($\eta > 100$ мПа·с) в области низких температур, требует соблюдения предосторожностей, исключающих деформацию сифона.

Метод гидростатического взвешивания. Плотномеры различаются главным образом устройством для взвешивания поплавка. Гидростатические [13] и тензометрические [14] весы позволяют производить измерения плотности в широкой области изменения параметров состояния. Но реализация метода требует вывода из зоны высоких давлений большого количества измерительных проводов, что значительно усложняет конструкции установок.

В настоящее время получил применение метод гидростатического взвешивания, разработанный и усовершенствованный И.Ф.Голубевым [15,16]. Характерной особенностью метода является электромагнитное центрирование подвесной системы, исключающее ее контакт со стенками сосуда высокого давления. Устройства с магнитной подвеской обладают высокой разрешающей способностью [17,18] и позволяют определять плотность жидкостей с погрешностью $\pm 0,01\%$.

В работе [19] приведено описание совмещенной экспериментальной установки, реализующей методы падающего груза и гидростатического взвешивания, предназначенной для измерения коэффициентов динамической вязкости и плотности жидкостей в диапазоне изменения температур от 293 К до 473 К и давлений от 0,098 МПа до 250 МПа.

Экспериментальная часть. Модернизирован и откалиброван плотномер ВТ-КХТИ [20], работающий по методу гидростатического взвешивания, на базе электронных весов неавтоматического действия «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD», оснащенных встроенной гирей, позволяющей производить калибровку одним нажатием клавиши.

Данная усовершенствованная конструкция гидростатического плотномера позволяет производить измерение плотности жидкостей в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении с минимальным временем эксперимента.

Общий вид гидростатического плотномера представлен на рис.1.

На массивном поддоне (1) располагается штатив (2) с регулируемыми ножками, на котором установлена центрирующая система (3), позволяющая перемещать термостатирующую систему (4) в горизонтальной плоскости. На столе (13), снабженном тремя стойками с тремя опорными кольцами (11) для фиксации экрана от тепловых потоков (9), расположен холодильник – экран, предохраняющий электронные весы (14) от тепловых потоков. К нижнему крючку весов подвешивается система измерения плотности (5), состоящая из кольца, нити и поплавок из титанового сплава марки ВТ-6. Размеры поплавка: диаметр - 10 мм, длина - 100 мм.

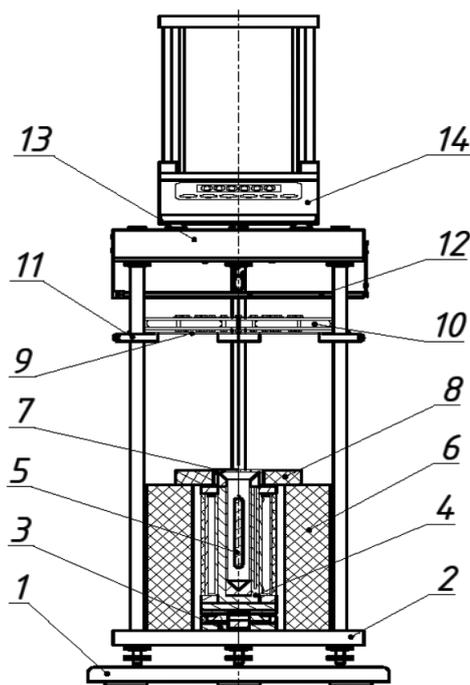


Рис. 1. Общий вид плотномера VT-KHTI

1 – поддон; 2 – штатив; 3 – центрирующая система; 4 – термостатирующая система; 5 – система измерения – кольцо, нить и поплавков из титанового сплава марки VT-6; 6 – кожух асбестовый; 7 – стакан с воронкой; 8 – кольцевые асбестовые диски; 9 – текстолитовый опорный диск; 10 – холодильник-экран от тепловых потоков на веса; 11 – опорное кольцо; 12 – система настройки на «ноль» электронных весов; 13 – стол; 14 – электронные весы марки «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD»

Fig. 1. General view of the density meter VT-KHTI

1 - pallet; 2 - tripod; 3 - centering system; 4 - thermostatic system; 5 - measurement system - ring, thread and float from titanium alloy grade VT-6; 6 - casing asbestos; 7 - a glass with a funnel; 8 - ring asbestos disks; 9 - textolite support disk; 10 - refrigerator screen from heat flows to the scales; 11 - a basic ring; 12 - system settings for "zero" electronic scales; 13 - table; 14 - electronic scales of the HR-250AZG brand of the Japanese company A&D Co. LTD»

В верхней части поплавков имеет ушко для подвешивания на предварительно отожженной константановой проволоке диаметром 0,15 мм и длиной 300 мм. Проволока подвешивается к крючку электронных весов марки «HR-250AZG» через переходник, который в свою очередь соединяется с системой настройки на «ноль» электронных весов (12).

Данная система представляет собой пластину, по центру которой просверлено отверстие диаметром 10 мм. Кольцо, диаметром 25 мм, расположенное выше и соединенное константановой нитью с титановым поплавком, выходит из зацепления при подъеме пластины, а это позволяет настроить на «ноль» электронные весы.

Поплавок помещается в стакане (7) с внутренним диаметром 25 мм с воронкой в верхней части, для исключения перелива исследуемой жидкости. Стакан вставляется в медный блок, помещаемый в теплообменник, через каналы которого прокачивается термостатирующая жидкость. Теплообменник покрыт асбестовой теплоизоляцией. Для предохранения от тепловых потерь предусмотрен кожух асбестовый (6) с боков и два полукольцевых асбестовых диска (8).

Термостатирование осуществлялось полиметилсилаксановой жидкостью марки ПМС-20, которая поступала из циркуляционного термостата LOIP LT-211 с точностью поддержания температуры $\pm 0,1$ К. Для контроля температуры в медном блоке при проведении эксперимента были использованы медь-константановые термопары, помещенные в отверстие в медном блоке термостатирующей системы. Холодные спаи термопар помещались в сосуд Дьюара, заполненный смесью дистиллированной воды со льдом.

Градуировка температуры внутри автоклава и термопар проводилась по термометру лабораторному электронному ЛТ-300, который для диапазона измеряемых температур от -50°C до 200°C имеет допускаемую абсолютную погрешность измерения температуры $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Оценка погрешности результатов аппроксимации результатов измерения температуры внутри измерительного стакана можно описать уравнением

$$t_a = 1,43500 + 8,94654 \cdot 10^{-1} \cdot t_t + 2,14324 \cdot 10^{-4} \cdot t_t^2, \quad (1)$$

где t_a – температура внутри измерительного стакана; t_t – температура циркуляционного термостата LOIP LT-211. Абсолютная погрешность температуры внутри измерительного стакана оценивается $\pm 0,42$ °C.

Результаты измерений температуры термометром лабораторным электронным ЛТ-300 выводятся на цифровой жидкокристаллический индикатор. Термометр также может быть подключен к компьютеру через интерфейс.

Вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания. Вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания проведем по ранее использованной нами методике для измерения плотности жидкостей [19,21–24].

Взвешивание на электронных весах имеет свои особенности, так как исключает перемещение подвесной системы, состоящей из кольца, нити и поплавка, по вертикали, как в рычажных или пружинных весах. Процесс достижения равновесия подвесной системы в процессе взвешивания в нашем случае зависит от характеристики электронных весов неавтоматического действия «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD», которые оснащены встроенной гирей, позволяющей производить калибровку одним нажатием клавиши.

Подвесная система плотномера состоит из кольца, нити и поплавка. На нее действует сила реакции со стороны подвеса электронных весов (P), которая численно равна разности веса подвесной системы, приведенной к пустоте, и массы подвесной системы при взвешивании в воздухе и направлена вниз

$$P = (m - m_1) \cdot g, \quad (2)$$

где $m = m_{\text{п}} + m_{\text{н}} + m_{\text{к}}$ – сумма масс, приведенных к пустоте, поплавок, нити и кольца, соответственно; $m_1 = m_{1\text{п}} + m_{1\text{н}} + m_{1\text{к}}$ – сумма масс поплавок, нити и кольца, соответственно, взвешенных при проведении эксперимента по определению плотности исследуемой жидкости.

Рассмотрим вопросы определения объема и массы подвесной системы, приведенной к пустоте, по рекомендации изложенной в литературе [25].

Расчет объема, приведенного к пустоте (в вакууме)
для рычажных весов

$$V = \frac{m_{\text{в}} - m_{\text{ж}} - (m_{\text{в}} - m_{\text{ж}}) \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}}, \quad (3)$$

для электронных весов, в которых отсутствует разновес

$$V = \frac{m_{\text{в}} - m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса гирь при взвешивании поплавок, нити и кольца, соответственно, в воздухе при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$;

$m_{\text{ж}}$ – масса гирь при взвешивании поплавок, нити и кольца, соответственно, в дистиллированной воде при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$;

V – объем подвесной системы, приведенный к пустоте (в вакууме)

$\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$;

$\rho_{\text{ж}} = 998,23 \text{ кг/м}^3$ – плотность дистиллированной воды при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$;

$\rho_{\text{г}} = 8000 \text{ кг/м}^3$ – плотность гирь разновеса при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$.

Расчет массы, приведенной к пустоте (в вакууме) для рычажных весов

$$m = m_B - \left(\frac{m_B}{\rho_{\Gamma}} - V \right) \cdot \rho_B, \quad (5)$$

для электронных весов, в которых отсутствует разновес

$$m = m_B + V \cdot \rho_B, \quad (6)$$

где m – масса подвесной системы, приведенная к пустоте (в вакууме).

Подвесная система плотномера уравнивается Архимедовой силой, направленной вверх и состоящей из суммы выталкивающих сил, действующих на поплавок, нить и кольцо со стороны воздуха и исследуемой жидкости

$$F_A = (V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B) \cdot g, \quad (7)$$

где V_{Π} – объем титанового поплавка; $V_{\text{н}}$ – объем константановой нити; $V_{\text{к}}$ – объем алюминиевого кольца; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность исследуемой жидкости; $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха. В нашем случае в исследуемой жидкости полностью погружен поплавок (V_{Π}) и десятая часть нити длиной 20 мм ($0,1 \cdot V_{\text{н}}$), а в воздухе находится кольцо ($V_{\text{к}}$) и девять десятых нити ($0,9 \cdot V_{\text{н}}$). Длину проволоки рассчитывают так, чтобы в исследуемую жидкость погрузилась лишь небольшая ее часть (около 20 мм), при этом уменьшение веса проволоки в жидкости сведется к минимуму [3].

Запишем уравнение баланса сил гидростатического плотномера

$$P = F_A. \quad (8)$$

Запишем выражение (7) с использованием выражений (2) и (7)

$$(m - m_1) \cdot g = (V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B) \cdot g. \quad (9)$$

Проведем преобразование (9) и получим

$$m - m_1 = V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B, \quad (10)$$

$$m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}}) = \rho_{\text{ж}} \cdot (V_{\Pi} + 0,1 \cdot V_{\text{н}}). \quad (11)$$

Выразим плотность исследуемой жидкости $\rho_{\text{ж}}$ из (11) и получим

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}})}{(V_{\Pi} + 0,1 \cdot V_{\text{н}})}. \quad (12)$$

Для удаления большой систематической ошибки из окончательного результата для вычисления плотности исследуемой жидкости $\rho_{\text{ж}}$ проведем калибровку объема поплавка $V_{\Pi}^{\text{к}}$ из выражения (10) при плотности исследуемой жидкости $\rho_{\text{ж}}^*$, полученной методом пикнометра при температуре 20°C

$$V_{\Pi}^{\text{к}} = \frac{(m - m_1^{\text{к}} - V_{\text{к}} \cdot \rho_B - V_{\text{н}} \cdot (\rho_{\text{ж}}^* \cdot 0,1 + \rho_B \cdot 0,9))}{\rho_{\text{ж}}^*}. \quad (13)$$

В выражении (13) $m_1^{\text{к}}$ – сумма масс поплавка, нити и кольца, взвешенных при калибровке объема поплавка при калибровке объема поплавка.

Окончательно можно записать выражение для вычисления плотности исследуемой жидкости $\rho_{\text{ж}}$

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}})}{(V_{\Pi}^{\text{к}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}})}. \quad (14)$$

Влияние температуры в основном осуществляется на титановый поплавок, которое можно выразить следующим выражением

$$V_t = V_{\Pi}^{\text{к}} \cdot \Delta_t = V_{\Pi}^{\text{к}} \cdot [1 + 3 \cdot \alpha_t \cdot 10^{-6}], \quad (15)$$

где V_t – объем титанового поплавка при температуре опыта.

Поправка на изменение объема поплавка от температуры, который изготовлен из титанового сплава марки ВТ-6

$$\Delta_t = [1 + 3 \cdot \alpha_t \cdot 10^{-6}], \quad (16)$$

где $\alpha_t = 7,70932 + 0,00382203 \cdot t$ – коэффициент линейного расширения материала поплавка t – температура опыта, °C, $\alpha_{t=20^\circ\text{C}} = 7,78576 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$ – при температуре калибровки $t_{20} = 20^\circ\text{C}$.

Влиянием температуры на 0,1 длины константановой нити можем пренебречь.

Окончательно можно записать выражение для вычисления плотности исследуемой жидкости $\rho_{ж_t}$ при различных температурах

$$\rho_{ж_t} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_H + V_K)}{(V_t + 0,1 \cdot V_H)}. \quad (17)$$

Контрольные измерения плотности методом гидростатического взвешивания. На экспериментальной установке [20] были проведены контрольные исследования плотности н-гептана (C_7H_{16}) эталонного ГОСТ 25828-83 фирмы «Компонент-Реактив» ($\rho_4^{20} = 683,67$ кг/м³, $n_D^{20} = 1,3878$) при температурах от 293 К до 323 К при атмосферном давлении.

Экспериментальные данные при атмосферном давлении были получены двумя методами: пикнометрическим [3] и методом гидростатического взвешивания. Согласование результатов измерений плотности, полученных указанными выше независимыми методами, хорошее совпадение с литературными данными [22,23] подтверждают достоверность проведенных экспериментальных исследований. Максимальные расхождения не превышают $\pm 0,3\%$, что лежит в пределах расчетной погрешности опыта.

Результаты по оценке погрешности, представленные в [20] позволяют сделать вывод, что расчетная погрешность эксперимента при исследовании н-гептана плотности методом гидростатического взвешивания $\pm 0,0216\%$.

Для проверки работоспособности гидростатического плотномера ВТ-КХТИ в области высоких температур была проведена калибровка по ранее изученным нами жидкостям с температурами кипения моноэтиленгликоль (МЭГ) [19,21] – $197,3^\circ\text{C}$ (470,45К) и монопропиленгликоль (МПГ) [24] – $187,4^\circ\text{C}$ (460,55К). Данная калибровка показала хорошее согласие экспериментальных данных при высоких температурах.

Оценка погрешности опытов. Оценка погрешности измерения ρ_T для олеиновой кислоты на данной установке была проведена в соответствии с ГОСТ 8.207-76 [26] для прямых измерений и косвенных ГОСТ МИ 2083-90 ГСИ [27] в условиях многократных наблюдений, полученных для неблагоприятных условий проведения эксперимента, и руководству по выражению неопределенности в измерениях [28].

Результаты по оценке погрешности позволяют сделать вывод, что расчетная погрешность эксперимента при исследовании плотности олеиновой кислоты методом гидростатического взвешивания при доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 0,95$ составляет $\Delta = \pm 0,014\%$ [29].

Обсуждение результатов. На экспериментальной установке были проведены исследования плотности нефтей Республики Татарстан в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении следующих марок: Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН); Куакбашская нефть (сернистая), Кичуйская нефть и Девонская нефть. Результаты измерений плотности нефтей при различных температурах были обработаны полиномами второй степени (18), коэффициенты которых приведены в табл. 1

$$\rho(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2, \quad (18)$$

где $\rho(T)$ – плотность [кг/м³]; T – температура в градусах [K].

Таблица 1. Коэффициенты полинома второй степени для выражения (18)
Table 1. Coefficients of a polynomial of the second degree for expression (18)

№	Наименование Name	b_0	b_1	b_2	R^2
1	Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН) Ashalchinskaya oil (super-viscous, extra-viscous oil)	$1,16435 \cdot 10^3$	$7,78761 \cdot 10^{-1}$	$2,24214 \cdot 10^{-4}$	$9,99903 \cdot 10^{-1}$
2	Куакбашская нефть (сернистая) Kuakbash oil (sulphurous)	$1,27230 \cdot 10^3$	-1,76031	$1,67805 \cdot 10^{-3}$	$9,99074 \cdot 10^{-1}$
3	Кичуйская нефть Kichuy oil	$1,15078 \cdot 10^3$	-1,32429	$1,18204 \cdot 10^{-3}$	$9,91618 \cdot 10^{-1}$
4	Девонская нефть Devonian oil	$1,17054 \cdot 10^3$	-1,35848	$1,24558 \cdot 10^{-3}$	$9,94556 \cdot 10^{-1}$

Расхождения в среднем не превышают $\pm 0,5\%$, что лежит в пределах суммарной ошибки измерений.

Вывод. Проведены измерения плотности четырех образцов высоковязких нефтей Республики Татарстан. Плотномер ВТ-КХТИ для вакуумных рабочих жидкостей модернизирован и откалиброван для научно-исследовательских работ по измерению коэффициента динамической вязкости реовискозиметром ВТ-КХТИ как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

Библиографический список:

- Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Мухамедзянов Г.Х. Обобщенное уравнение для плотности жидкостей на псевдокритической изобаре. Вестник Казанского технологического университета, 2010, №2, С. 233-237.
- Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Воробьев Е.С., Мухамедзянов Г.Х., Абдулагатов И.М. Модифицированное уравнение состояния смесей моно, ди- и триэтиленгликолей с учетом их состава. Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т.17, вып. 19, С. 233-237.
- Кивилис С.С. Плотномеры. – М.: Энергия, 1980. – 280 с.
- Измерение массы, объема и плотности. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. М., Издательство стандартов, 1972, – 624 с.
- Парфенов В.И. Классификация методов измерения плотности жидкостей. – Приборы и системы управления, 1977, №5, С.38-39.
- Порхун А.И., Цатурянц А.Б., Порхун Л.Д. Учет деформаций для исследования р-V-T свойств жидкостей и газов. – ПТЭ, 1976, №5, с.253-256.
- Порхун А.И., Болотин Н.К. Экспериментальная установка для исследования плотности легких углеводородов при низких температурах и давлениях до 1000 бар. – В кн.: Теплофизические свойства углеводородов, их смесей, нефтей и нефтяных фракций. М., 1973, вып. 1, с.181-186.
- Doollittle A.K. Specific volumes of n-alkanes. – J.Chem. and Eng. Data, 1964, v. 9, №2, p.275-279.
- Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. – Л.-М.: ГОНТИНКТП-СССР, 1935. – 404 с.
- Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
- Атанов Ю.А., Борзунов В.А., Разумихин В.Н. Измерение сжимаемости жидкостей методом сильфонного пьезометра при давлениях до 10000 кгс/см². – Труды/ВНИИФТРИ, 1964, вып. 75 (135), с.143-150.
- Шаховский Г.П., Лавров И.А., Пушкинский М.Д., Гоникберг М.Г. Установка для определения сжимаемости жидкостей. – ПТЭ, 1962, №1, с.181-183.
- Борзунов В.А., Разумихин В.Н. Установка для измерения плотности жидкостей гидростатическим методом при давлениях до 10000 кгс/см. - Труды/ВНИИФТРИ. 1964, вып.75 (135), с.134-142.
- Павлович Н.В., Тимрот Д.Л. Экспериментальное исследование зависимости р-V-T газообразного и жидкого метана. – Теплоэнергетика, 1958, № 4, с.69-75.

15. Голубев И.Ф. Определение удельного веса жидкостей и газов при высоких давлениях методом гидростатического взвешивания. – Труды/ГИАП, 1957, вып.7, с.47-61.
16. Голубев И.Ф., Добровольский О.А. Измерение плотности азота и водорода при низких температурах и высоких давлениях методом гидростатического взвешивания. – Газовая промышленность, 1964, № 5, с.43-47.
17. Кацнельсон О.Г., Эдельштейн А.С. Автоматические измерительные приборы с магнитной подвеской. – М.: Энергия, 1970. – 216 с.
18. Восканян Р.О., Крайнов В. П., Воробьев А.Н., Никитский В.Б. Установка для измерения веса тела, находящегося в замкнутом сосуде. – Зав.лаборатория, 1976, т.42, № 3, с.310-311.
19. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of polyethylene glycols and their mixtures at temperatures from 293 K to 473 K and at atmospheric pressure. J. Chem. Thermodynamics, 2011, v.43, №12, p.1824-1843.
20. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Alyev V.A., Musin R.Z., Abdulagatov I.M. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. J. Chem. Eng. Data, 2018, v.63, p. 1698-1705.
21. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of polyethylene glycols and their mixtures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. - 146 p.
22. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of n-heptane at temperatures from 298 K to 470 K and pressure up to 245 MPa. Int. J. Thermophys., 2013, v.34, №1, p.1-33.
23. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of n-heptane at high temperatures and pressures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. - 91 p.
24. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Density and viscosity of propylene glycol at high temperatures and high pressures. Fluid Phase Equilibria, 2017, т. 450, с.99-111.
25. Турубинер И.К., Иппиц М.Д. Техника измерения плотности. М.: Машгиз, 1949, 127 с.
26. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. с 01.01.77. – 10 с.
27. ГОСТ МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – Введ. с 01.01.92. – 10 с.
28. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO: Geneva, Switzerland, 1993, (ISBN 92-67-10188-9)
29. D.I. Sagdeev, I.R. Gabitov, Ch.Kh. Isyanov, V.F. Khairutdinov, M.I. Farakhov, Z.I. Zaripov, I.M. Abdulagatov. Temperature Effect on Density and Viscosity of Oleic Acid. J Am Oil Chem Soc., 2019, v.96, pp.647-662.

References:

1. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G.H. Obobshchennoye uravneniye dlya plotnosti zhidkostey na psevdokriticheskoj izobare. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2010, №2, P. 233-237. [Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G.Kh. A generalized equation for the density of liquids on a pseudocritical isobar. Bulletin of Kazan Technological University, 2010, No. 2, pp. 233-237. (In Russ)]
2. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Vorob'yev Y.S., Mukhamedzyanov G.H., Abdulagatov I.M. Modifitsirovannoye uravneniye sostoyaniya smesey mono, di- i trietilenglikoley s uchetom ih sostava. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2014, Vol.17, v. 19, pp. 233-237. [Sagdeev D.I., Fomina M.G., Vorobev E.S., Mukhamedzyanov G.Kh., Abdulagatov I.M. The modified equation of state of mixtures of mono, di - and triethylene glycols, taking into account their composition. Bulletin of Kazan Technological University, 2014, Vol. 17, No. 19, pp 233-237. (In Russ)]
3. Kivilis S.S. Plotnometry. M.: Energiya, 1980. 280 p. [Kivilis S.S. Density meters. - M.: Energy, 1980. -- 280 p. (In Russ)]
4. Izmereniye massy, obyema i plotnosti. Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovskiy A.N. M., Izdatel'stvo standartov, 1972, 624 p. [Measurement of mass, volume and density. Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovsky A.N. M., Publishing house of standards, 1972. 624 p. (In Russ)]
5. Parfenov V.I. Klassifikatsiya metodov izmereniya plotnosti zhidkostey. – Pribory i sistemy upravleniya, 1977, No. 5, pp.38-39. [Parfenov V.I. Classification of methods for measuring the density of liquids. - Devices and control systems, 1977, No. 5, pp.38-39. (In Russ)]
6. Porkhun A.I., Tsaturyants A.B., Porkhun L.D. Uchet deformatsiy dlya issledovaniya r-V-T svoystv zhidkostey i gazov. – PTE, 1976, №5, p.253-256. [Porkhun A.I., Tsaturyants A.B., Porkhun L.D. Deformation accounting for the study of p-V-T properties of liquids and gases. - PTE, 1976, No. 5, pp. 253-256. (In Russ)]
7. Porkhun A.I., Bolotin N.K. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya plotnosti legkikh uglevodorodov pri nizkikh temperaturakh i davleniyakh do 1000 bar. – V kn.: Teplofizicheskiye svoystva uglevodorodov, ikh smesey, neftey i neftyanykh fraktsiy. M., 1973, v. 1, p.181-186. [Porkhun A.I., Bolotin N.K. An experimental set-up for studying the density of light hydrocarbons at low temperatures and pressures up to 1000 bar. - In the book: Thermophysical properties of hydrocarbons, their mixtures, oils and oil fractions. M., 1973, No. 1, pp. 181-186. (In Russ)]
8. Doolittle A.K. Specific volumes of n-alkanes. – J.Chem. and Eng. Data, 1964, Vol. 9, №2, pp.275-279.

9. Bridgman P. V. High pressure physics. - L.-M.: GONTINKTP-USSR, 1935 . 404 p. [Bridzhmen P. V. Fizika vysokikh davleniy. L.-M.: GONTINKTP-SSSR, 1935. 404 p. (In Russ)].
10. Cyclis D.S. The technique of physical and chemical research at high and ultrahigh pressures. - M.: Chemistry, 1965 . 416 p. Tsiklis D.S. Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh. - M.: Khimiya, 1965, 416 p. Cyclis D.S. The technique of physical and chemical research at high and ultrahigh pressures. - M.: Chemistry, 1965 . 416 p. (In Russ)]
11. Atanov YU.A., Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Izmereniye szhimayemosti zhidkostey metodom sil'fonnogo p'yezometra pri davleniyakh do 10000 kgs/sm². - Trudy/VNIIFTRI, 1964, v. 75 (135), s.143-150. [Atanov Yu.A., Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Measurement of compressibility of liquids by bellows piezometer at pressures up to 10,000 kgf / cm². Transactions / VNIIFTRI, 1964, issue. 75 (135), pp. 143-150. (In Russ)]
12. Shakhovskiy G.P., Lavrov I.A., Pushkinskiy M.D., Gonikberg M.G. Ustanovka dlya opredeleniya szhimayemosti zhidkostey. PTE, 1962, №1, s.181-183. [Shakhovsky G.P., Lavrov I.A., Pushkinsky M.D., Gonikberg M.G. Installation for determining the compressibility of liquids. - PTE, 1962, No. 1, pp.181-183. (In Russ)]
13. Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Ustanovka dlya izmereniya plotnosti zhidkostey gidrostaticheskim metodom pri davleniyakh do 10000 kgs/sm. - Trudy/VNIIFTRI. 1964, vol.75 (135), pp.134-142. [Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Installation for measuring the density of liquids by the hydrostatic method at pressures up to 10,000 kgf / cm. - Proceedings / VNIIFTRI. 1964, issue 75 (135), pp. 134-142. (In Russ)]
14. Pavlovich N.V., Timrot D.L. Eksperimental'noye issledovaniye zavisimosti r-V-T gazoobraznogo i zhidkogo metana. Teploenergetika, 1958, № 4, p.69-75. [Pavlovich N.V., Timrot D.L. An experimental study of the p-V-T dependence of gaseous and liquid methane. Thermal Engineering, 1958, No. 4, pp. 69-75. (In Russ)]
15. Golubev I.F. Opredeleniye udel'nogo vesa zhidkostey i gazov pri vysokikh davleniyakh metodom gidrostaticheskogo vzveshivaniya. Trudy/GIAP, 1957, v.7, pp.47-61. [Golubev I.F. Determination of the specific gravity of liquids and gases at high pressures by hydrostatic weighing. Transactions / GIAP, 1957, Issue 7, pp. 47-61. (In Russ)]
16. Golubev I.F., Dobrovol'skiy O.A. Izmereniye plotnosti azota i vodoroda pri nizkikh temperaturakh i vysokikh davleniyakh metodom gidrostaticheskogo vzveshivaniya. Gazovaya promyshlennost', 1964, № 5, s.43-47. [Golubev I.F., Dobrovolsky O.A. Measurement of the density of nitrogen and hydrogen at low temperatures and high pressures by hydrostatic weighing. The gas industry, 1964, No. 5, pp. 43-47. (In Russ)]
17. Katsnel'son O.G., Edel'shteyn A.S. Avtomaticheskkiye izmeritel'nyye pribory s magnitnoy podveskoy. Moscow.: Energiya, 1970. 216 p. [Katsnelson O.G., Edelstein A.S. Automatic measuring devices with magnetic suspension. - M.: Energy, 1970. 216 p. (In Russ)]
18. Voskanyan P.O., Kraynov V. P., Vorob'yev A.N., Nikitskiy V.B. Ustanovka dlya izmereniya vesa tela, nakhodyashchegosya v zamknutom sosude. - Zav.laboratoriya, 1976, t.42, № 3, pp.310-311. [Voskanyan P.O., Kraynov V.P., Vorobyov A.N., Nikitsky V.B. Installation for measuring body weight in a closed vessel. Head of laboratory, 1976, t. 42, No. 3, pp. 310-311. (In Russ)]
19. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of polyethylene glycols and their mixtures at temperatures from 293 K to 473 K and at atmospheric pressure. J. Chem. Thermodynamics, 2011, Vol.43, №12, pp.1824-1843.
20. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Alyev V.A., Musin R.Z., Abdulagatov I.M. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. J. Chem. Eng. Data, 2018, Vol.63, pp.1698-1705.
21. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of polyethylene glycols and their mixtures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. 146 p.
22. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of n-heptane at temperatures from 298 K to 470 K and pressure up to 245 MPa. Int. J. Thermophys., 2013, Vol.34, No.1, pp.1-33.
23. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of n-heptane at high temperatures and pressures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. 91 p.
24. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Density and viscosity of propilen glycol at high temperatures and high pressures. Fluid Phase Equilibria, 2017, t. 450, pp.99-111.
25. Turubiner I.K., Ippits M.D. Tekhnika izmereniya plotnosti. Moscow.: Mashgiz, 1949, 127 p. [Turubiner I.K., Ippits M.D. Density measurement technique. M.: Mashgiz, 1949, 127 p. (In Russ)]
26. GOST 8.207-76. Pryamyye izmereniya s mnogokratnymi nablyudeniyami. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudeniy. V. s 01.01.77. 10 p. [GOST 8.207-76. Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of observations. - Enter. from 01.01.77. 10 p. (In Russ)]
27. GOST MI 2083-90 GSI. Izmereniya kosvennyye. Opredeleniye rezul'tatov izmereniy i otsenivaniye ikh pogreshnostey. V. s 01.01.92. 10 p. [GOST MI 2083-90 GSI. The measurements are indirect. Determination of measurement results and evaluation of their errors. - Enter. from 01.01.92. 10 p. (In Russ)]
28. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO: Geneva, Switzerland, 1993, (ISBN 92-67-10188-9)
29. D.I. Sagdeev, I.R. Gabitov, Ch.Kh. Isyanov, V.F. Khairutdinov, M.I. Farakhov, Z.I. Zaripov, I.M. Abdulagatov. Temperature Effect on Density and Viscosity of Oleic Acid. J Am Oil Chem Soc., 2019, Vol.96, pp.647-662.

Сведения об авторах:

Сагдеев Дамир Исмагилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок»; e-mail: sagdeev@mail.ru

Абдулагатов Ильмутдин Магомедович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физической химии»; e-mail: ilmutdina@gmail.com

Никулин Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника»; e-mail: nikulinnk@gmail.com

Тюлькин Владислав Игоревич, студент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника физических установок»; e-mail: tyulkin.vladislav@mail.ru

Information about authors:

Damir I. Sagdeev, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., of the Department «Vacuum Technology of Electrophysical Installations»; e-mail: sagdeev@mail.ru

Ilmutdin M. Abdulagatov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Physical Chemistry; e-mail: ilmutdina@gmail.com

Nikolay.K. Nikulin, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., of the Department «Vacuum and compressor technology»; e-mail: nikulinnk@gmail.com

Vladislav.I. Tyulkin, Student of the Department «Vacuum and compressor technology of physical installations»; e-mail: tyulkin.vladislav@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.09.2019.

Принята в печать 21.10.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.09.2019.

Accepted for publication 21.10.2019.

Для цитирования: Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г. Термоэлектрическая система для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4): 53-64. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

For citation: Sh.A. Yusufov, A.M. Ibragimova, S.A. Peredkov, T.E. Sarkarov, R.G. Mitarov. Thermoelectric system for providing a heat regime for modular electronic equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4): 53-64. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 637.

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-53-64

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МОДУЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Юсуфов Ш.А., Ибрагимова А.М., Передков С.А., Саркаров Т.Э., Митаров Р.Г.

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

Резюме. Цель. В статье рассматривается термоэлектрическая охлаждающая система (ТЭОС) для обеспечения теплового режима модульного электронного оборудования (МЭО), размещенного в шкафу. Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их охлаждении воздушным потоком от параметров ТЭОС. **Метод.** Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения электронных плат в блоках кассетной конструкции с использованием термоэлектрической охлаждающей системы был разработан стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в лаборатории опытный образец. **Результат.** Представлены направления конструктивных решений использования ТЭОС устройства, приведено описание экспериментального стенда и методики проведения эксперимента, приведены зависимости температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭОС мощности, температур горячих и холодных спаев, скорости воздушного потока и расстояния между электронными платами. **Вывод.** Экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения МЭО; указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным и достигать температур, необходимых по техническим условиям эксплуатации; при выборе вентилятора для обеспечения принудительного циркулирования воздушного потока в системе необходимо учитывать скорость воздушного потока в канале; необходимо резервировать мощность источника электропитания для функционирования ТЭОС пропорционально мощности источников тепловыделений. Кроме того, важным моментом для функционирования ТЭОУ является обеспечение эффективного отвода теплоты с горячих спаев используемых ТЭМ, и при отсутствии условий для его реализации делает невозможным применение предложенной системы.

Ключевые слова: термоэлектрическая охлаждающая система, тепловой режим, электронное оборудование, экспериментальные исследования, электронная плата

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC SYSTEM FOR PROVIDING A HEAT REGIME FOR MODULAR ELECTRONIC EQUIPMENT

Sh.A. Yusufov, A.M. Ibragimova, S.A. Peredkov, T.E. Sarkarov, R.G. Mitarov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

Abstract Objectives. The article discusses a thermoelectric cooling system (TECS) for ensuring the thermal regime of modular electronic equipment (MEE) located in a cabinet. The main task of the experimental studies is to determine the temperature dependencies of the air-cooled heat-generating elements of a printed circuit board simulator according to TECS parameters. **Method.** In order to conduct experimental studies of a thermoelectric cooling system for printed circuit boards in cassette units using a thermoelectric cooling system, a prototype designed and manufactured in the laboratory was studied on a testing stand. **Result.** The directions of constructive solutions for using a TECS device are presented along with a description of the testing stand and procedure. The dependencies of the temperature of the printed circuit board simulator on the heat power taken away by the TECS are considered along with the temperatures of hot and cold junctions, the air flow velocity and the distance between the electronic boards. **Conclusion.** The operability of the developed MEE cooling system is confirmed by the experimental studies; the specified cooling method has advantages over conventional forced or natural method and can achieve the temperatures required by the technical operating conditions; when choosing a fan to provide forced circulation of the air flow in the system, it is necessary to take into account the speed of the air flow in the channel; it is necessary to reserve the power of the power supply for the TECS operation in proportion to the power of the heat sources. An important additional point for the functioning of the thermoelectric cooling device is the necessity of ensuring the effective removal of heat from the hot junctions of the thermoelectric module without which it is impossible to use the proposed system.

Keywords: thermoelectric cooling system, thermal regime, electronic equipment, experimental studies, printed circuit board

Введение. Статистические исследования показали, что в 55% случаев выхода приборов и устройств причиной отказа является именно нарушение температурного режима, и следовательно от теплового режима элементов и функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры существенно зависит надежность всего устройства в целом [1].

Использование специальных методов охлаждения и терморегулирования, основанных на конвективном переносе тепла от МЭО в окружающую среду позволяет добиться необходимого температурного режима работы элементов и МЭО в целом [2, 10-21]. Создание для МЭО постоянных температурных условий, обеспечивающих при помощи термоэлектрических охладителей нормальную работу аппаратуры в широком температурном интервале (от +60 до -60° С), в принципе на сегодняшний день может быть осуществлено различными конструктивными решениями [2]. Среди них наиболее целесообразными представляются три конструктивных направления [4]:

1. Термоэлектрический охладитель (ТЭО), входящий в систему обеспечения теплового режима, как источник тепла и холода представляет собой самостоятельный узел, а охлаждение аппаратуры осуществляется посредством транспортировки теплоносителя (жидкости, газа) к местам расположения аппаратуры.
2. Охлаждение аппаратуры осуществляется посредством компоновки ее тепловыделяющих элементов группами в отдельных стандартизированных теплоизолированных объемах, охлаждаемых ТЭО.

3. Изготовление отдельного (микромодульного) элемента совместно с ТЭО. При этом могут быть варианты разборного и неразборного сочленения термоохладителя с объектом охлаждения.

Охлаждение МЭО во всем ее объеме при помощи обработанного в ТЭОС воздуха или жидкости имеет ряд особенностей, ограничивающих область ее использования, однако оно целесообразно в тех случаях, когда имеется множество малогабаритных тепловыделяющих элементов с высокими удельными тепловыми потоками, и смонтированные в так называемые "кассетные конструкции", ориентированные относительно шасси РЭС вертикально или горизонтально.

Постановка задачи. Известны шкафы для РЭС [6-9], содержащие корпуса, воздуховоды, теплообменники и блоки управления. Например, известен шкаф для размещения МЭО, в котором теплообменник выполнен в виде игольчатого радиатора, снабженного закрывающим его со всех сторон кожухом, в боковых стенках которого выполнены отверстия и основание с окном. Вентиляторы вмонтированы в сквозные каналы, установленные между зигзагообразными участками трубопровода теплообменника и сообщаемые с ним через окно его основания, а теплоотводящие каналы сообщаются с теплообменником через боковые отверстия его кожуха.

В известных шкафах нерационально используются объемы, занимаемые блоками вентиляторов и теплообменником; усложнены конструкции; недостаточная эффективность теплообменника; отсутствует возможность автоматического регулирования теплового режима и тушения возможного возгорания МЭО.

В предлагаемой конструкции [5] для охлаждения электронной аппаратуры, содержащем корпус, расположенные в нем теплообменник и сквозные каналы с вентиляторами, выполненными в виде единого выдвижного блока, а также проложенные вдоль стенок корпуса теплоотводящие каналы для охлаждающей среды, выдвижной блок снабжен расположенным над ним радиатором, выполненным из высокотеплопроводного металла как одно целое со стенками сквозных каналов, и установлен в нижней части закрытого корпуса с образованием между ним и нижним основанием корпуса полости, через которую сообщаются теплоотводящие каналы и сквозные каналы с вентиляторами, а к стенкам сквозных каналов с их внешней стороны присоединены «холодные» спаи батареи термоэлектрических модулей, к «горячим» спаям которых примыкает змеевик с хладагентом, снабженный впускным и выпускным патрубками.

Данная конструкция для охлаждения МЭО обеспечивает возможность автоматического регулирования теплового режима и отличается от известных соединением вентиляторов и теплообменника для охлаждения воздуха в единый компактный выдвижной блок, позволяющий более эффективно использовать занимаемый ими объем шкафа. В нем использованы термоэлектрические модули, связанные с регулятором температуры и датчиком фактической температуры, что позволяет не просто более эффективно, по сравнению с существующими устройствами, охлаждать воздух, но и автоматически регулировать тепловой режим в шкафу в необходимых пределах.

На рис.1 показано устройство блока для охлаждения МЭО. Каждый вентилятор 1 в выдвижном блоке 2 заключен в выполненную из высокотеплопроводного металла прямоугольную ячейку 3, к стенкам которой с внешней стороны припаяны «холодные» спаи термоэлектрических модулей 4, подключенных последовательно к выходу блока автоматического регулятора температуры 5, вход последнего связан с датчиком температуры (не показан), расположенным внутри шкафа рядом с элементами МЭО.

Блок вентиляторов сверху накрыт ребристым радиатором 6, выполненным также из высокотеплопроводного металла и припаянным к стенкам ячеек 3. «Горячие» спаи термоэлектрических модулей 4 охлаждаются, например, фреоном, протекающим по змеевику 7, снабженному впускным и выпускным 9 патрубками и электромагнитными вентилями 10 и 11, связанными с датчиками возгорания (не показаны), расположенными внутри шкафа рядом с электронными элементами.

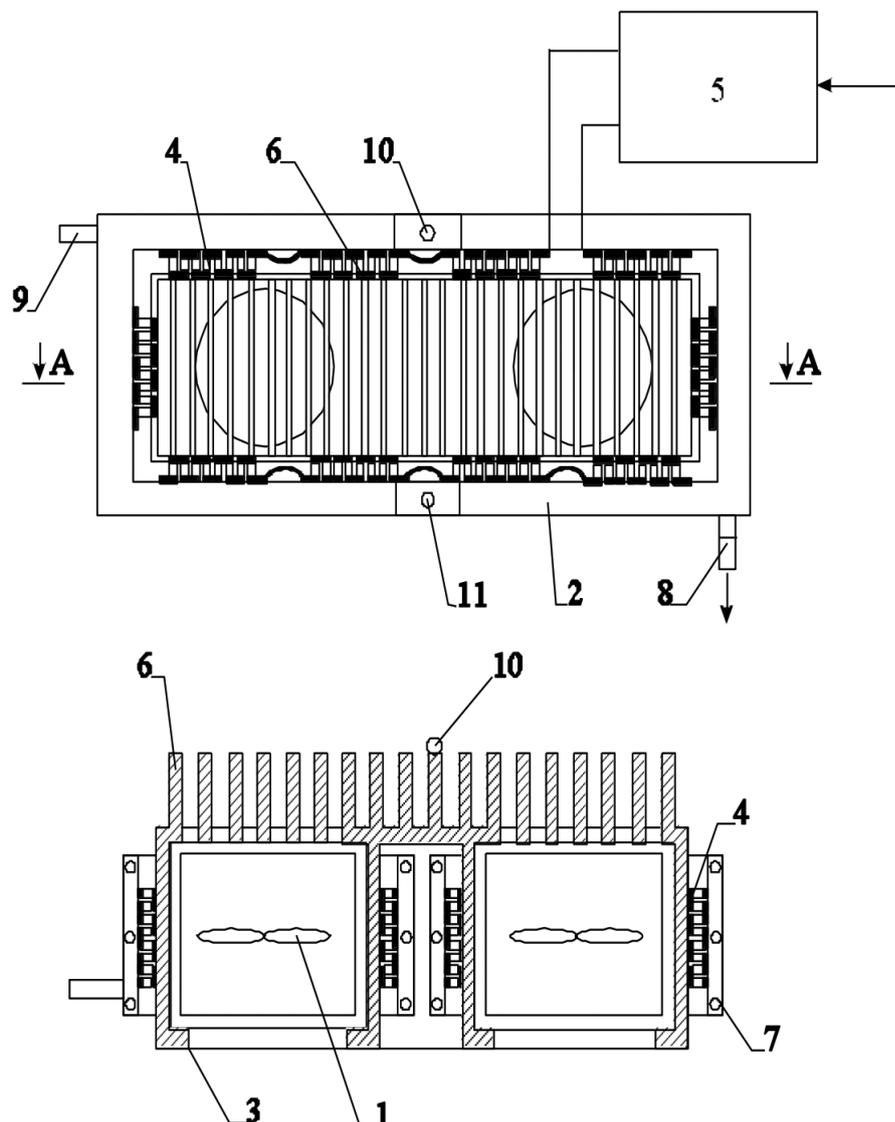


Рис. 1. Термоэлектрическая охлаждающая система для модульного электронного оборудования, размещаемого в шкафу
Fig. 1. Thermoelectric cooling system for modular electronic equipment housed in a cabinet

Принцип работ устройства следующий. На блоке автоматического регулятора температуры 5 устанавливают необходимую внутри шкафа температуру. В зависимости от этой заданной температуры и фактической температуры в шкафу, измеряемой расположенным в нем датчиком, на выход блока автоматического регулятора 5 устанавливается напряжение определенной полярности и величины.

Ток, пропорциональный этому напряжению, проходит через последовательно включенные термоэлектрические модули 4, при этом они начинают охлаждать стенки каналов 3 и радиатор 6 и нагревать змеевик 7 и, наоборот, в зависимости от полярности на выходе блока автоматического регулятора 5. Воздух, нагнетаемый вентиляторами 1, проходя через каналы 3 и щели (жалюзи) радиатора 6, охлаждается, и, в свою очередь, охлаждает элементы МЭО, проходя через секции шкафа.

Из верхней части шкафа воздух через теплоотводящие каналы, прилегающие к стенкам шкафа, проходит вниз в полость для забора воздуха, расположенную под блоком с вентиляторами, затем цикл повторяется.

Методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения электронных плат в блоках кассетной конструкции с использованием ТЭОС был разработан стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в лаборатории опытный образец. Структурная схема стенда приведена на рис. 2

Экспериментальные исследования проводились в теплоизолированной климатической камере, обеспечивающей поддержание температуры в пределах от 283 до 343 К с точностью $0,2^{\circ}$ С и относительной влажности от 30% до 98%.

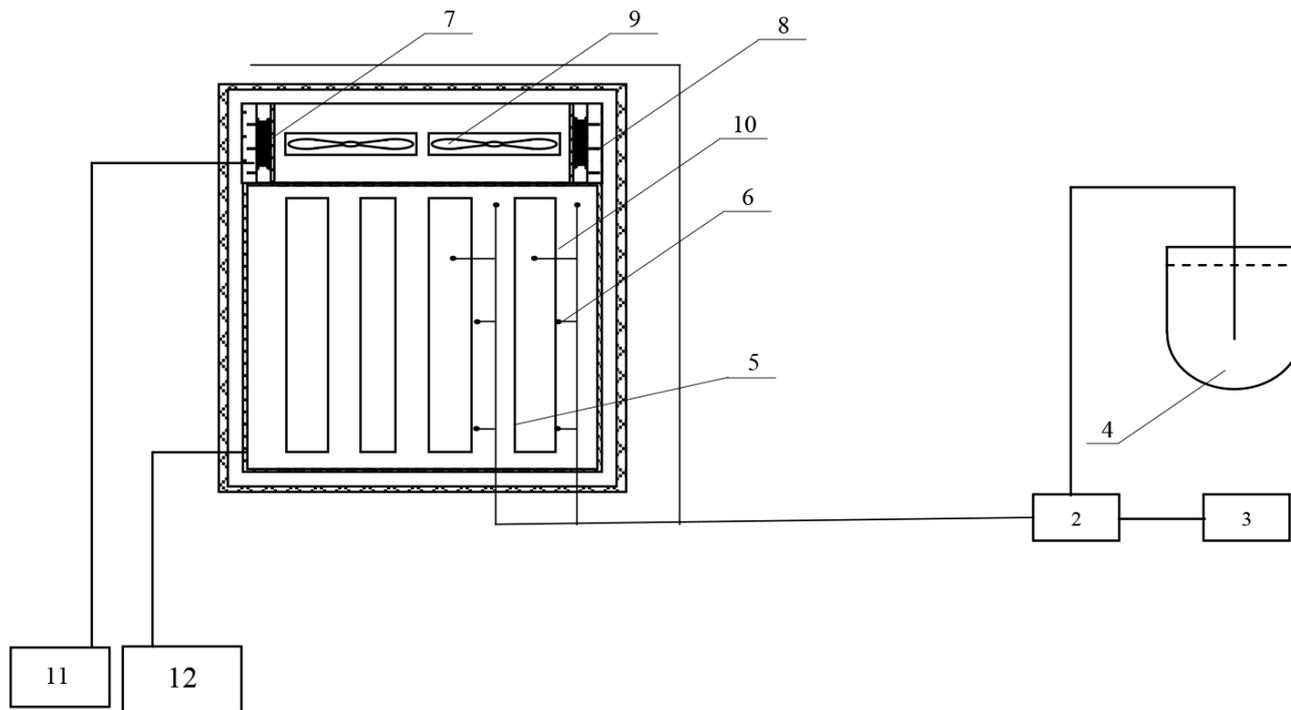


Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда
Fig. 2. The structural diagram of the experimental stand

Заданная температура и относительная влажность в камере регулируются встроенным блоком управления, связанным с датчиком температуры и влажности, показания которого регистрируются цифровым табло.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой ТОУ 7, выполненную из стандартных унифицированных термоэлектрических модулей типа ICE-71. ТОУ устанавливалась на водяной радиатор 8, применяемый для съема тепла с горячих спаев ТОУ. Для принудительного воздушного охлаждения радиатора на холодных спаях термобатареи использовались осевые вентиляторы 9, подводящие и отводящий потоки воздуха. Направленный воздушный поток проходит сквозь радиатор на холодных спаях и охладившись поступал в блок 10 с электронными платами 5. На имитаторе электронной платы 5, в качестве тепловыделяющих элементов применялись плоские нихромовые электронагреватели.

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях замерялись следующие величины: напряжение и ток на ТОУ; температуры на ее спаях; температуры, напряжение и ток на нагревателях, температуры воздуха на входе в блок, и вдоль электронной платы. Температуры на горячей и холодной сторонах ТОУ, а также электронагревателей измерялись медь-константановыми термопарами 6, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 4. Выходные сигналы с термопар через многоканальный переключатель 2 поступали на измерительный комплекс 3. Питание ТОУ осуществлялось от регулируемо-

го источника постоянного тока 11. Ток, проходящий через ТОУ, и напряжение на ней контролировались встроенными в блок питания приборами. Для питания имитаторов тепловой нагрузки (электронагревателей) использовался аналогичный источник постоянного тока 12.

Для исследования опытного образца системы охлаждения проводились измерения температуры в нескольких точках, а именно, на тепловыделяющих элементах, на спаях ТОУ и на радиаторе. Предварительно определялась величина тока и напряжения, соответствующая рассеиваемой мощности электронных элементов в пределах от 10 до 30 Вт.

Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их охлаждении воздушным потоком от параметров ТЭОС. Важным являлось сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими с целью проверки адекватности разработанной ранее математической модели практике. В опыте в качестве имитатора электронной платы использовались электронные модули длиной 30 см, шириной 20 см и толщиной 3 см, содержащая тепловыделяющие элементы с суммарной мощностью тепловыделений 50 Вт, 100 Вт, 150 Вт.

Для регулирования скорости воздушного потока регулировалось напряжение на осевых вентиляторах, установленных на ребрах радиатора холодных спаев термобатареи. На рис. 3-8 представлены результаты экспериментально исследования ТЭО для системы обеспечения теплового режима блока МЭО.

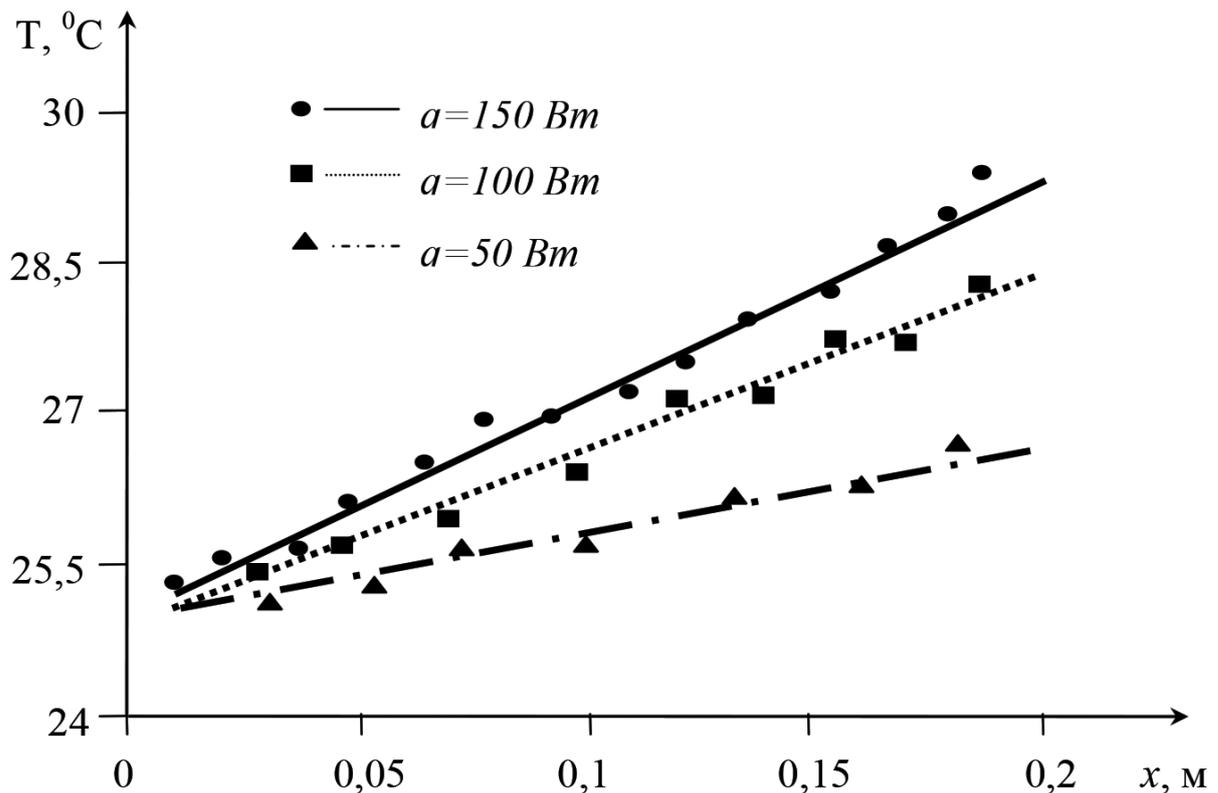


Рис. 3. Распределение температуры вдоль потока воздуха при различных суммарных мощностях источников тепловыделений модуля

▲ ■ ● - экспериментальные данные - experimental data

Fig. 3. Temperature distribution along the air flow at various total capacities of the module heat sources

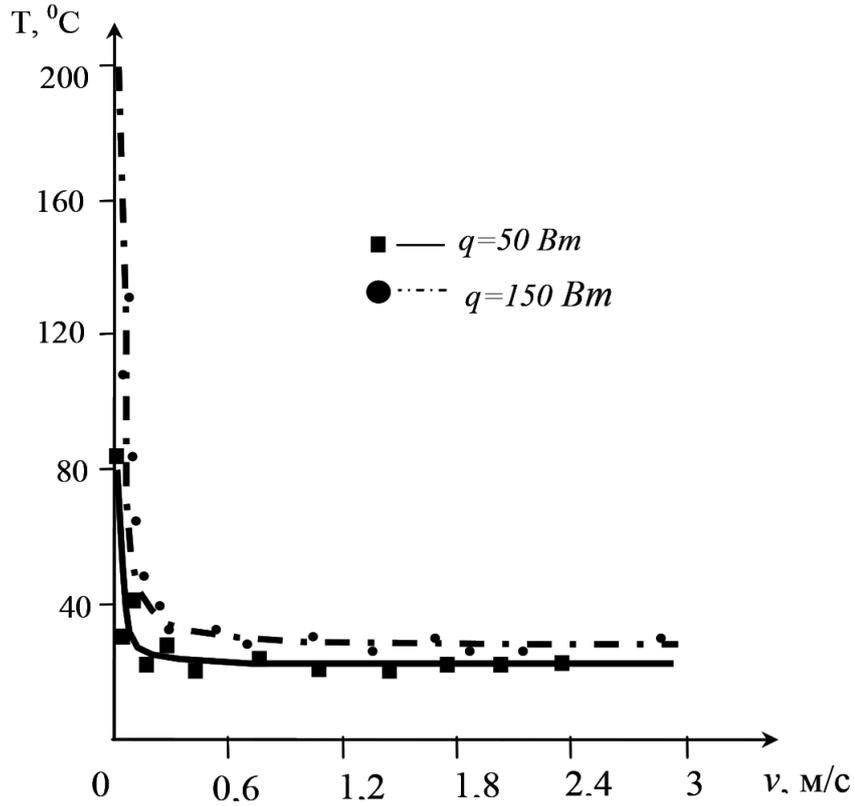


Рис. 4. Зависимости температуры модуля от скорости воздушного потока при различной суммарной мощности источников тепловыделений

■ ●, - экспериментальные данные - experimental data

Fig. 4. Dependences of the temperature of the module on the air flow rate at various total power of heat sources

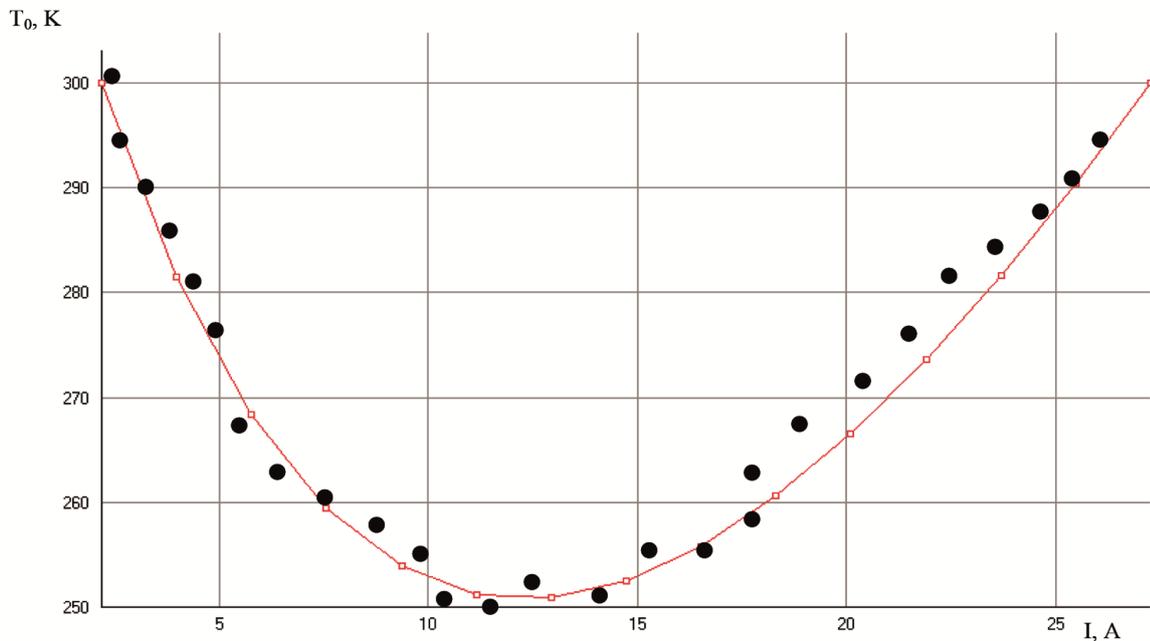


Рис. 5. Зависимость температуры холодного спая T_0 от тока питания при температуре горячего спая $T_r=300$ K

● - экспериментальные данные experimental data

Fig. 5. The dependence of the temperature of the cold junction T_0 on the supply current at the temperature of the hot junction $T_g = 300$ K

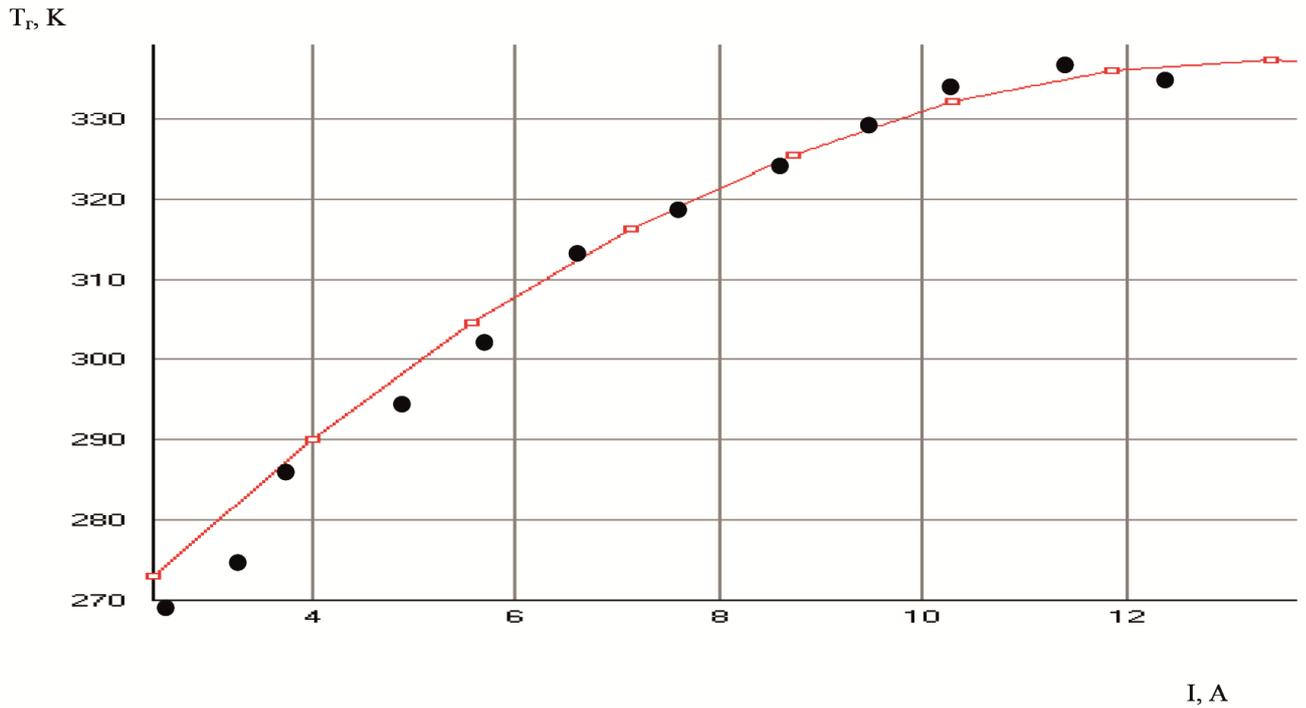


Рис. 6. Зависимость температуры горячего спая T_g от тока питания при тепловой нагрузке 100 Вт
Fig. 6. The dependence of the temperature of the hot junction T_g from the supply current at a thermal load of 100 W
● -экспериментальные данные experimental data

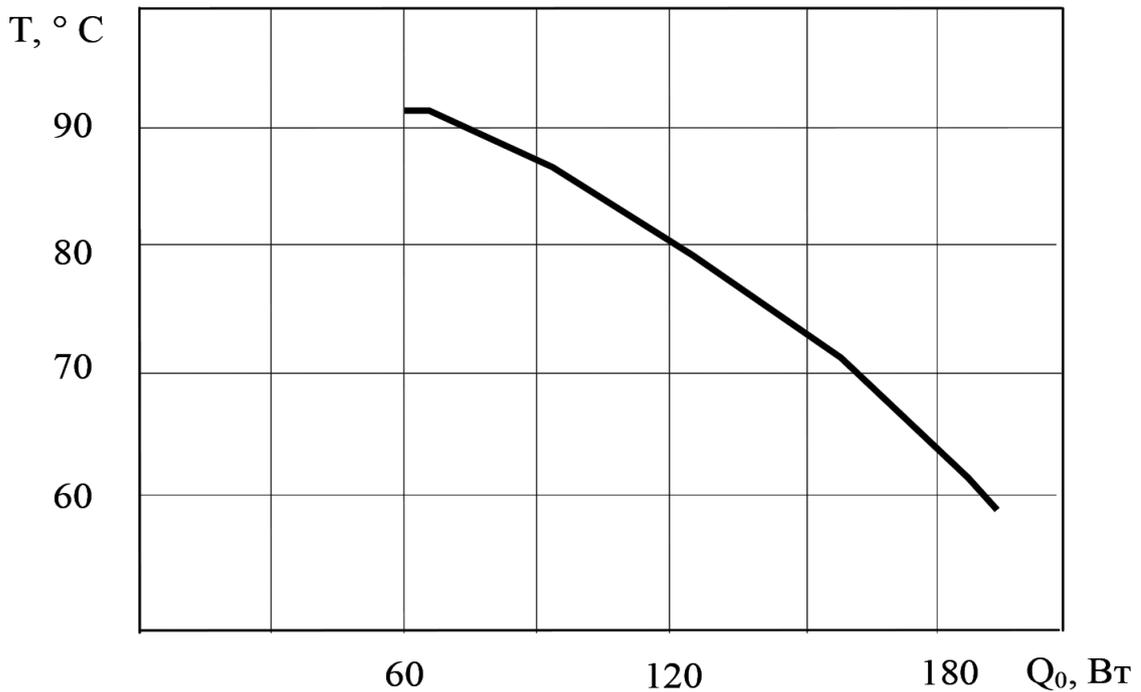


Рис.7. Зависимость температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭО мощности, при мощности тепловых нагрузок 80 Вт
Fig. 7. The dependence of the temperature on the simulator of the electronic board from the power taken out by the TEO, with a thermal load of 80 W

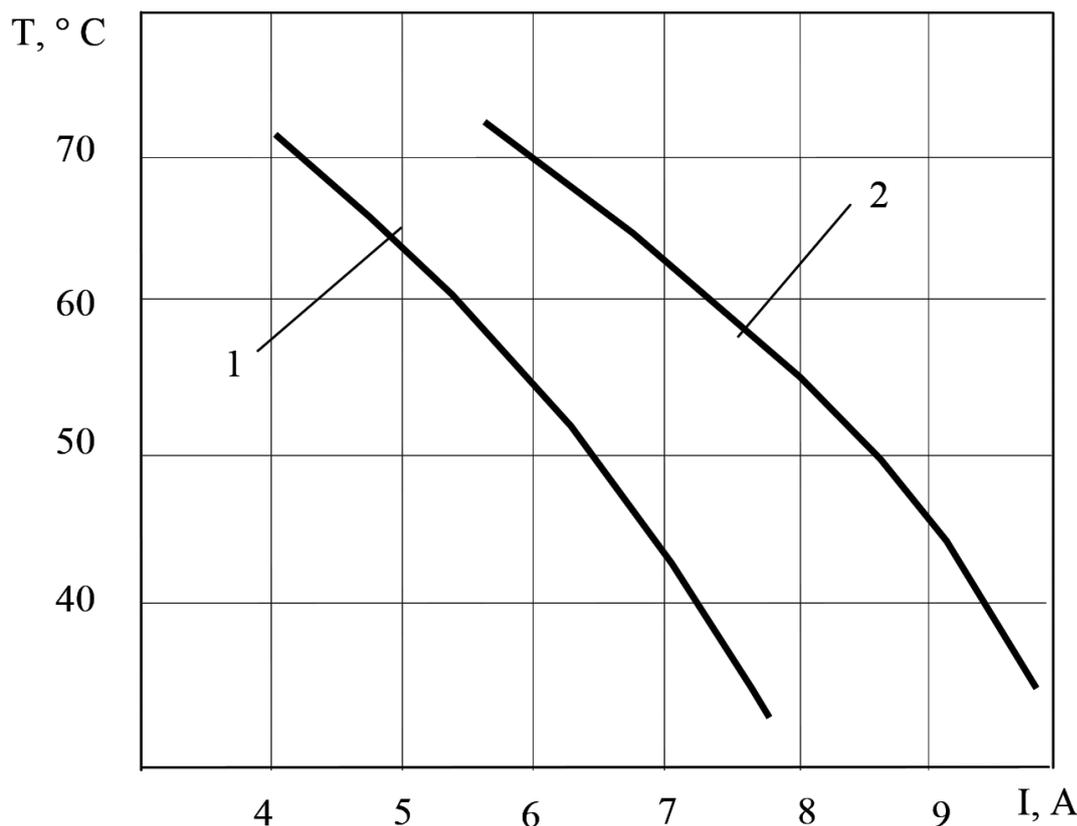


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры на имитаторе от тока, питающего ТЭО: 1 – мощность тепловых источников на плате 50 Вт; 2 – мощность тепловых источников на плате 80 Вт
Fig. 8. The dependence of the maximum temperature on the simulator on the current supplying the feasibility study: 1 - power of heat sources on a board of 50 W; 2 - power of heat sources on the board 80 W

Обсуждение результатов. В процессе проведения исследований также анализировался характер изменения температуры воздушного потока вдоль МЭО. Данный фактор интересен с точки зрения того, что температура воздушного потока неоднородна вдоль обтекаемой плоскости, и на выходе имеет большую температуру. При работе в номинальном режиме электронных элементов данный фактор несущественно влияет на тепловой режим. По результатам полученных графиков, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что изменение температуры потока воздуха вдоль электронного модуля не столь значительно (≈ 3 градуса), однако при работе электронных элементов большой мощности в экстремальных режимах может быть причиной перегрева и соответственно, выхода элемента из строя.

Как показали экспериментальные исследования, увеличение скорости воздушного потока вдоль платы имеет смысл до определенного значения. Как видно из рис. 4 увеличение скорости свыше 0,6 м/с не приводит к дальнейшему существенному снижению температуры поверхности модуля, причем зависимость от суммарной мощности элементов на плате незначительна. Следовательно, отпадает необходимость в использовании высокоскоростных вентиляторов, что понижает их энергопотребление и уровень шума.

Оптимальным током для питания ТОУ (для конкретного типа стандартных термоэлектрических модулей, использованных в системе) для достижения максимального охлаждения, согласно рис.5, является значение в пределах 11-12 А, однако температура горячего спае термоэлектрических модулей при данных токах (рис.6) превышает значение 330 К, что говорит о необходимости обеспечения эффективного теплоотвода с них избыточной теплоты. Кроме того, без стабилизации температуры на горячем спае невозможно обеспечение необходимой холодопроизводительности ТОУ, для снижения температуры на электронной плате.

Согласно рис.7-8 минимальная холодопроизводительность для обеспечения приемлемой для электронных компонентов температуры (60°C) при мощности тепловых нагрузок в 80 Вт составляет более 180 Вт. Однако, требуемая для надежного функционирования электронных элементов температура, обеспечиваемая за счет ТОО существенно зависит от мощности источника тепловыделений (электронного элемента). Так, экспериментальные исследования (рис.8) показали, приемлемой температуры электронного элемента на плате при более низких мощностях тепловыделения можно обеспечить при токах питания 7-9 А.

Вывод. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения МЭО;
- указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным и достигать температур, необходимых по техническим условиям эксплуатации;
- при выборе вентилятора для обеспечения принудительного циркулирования воздушного потока в системе необходимо учитывать скорость воздушного потока в канале;
- необходимо резервировать мощность источника электропитания для функционирования ТЭОС пропорционально мощности источников тепловыделений.

Кроме того, важным моментом для функционирования ТОО является обеспечение эффективного отвода теплоты с горячих спаев используемых ТЭМ, однако отсутствие условий для его реализации делает невозможным применение предложенной системы.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. С.-Пб.: Политехника, 2005.
2. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств.- Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
4. Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
5. Патент РФ № 2203523 Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Исмаилов Т.А., Цеханская Т.Э., Салманов Н.Р., Юсуфов Ш.А.
6. Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрын В.П.
7. Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
8. Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. /Абросимов А.И.
9. Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
10. Ханов Г. В. Альтернативный способ охлаждения процессоров в компьютере / Г. В. Ханов, Е. Б. Белкина // Экология и жизнь : сб. ст. XVIII междунар. науч.-практ. конф., апрель 2010 г. / Приволжский Дом знаний [и др.]. – Пенза, 2010. – С. 137–139.
11. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов //Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
12. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфилов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7(8), 5273–5290. doi:10.3390/en7085273
14. Cleary, M. (2014). Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf .
15. Das, R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from *Energy Harvesting Journal*: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-471-00005925.as>
16. Haddad, C., Périllon, C., Danlos, A., François, M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to

Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia*, 50, 1056–1069. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.125

17. Jovovic, V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
18. Chen, G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebbarjadi. M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy Environ. Sci.* 2012.
19. Hadjstassou, C.; Kyriakides, E.; Georgiou, J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. *Energy Convers. Manag.* 2013, 66, pp.165–172.
20. Apertet, Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoq, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. *Phys. Rev. E* 2012, 85, 041144.

References:

1. Ismailov T.A. *Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivifikatory teploperedachi*. S-Pb.: Politekhnik, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. St. Petersburg: Polytechnic, 2005. (In Russ)]
2. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. *Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye*. - Makhachka-la: IPTS DGTU, 2012. – 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M. Cooling of electronic systems: a training manual. - Makhachka-la: CPI DGTU, 2012. 165 p. (In Russ)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. *Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv*. Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev H.M., Nezhvedilov T.D. Thermostabilization of microelectronic equipment using semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: CPI DGTU, 2013. 149 p. (In Russ)]
4. Rashidkhanov A.T., Yusufov SH.A. *Sistema obespecheniya teplovogo rezhima shkafa telekommunikatsi-onnogo oborudovaniya / Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekh-nicheskiye nauki*. 2017; 44(2):87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96 [Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. The system for ensuring the thermal regime of the telecommunication equipment cabinet. / *Herald of Daghestan State Technical University. Technical science*. 2017; 44 (2): 87-96. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2017-44-2-87-96 (In Russ)]
5. Patent RF № 2203523 *Shkaf dlya okhlazhdeniya radioelektronnoy apparatury / Ismailov T.A., Tse-khanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov SH.A.* [RF patent No. 2203523 Cabinet for cooling electronic equipment / Ismailov T.A., Tsekhanskaya T.E., Salmanov N.R., Yusufov Sh.A. (In Russ)]
6. Patent RF №369860. *Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury / Voronin G.I., Antonov YU.V., Fedorov V.N., Chizhikov YU.V., Dryn' V.P.* [RF patent No. 369860. Equipment cooling device / Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Drin V.P. (In Russ)]
7. Patent RF №1755398 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Sidorin V.I.* [RF patent №1755398 Device for cooling heat-generating equipment. / Sidorin V.I. (In Russ)]
8. Patent RF №1287699 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Abrosimov A.I.* [RF patent No. 1287699 A device for cooling fuel equipment. / Abrosimov A.I. (In Russ)]
9. Patent RF №1595321 *Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A.* [RF patent No. 1595321 A device for cooling heat-generating equipment. / Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., [Maksimova M.A., Ulyanov N.A. (In Russ)]
10. Khanov G. V. *Alternativnyy sposob okhlazhdeniya protsessorov v komp'yutere / G. V. Khanov, Ye. B. Belkina // Ekologiya i zhizn' : sb. st. XVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf., aprel' 2010 g. / Privolzh-skiy Dom znaniy [i dr.]*. – Penza, 2010. – C. 137–139. [Khanov, G.V. An alternative method of cooling processors in a computer / G.V. Khanov, E. B. Belkina // *Ecology and life: collection of books. Art. XVIII international scientific-practical Conf., April 2010 / Volga House of Knowledge [et al.]*. Penza, 2010 pp. 137–139. (In Russ)]
11. *Razrabotka i modelirovaniye mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya [Tekst]: monografiya / D.A. Konovalov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VGTU, 2013. – 222 s.* [Development and modeling of microchannel cooling systems [Text]: monograph / D.A. Konovalov, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov, S.V. Dakhin, N.N. Kozhukhov // Voronezh: VSTU, 2013 . 222 p. (In Russ)]
12. *Proyektirovaniye i ispytaniya okhladiteley silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Tekst] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, YU.A. Fomin, A.S. Savanin // Pribory i sistemy. Upravleniye, kon-trol', diagnostika, 2008. – № 3. – S. 41-43.* [Design and testing of power semiconductor device coolers [Text] / C.A. Panfilov, V.M. Kalikanov, Yu.A. Fomin, A.S. Savanin // *Devices and Systems. Management, control, diagnostics*, 2008. No. 3. pp. 41-43. (In Russ)]
13. Arnaud, L., Ludovic, G., Mouad, D., Hamid, Z., & Vincent, L. (2014). Comparison and Impact of Waste Heat Recovery Technologies on Passenger Car Fuel Consumption in a Normalized Driving Cycle. *Energies*, 7 (8), 5273-5290. doi: 10.3390 / en7085273
14. Cleary, M. (2014). Nanostructured High Temperature Bulk Thermoelectric Energy Conversion for Efficient Waste Heat Recovery. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC .: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace082_cleary_2014_o.pdf

15. Das R. (2013). The Rise of Thermoelectrics. Retrieved February 17, 2014, from Energy Harvesting Journal: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/the-rise-of-thermoelectrics-47100005925.as>
16. Haddad C., Périlhon C., Danlos A., François M.-X., & Descombes, G. (2014). Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. Energy Procedia, 50, 1056-1069. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.125
17. Jovovic V. (2014). Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles. In 2014 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. Washington, DC.: DOE Vehicle Technologies Office. Retrieved from http://energy.gov/sites/prod/files/2014/07/f17/ace080_barnhart_2014_o.pdf
18. Chen G.; Dresselhaus, M.S.; Esfarjani, K.; Ren, Z.F.; Zebbarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. Energy Environ. Sci. 2012.
19. Hadjistassou C.; Kyriakides, E.; Georgiou, J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. Energy Convers. Manag. 2013, 66, 165-172.
20. Apertet Y.; Ouerdane, H.; Goupil, C.; Lecoq, Ph. Efficiency at maximum power of thermally coupled heat engines. Phys. Rev. E 2012, 85, 041144.

Сведения об авторах:

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

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

Передков Сергей Алексеевич, аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: peredkov@mail.ru

Саркаров Таджидин Экберович, доктор технических наук, профессор, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: sarkarovta@mail.ru

Митаров Ризван Гаджимирзаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра физики; e-mail: R4616@yandex.ru

Information about authors:

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

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

Sergey A. Peredkov, Post-graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering; e-mail: peredkov@mail.ru

Tadjedin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering; e-mail: sarkarovta@mail.ru

Rizvan G. Mitarov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Physics; e-mail: R4616@yandex.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.09.2019.

Принята в печать 22.10.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.09.2019.

Accepted for publication 22.10.2019.

Для цитирования: Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б. Моделирование принятия решений в управлении строительной организацией. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(4): 65-74. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-65-74

For citation: T.G. Aigumov, V.B. Melekhin. Decision-making modelling in a building organization managing. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 65-74. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-65-74

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.71

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-65-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б.

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

Резюме. Цель. Цель работы заключается в разработке ситуационной модели принятия решений, обеспечивающей эффективное управление деятельностью крупных строительных организаций в нестабильных условиях экономической среды. **Метод.** Методы исследования основаны на применении методологических основ ситуационного управления и принципов обработки экспертных данных с применением математического аппарата нечетких множеств. **Результат.** Предложен метод управления деятельностью строительной организации в нестабильной экономической среде, разработаны логико-трансформационные правила вывода информационно-аналитической модели ситуационного управления и поддержки принятия решений в условиях неопределенности, определены условия эффективного использования различных логико-трансформационных правил вывода и необходимости перехода организационного управления на многошаговое ситуационное управление деятельностью строительной организации. **Вывод.** Результаты проведенного исследования позволяют обеспечить эффективное управление различными видами деятельности крупной строительной организации в нестабильной экономической среде (в нестабильных условиях современного рынка).

Ключевые слова: строительная организация, экономическая среда, модель ситуационного управления, логико-трансформационные правила вывода, принятие решений

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
DECISION-MAKING MODELLING IN A BUILDING ORGANIZATION MANAGING

T.G. Aigumov, V.B. Melekhin
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objectives. The aim of the work is to develop a situational decision-making model that provides effective management of the activities of large construction engineering organisations under the unstable conditions of the economic environment. **Method.** The research methods are based on the application of the methodological foundations of situational management and the principles of processing expert data using the mathematical apparatus of fuzzy sets. **Results.** A method for managing the activities of a construction engineering organisation under an unstable economic environment is proposed. Logical-transformational rules for deriving an information-analytical model of situational management and decision support under conditions of uncertainty are developed. The necessary conditions for the effective use of various logical-transformational inference rules and the need for an organisational management transition to multi-step situational management of the construction engineering organisation are defined. **Conclusion.** The results of the study allow the effective management of various types of activities of a large construction engineering organisation to be carried out in an unstable economic environment (i.e. under the unstable conditions of the contemporary market).

Keywords: construction engineering organisation, economic environment, situational management model, logical and transformational inference rules, decision making

Введение. В период цифровой трансформации экономики информационные технологии и системы являются важной составной частью организационного управления внутренней составляющей экономической среды (ЭС) крупных строительных организаций (СО), основное назначение которых заключается в формировании и поддержке на должном уровне информационного ресурса с целью повышения эффективности принимаемых управленческих и хозяйственных решений [1,2]. Для формирования информационного ресурса и его эффективного использования, информация должна быть собрана, структурирована и сохранена. Другими словами, информация о состоянии ЭС должна быть получена извне и представлена в таком виде, который позволяет обеспечить оперативную реакцию менеджеров на возникающие в окружении СО угрозы и возможности, а также эффективно реализовать принятую строительной организацией стратегию дальнейшего социально-экономического развития.

Таким образом, информационная система в контуре организационного управления СО выполняет функции не только эффективного инструмента для проведения анализа текущего состояния ЭС и тенденций его развития, но и обеспечивает строительной организации эффективное решение стратегических задач и достижение устойчивых конкурентных преимуществ над своими соперниками.

Постановка задачи. В работе предлагается решение отмеченных выше сложных задач на ситуационной основе, позволяющей учитывать в процессе принятия решений большое количество как негативно, так и позитивно влияющих на деятельность строительной организации факторов экономической среды.

Методы исследования. Следует отметить, что внедрение информационной системы в контур организационного управления деятельностью крупных СО в нестабильной ЭС позволяет достичь следующих основных целей.

1. С одной стороны, с помощью информационной системы можно организовать упреждающее регулирование деятельностью СО на основе наблюдения и учета предвестниковых факторов ЭС, появление которых приводит в ней по истечению определенных интервалов вре-

мени факторов непосредственного влияния на различные виды деятельности строительной организации. С другой стороны, информационная система представляет собой источник формирования знаний, в котором информация концентрируется, разбивается на категории и хранится в удобной форме для использования менеджерами всех отделов организационной системы управления различными видами деятельности СО.

2. Такие системы позволяют автоматизировать рутинные операции (платежные ведомости, инвентарь и т.д.) и обеспечить на этой основе автоматизированный документооборот с едиными формами представления и обработки данных, которыми обмениваются между собой различные подразделения организационной системы управления СО.

3. Информационные системы помогают менеджерам всех уровней иерархии управления принимать эффективные управленческие и хозяйственные решения (например, решать проблему расписания передвижения строительной техники по разнесенным в среде строящимся объектам и т.п.).

4. Данные системы предоставляют информацию, необходимую для эффективной реализации принятой стратегии развития, как на тактическом, так и стратегическом уровне принятия управленческих решений.

Следует также отметить, что после проведения мониторинга и анализа текущего состояния внутренней и внешней составляющей ЭС, целей развития СО, а также с учетом состояния различных срезов внутренней среды (видов деятельности), задачу эффективного управления поведением строительной организации по отклонению в нестабильной экономической среде в общем виде можно решить на основе следующего метода управления и принятия решений.

1. Начало. Провести мониторинг и анализ всех действующих в ЭС факторов.

2. Сформировать модель влияния факторов внешней составляющей ЭС $\{\Phi_{BH}\}$ на внутреннюю среду и деятельность СО.

3. Выполнить разбиение полученного множества факторов внутренней среды Φ_{BC} на подмножества факторов $\Phi_{iBC} = \{\phi_{ijBC}\}$, $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,n_i$ относящиеся к различным ее срезам (m – количество различных срезов или видов деятельности СО отражающих состояние внутренней составляющей ее экономической среды; $n(i)$ – количество факторов в i -м срезе, ко-

торые удовлетворяют требованию $\Phi_{BC} = \bigcup_{i=1}^n \Phi_{iBC}$.

Разделить все полученные таким образом подмножества факторов Φ_{iBC} на факторы управления Φ_{iV} и факторы состояния Φ_{iC} , удовлетворяющие условию $\Phi_{iBC} = \Phi_{iV} \cup \Phi_{iC}$.

Обычно к факторам управления относятся такие факторы внутренней составляющей экономической среды СО, от которых зависят факторы состояния (эффективности) различных ее срезов и которые поддаются изменению в результате проводимых менеджерами организационно-технических и организационно-экономических мероприятий (здесь имеется в виду, что факторы управления одного среза внутренней экономической среды могут влиять на факторы состояния и других различных ее срезов).

В этом случае в качестве факторов состояния выбираются такие факторы различных срезов внутренней экономической среды СО, которые можно оценить количественно и в полной мере охарактеризовать эффективность состояния соответствующего им среза.

4. Сформировать модель фактического состояния каждого i -го среза внутренней составляющей экономической среды СО в форме кортежа факторов состояния $\langle \phi_{iC1}, \phi_{iC2}, \dots, \phi_{iCn(i)} \rangle$ и модель желаемого его состояния, определяемую такими значениями факторов состояния $\langle \phi_{iC1}^*, \phi_{iC2}^*, \dots, \phi_{iCn(i)}^* \rangle$, которые требуется получить в результате эффективной деятельности под воздействием управления (перехода СО из фактического состояния к желаемому состоянию).

5. Для каждого среза внутренней составляющей ЭС сформировать кортеж отклонений $\langle \Delta \phi_{iC1}, \Delta \phi_{iC2}, \dots, \Delta \phi_{iCn(i)} \rangle$ между значениями одноименных факторов в фактическом и желаемом состоянии СО. Установить недопустимые значения отклонений фактических значений факторов состояния от соответствующих им желаемых значений.

6. Для каждого фактора состояний, имеющего недопустимое значение отклонения от желаемого значения, с учетом влияния на него факторов внешней составляющей ЭС сформировать информационно-аналитическую зависимость от факторов управления различных срезов внутренней составляющей экономической среды СО.

Для построения таких информационно-аналитических зависимостей используются экспертные данные и ранее накопленный опыт управления деятельностью СО, на основе которых формируются логико-трансформационные правила вывода с нечеткими значениями входящих в них переменных:

«Если отклонение фактора состояния $\Delta \phi_{iCj}$ “большое”, а все действующие на него факторы внешнего окружения изменяются “медленно”, то необходимо провести следующие изменения факторов управления « ϕ_{iV1} – “существенное”, ϕ_{iV2} – “незначительное”, ..., $\phi_{iVn(i)}$ – “среднее”»».

7. На основе полученных информационно-аналитических зависимостей между факторами состояния, управления и внешнего окружения сформировать организационно-технические и организационно-экономические мероприятия, проведение которых позволяет устранить все различия между фактическими и желаемыми значениями факторов состояния СО путем целенаправленного воздействия на значения факторов управления.

8. Определить все необходимые ресурсы, требующиеся для перехода СО из исходного состояния к желаемому состоянию.

9. Сформировать план перехода СО из исходного состояния к желаемому состоянию, включающий:

- промежуточные подцели или состояния СО, которые позволяют на промежуточных этапах (вехах) оценить успешность выполнения сформированного плана;

- промежутки времени, по истечении которых планируется достижение различных подцелей деятельности СО в ЭС;

- объемы различных ресурсов, требующиеся для реализации каждого этапа сформированного плана деятельности;

- условия, при которых требуется корректировка сформированного плана деятельности и мероприятия связанные с ее проведением.

10. Приступить к реализации сформированного плана поведения.

В случае, когда у СО не хватает средств или потенциальных возможностей для реализации сформированного плана деятельности (такая ситуация может возникнуть в силу непредсказуемости изменяющихся условиях ЭС), то выбираются основные наиболее приоритетные срезы ее внутренней среды.

Затем в первую очередь осуществляются необходимые преобразования их состояний. Другими словами, СО поэтапно реализует план своего развития, начиная с расшивки наиболее узких мест, определяемых наиболее слабыми ее сторонами и т.д. поэтапно, до полного преобразования текущего состояния в желаемое состояние, по мере появления у строительной организации требуемых для этого инвестиций.

11. Конец.

Из содержания приведенного метода управления видно, что для его организации требуется разработка эффективной модели ситуационного управления деятельностью СО в нестабильной ЭС.

Модель ситуационного управления деятельностью СО в нестабильной ЭС. Как отмечено выше, для эффективной реализации приведенной выше методики управления деятельностью СО по отклонению, в первую очередь, необходимо на основе результатов наблюдений и анализа изменений внешней составляющей экономической среды разработать информационно-аналитическую модель влияния на деятельность строительной организации рисков и возможностей, с которыми она сталкивается или может столкнуться в этой среде, как в настоящем, так и в будущем.

Формирование такой модели на первом этапе сводится к взвешиванию факторов риска и возможностей для оценки значимости и степени их влияния на эффективность деятельности СО в нестабильной ЭС. На втором этапе определяются оценки влияния данных факторов на деятельность СО, которые можно получить путем обработки экспертных данных и накопленного опыта управления различными видами деятельности с помощью математического аппарата нечетких множеств [3,4]. Пример построения таких нечетких моделей для оценки различных групп факторов ЭС приведен в табл.1.

Таблица 1. Взвешивание групп факторов и интегральная оценка их влияния на деятельность строительной организации в целом

Table 1. Weighting of groups of factors and an integrated assessment of their impact on the activities of the construction organization as a whole

Группы факторов Groups of factors	Причины возникновения Causes occurrence	Интегральные веса значимости группы факторов Integral weights of significance of a group of factors	Интегральное влияние группы факторов The integral influence of a group of factors	Последствия Effects
Экономические Economic	Финансовый кризис Financial crisis	Сильно значимые - 0,4 Strongly significant	Сильное влияние - 0,6 Strong influence	Снижение ликвидности Decline liquidity
Политические Political	Политический кризис Political crisis	Средне значимые - 0,6 Medium significant	Слабое влияние - 0,4 Weak influence	Разорение Devastation
Рыночные Market	Стагнация производства Stagnation production	Сильно значимые - 1 Strongly significant	Сильное влияние - 0,8 Strong influence	Снижение объемов производства Decline production volumes
Технологические Technological	Развитие НТП NTP development	Сильно значимые - 0,6 Strongly significant	Очень сильное влияние - 0,9 Very strong influence	Потеря конкурентоспособности A loss competitiveness
Конкурентные Competitive	Развитие конкурентов Development competitors	Очень значимые - 0,9 Very significant	Сильное влияние - 0,9 Strong influence	Вытеснение из рынка Crowding out of the market
Международные International	Выход на новые рынки Entering new markets	Слабо значимые - 0,8 Weakly significant	Слабое влияние - 0,3 Weak influence	Получение дополнительной прибыли Making extra profit
Социальные Social	Демографические изменения Demographic changes	Средне значимые - 0,7 Medium significant	Среднее влияние - 0,8 Medium impact	Изменение спроса Change in demand

Аналогичные таблицы формируются и для отдельных срезов внутренней составляющей экономической среды СО, например, табл. 2.

Таблица 2. Структура описания данных «Оценка уровня влияния и отдельных факторов экономической среды»

Table 2. The structure of the data description “Assessment of the level of influence and individual factors of the economic environment”

Наименование группы факторов (технологические) Name groups of factors (technological)	Взвешивание уровня влияния Weighing level of influence	Взвешивание уровня воздействия Level weighting impacts	Возможные последствия Possible consequences
Низкий уровень технологичности строительного производства Low level of manufacturability of construction production	Высокое -0,8 High	Сильное воздействие 0,6 Strong influence	Снижение конкурентоспособности Decreased competitiveness

Для заполнения данными приведенных выше таблиц формируются две нечетких шкалы взвешивания со следующими названиями: «Уровень влияния» и «Оценка воздействия» факторов риска на производственную деятельность СО [5].

Первая шкала разбивается на пять следующих интервалов - термов: « R_1 =очень слабое влияние», « R_2 =слабое влияние», « R_3 =среднее влияние», « R_4 =большое влияние» и « R_5 =очень большое влияние».

Для количественной оценки каждого нечеткого интервала R_j вводится степень влияния $\mu_j(x_i) \in [0,1]$ фактора x_i на эффективность строительного производства. Для вычисления значений степеней влияния проводится независимый опрос n экспертов, каждому из которых предлагается оценить значение параметра $\mu_j(x_i)$ на интервале от нуля до единицы. Затем вычисляется среднее значение оценки, которое и принимается за величину степени влияния.

Таким образом, оценки влияния и воздействия группы факторов $X_j, j=1,2,\dots,m$ или отдельного фактора данной группы $x_i \in X_j, i=1,2,\dots,n$ задаются двумя парами $x_i : (< R_j, \mu_j(x_i) >; < F_i \lambda_i(x_i) >)$. Это позволяет осуществлять взвешивание факторов влияния ЭС, как в качественной, так и в количественной форме, а также сравнивать между собой уровень их воздействия на эффективность деятельности СО в нестабильных условиях функционирования. Кроме того, обобщенные таким образом данные позволяют переносить накопленный опыт управления в новые ситуации ЭС аналогичные ранее исследованным ситуациям [6].

После формирования перечня факторов риска и оценки степени их влияния на различные виды деятельности СО аналитическая группа мониторинга ЭС проводит SWOT анализ [7, 8], по результатам которого оцениваются сильные и слабые стороны СО. Такой анализ необходим руководству для успешного планирования различных видов деятельности СО с учетом ее потенциальных возможностей и слабых сторон, а также проблем, существующих во внешней составляющей ЭС.

Полученная таким образом информация является источником данных для принятия решений, связанных с эффективным управлением деятельностью СО на ситуационной основе и сформированной системы поддержки принятия решений [9, 10]. Для этого каждому негативно действующему фактору ЭС, в соответствии с полученными оценками, планируются организационно-технические и организационно-экономические мероприятия, позволяющие либо ослабить влияние такого фактора на соответствующий вид деятельности СО, либо полностью устранить связанные с ним негативные последствия.

Появление же каждого позитивно действующего фактора (возможности) в ЭС должно сопровождаться выполнением мероприятий, позволяющих избежать упущенных возможностей.

С учетом основных закономерностей изменения ситуаций ЭС [11] в формируемой модели ситуационного управления [12–14] для эффективного принятия решений целесообразно использовать следующие логико-трансформационные правила позволяющие поддерживать деятельность менеджеров СО на всех уровнях организационного управления.

1. Если в ЭС наблюдается негативно действующий фактор x_i , который является сильно значимым и оказывает среднее влияние на эффективность деятельности СО, а состояние ее внутренней среды определяется ситуацией $S_j = \langle \phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jn} \rangle$, то рекомендуется срочно провести организационно-технические мероприятия D_{ij} , позволяющие снизить влияние этого фактора на производственный процесс,

где $\phi_{ji} \in \Phi$, $\Phi = \{\phi_{ji}, i = 1, 2, \dots, n\}$ – множество критериальных показателей, характеризующих состояние различных видов производственной и хозяйственной деятельности СО в j -й ситуации.

2. Если наблюдается позитивный фактор x_i , который является очень сильно значимым и оказывает существенное влияние на повышение эффективности деятельности СО, а состояние ее внутренней составляющей ЭС определяется ситуацией $S_j = \langle \phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jn} \rangle$, то рекомендуется в течение периода времени t провести мероприятия G_j , позволяющие эффективно использовать позитивное влияние наблюдаемого фактора;

3. Если наблюдается сочетание негативно действующих факторов x_1, x_5, x_8 , являющихся высоко значимыми и оказывающими существенное влияние на эффективность деятельности СО, а состояние ее внутренней составляющей ЭС определяется ситуацией $S_j = \langle \phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jn} \rangle$, то для устранения влияния данных факторов следует провести мероприятия $D_{j1}, D_{j2}, \dots, D_{jn}$.

4. Если наблюдается сочетание позитивно действующих факторов x_1, x_5, x_8 , являющихся средне значимыми, но оказывающими существенное влияние на эффективность деятельности СО, а состояние ее внутренней составляющей ЭС определяется ситуацией $S_j = \langle \phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jn} \rangle$, то для эффективного использования возникшей возможности следует предварительно провести мероприятия D_{j1} .

5. Если при состоянии внутренней составляющей ЭС строительной организации, которое определяется ситуацией $S_j = \langle \phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jn} \rangle$, выполнение мероприятий D_j приводило к достижению цели C_j , а при появлении фактора x_i данные мероприятия оказались неэффективными, то для достижения цели C_j необходимо провести мероприятия D_j , позволяющие устранить фактор x_i в ЭС, а затем отработать мероприятия D_j .

Таким образом, основной задачей сбора информации о состоянии внешней составляющей ЭС является определение характера влияния ее различных факторов на различные виды деятельности СО и формирование на этой основе логико-трансформационных правил вывода модели ситуационного управления поведением строительной организации в рыночной среде. Затем на этой основе осуществляется решение конкретных задач управления деятельностью и развитием СО в зависимости от текущего состояния ЭС и дальнейших его изменений.

Для экстраполирования изменений исследуемого среза деятельности СО происходящих в результате проведения выбранных на ситуационной основе управленческих мероприятий в аналитическом центре организационной системы управления создается база знаний, включающая описание всех известных, с учетом накопленного опыта, учитывающего закономерности изменения допустимых состояний этого среза внутренней составляющей ЭС. В общем случае такая модель допустимых преобразований исследуемого среза внутренней составляющей ЭС строительной организации определяется с учетом описания ее внешней составляющей и имеет следующее содержание [15]:

«Текущая ситуация внешней составляющей ЭС», «фактическая ситуация, отражающая текущее состояние исследуемого среза деятельности СО», «мероприятия, позволяющие

осуществить целенаправленное преобразование наблюдаемого состояния исследуемого среза ЭС», «результатирующая ситуация, получаемая после проведения выбираемых мероприятий»».

Обсуждение результатов. В приведенном выше полном описании текущей ситуации на объекте управления, внешняя составляющая ЭС состоит из двух векторов, включающих: оценки факторов внешней составляющей ЭС, которые влияют на исследуемый срез внутренней среды строительной организации и оценки показателей, определяющих целевое состояние исследуемого среза внутренней среды СО на текущий момент времени. Фактическая ситуация представляет собой вектор оценок показателей, характеризующих текущее состояние исследуемого среза ЭС строительной организации.

Результатирующая ситуация оценивается после проведения выбранных мероприятий и определяется вектором оценок состояния исследуемого среза внутренней ЭС строительной организации, получаемого после проведения соответствующих управленческих мероприятий в случае наблюдения заданной текущей ситуации внешней составляющей экономической среды и фактической ситуации на исследуемом срезе деятельности СО.

Выбор наиболее эффективных управленческих воздействий, используя множество допустимых альтернативных мероприятий, осуществляется по текущей ситуации внешней составляющей ЭС с учетом стоимости их выполнения. После этого проводится имитация проведения выбранных мероприятий путем замены значений показателей в текущей ситуации на их значения в результирующей ситуации.

Так формируется новая текущая ситуация в исследуемом срезе внутренней составляющей ЭС строительной организации, получаемая в результате проведения выбранных мероприятий.

На следующем этапе выполняется сравнение вновь полученной текущей ситуации с желаемой ситуацией на исследуемом срезе внутренней составляющей ЭС строительной организации. Если в результате такого сравнения выяснится, что между вновь полученной текущей и желаемой ситуацией наблюдается меньше отклонений одноименных параметров состояния, чем между фактической и желаемой ситуацией, то принимается решение о целесообразности проведения выбранных мероприятий.

В противном случае проведение выбранных мероприятий считается нецелесообразным. Если же проведенные мероприятия не позволяют устранить все наблюдаемые отклонения между целевой и фактической ситуацией определяющей эффективное состояние СО, то принимается решение о переходе на следующий шаг ситуационного управления.

В результате организуется многошаговое ситуационное управление деятельностью СО, определяемое следующей цепочкой действий:

$$S_{исх} \& D_1 \rightarrow S_1 \& D_2 \rightarrow S_2 \& D_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_j \& D_{j+1} \rightarrow \dots S_n D_{n+1} \rightarrow S_{цел.}, \quad (1)$$

где $S_j \& D_{j+1} \rightarrow S_{j+1}$ – запись означает, что если в текущей ситуации внутренней составляющей ЭС S_j строительной организации проводятся мероприятия D_{j+1} , то это позволяет преобразовать эту ситуацию в ситуацию S_{j+1} ; $S_{исх}, S_{цел.}$ – соответственно исходная и целевая ситуации внутренней составляющей ЭС строительной организации.

В результате реализуется многошаговое управление деятельностью СО по отклонению в нестабильной ЭС.

Вывод. Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие основные выводы.

1. Применение ситуационного управления различными видами деятельности СО позволяет в процессе принятия решений учитывать большое количество факторов влияния нестабильной ЭС и, обеспечить на этой основе эффективную деятельность крупной строительной организации в изменяющихся условиях функционирования.

2. Предложенный метод управления позволяет обеспечить эффективное регулирование различных видов деятельности крупной СО в нестабильной экономической среде с учетом происходящих в ней изменений.

3. Логико-трансформационные правила вывода разработанной модели ситуационного управления, в которых учитываются как отдельные факторы ЭС, так и различное сочетание данных факторов, позволяют организовать эффективное принятие управленческих решений в нестабильных условиях современного рынка.

4. Применение аппарата нечетких множеств для описания различных факторов ЭС позволяет обобщить данные используемые для описания ее ситуаций и на этой основе переносить накопленный опыт управления деятельностью СО в ситуации, аналогичные ранее исследованным ситуациям, в изменяющихся условиях функционирования.

Библиографический список:

1. Бодров О.А. Предметно-ориентированные экономические информационные системы. М.: ГТЛ, 2013. 244 с.
2. Информационные системы и технологии /Под ред. Ю.Ф. Тельмана. М.: Юнити, 2017. 544 с.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений/ Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 168 с.
4. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. Тарасов В.Б., Нечеткие множества в системах управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Пospelova. М.: Наука, 1986. 312 с.
5. Абдурахманов Д.Б., Дуллаева Р.М., Мелехин В.Б. Методика интегральной оценки инвестиционных рисков строительного предприятия с нечеткой логикой обработки экспертных данных // Экономика строительства. 2014. №4. С.34-39.
6. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Определение аналогии между ситуациями проблемной среды для переноса накопленного опыта поведения// Известия РАН. Теория и системы управления. 1997. №5. С. 84-87.
7. Весин В.Р., Кафидов В.В. Стратегическое управление. СПб.: Питер, 2017. 256 с.
8. Гипоненко А.Л., Панкрухин А.П. Стратегическое управление. М.: Амега, 2015. 454 с.
9. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2010. 640 с.
10. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы. Принципы построения. М.: Вильямс, 2011. 775 с.
11. Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б. Системный подход к исследованию структуры основных закономерностей инвестиционной строительной среды // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. № 12. С. 12-18 .
12. Пospelov Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
13. Клыков Ю. И., Горький Л.Н. Банки данных для принятия решений. М.: Сов. Радио, 1980. 208 с.
14. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Многоуровневая модель ситуационного управления технологическими процессами обработки деталей в машиностроении // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 73-81.
15. Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б., Эмирова Г.А. Мониторинг экономической среды в управлении производственной деятельностью строительных организаций // Московский экономический журнал. 2018. № 5(2). С. 299-307.

References:

1. Bodrov O.A. Predmetno-orientirovannyye ekonomicheskiye informatsionnyye sistemy. M.: GTL, 2013. 244 s. [Bodrov O.A. Subject-oriented economic information systems. M.: GTL, 2013.244 s.(In Russ)]
2. Informatsionnyye sistemy i tekhnologii /Pod red. YU.F. Tel'mana. M.: Yuniti, 2017. 544 s. [Information systems and technologies / Ed. Yu.F. Telman. M.: Unity, 2017.554 p. .(In Russ)]
3. Zade L. Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye dlya prinyatiya priblizhennykh resheniy/ Per. s angl. M.: Mir, 1976. 168 s. [Zade L. The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions / Per. from English M.: Mir, 1976. 168 p. (In Russ)]
4. Averkin A.N., Batyrshin I.Z., Blishun A.F. Tarasov V.B., Nechetkiye mnozhestva v sistemakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta / Pod red. D.A. Pospelova. M.: Nauka, 1986. 312 s. [Averkin A.N., Batyrshin I.Z., Blishun A.F. Tarasov V.B., Fuzzy sets in control systems and artificial intelligence / Ed. YES. Pospelova. M.: Nauka, 1986. 312 p. (In Russ)]
5. Abdurakhmanov D.B., Dulluyeva R.M., Melekhin V.B. Metodika integral'noy otsenki investitsionnykh riskov stroitel'nogo predpriyatiya s nechetkoy logikoy obrabotki ekspertnykh dannykh // Ekonomika stroitel'stva. 2014. №4. S.34-39. [Abdurakhmanov D. B., Dulluev R. M., Melekhin V. B. Methodology for the integrated assessment of investment risks of a construction company with fuzzy logic for processing expert data // Construction Economics. 2014. No4. pp.34-39.(In Russ)]
6. Bershteyn L.S., Melekhin V.B. Opredeleniye analogii mezhdu situatsiyami problemnoy sredy dlya perenosa nakoplennoogo opyta povedeniya// Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 1997. №5. s. 84-87. [Bershtein L.S., Melekhin V.B. Determination of the analogy between situations in a problem environment for transferring accumulated experience of behavior // Izvestia RAS. Theory and control systems. 1997. No5. pp. 84-87. (In Russ)]
7. Vesin V.R., Kafidov V.V. Strategicheskoye upravleniye. SPb.: Piter, 2017. 256 s. [Vesin V.R., Kafidov V.V. Strategic management. St. Petersburg: Peter, 2017.256 p. (In Russ)]

8. Giponenko A.L., Pankrukhin A.P. Strategicheskoye upravleniye. M.: Amega, 2015. 454 s. [Giponenko A.L., Pankrukhin A.P. Strategic management. M.: Amega, 2015. 454 p. (In Russ)]
9. Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. Bazy znaniy intellektual'nykh sistem. SPb.: Piter, 2010. 640 s. [Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. Knowledge bases of intelligent systems. St. Petersburg: Peter, 2010. 640 p. (In Russ)]
10. Dzharratano D., Rayli G. Ekspertnyye sistemy. Printsipy postroyeniya. M.: Vil'yams, 2011. 775 s. [Jarratano D., Riley G. Expert systems. The principles of construction. M.: Williams, 2011. 775 p. (In Russ)]
11. Аугумов Т.Г., Мелекин В.В. Системный подход к исследованию структуры основных закономерностей инвестиционной строительной среды // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. № 12. С. 12-18. 1 [Aigumov T.G., Melekhin V.B. A systematic approach to the study of the structure of the basic laws of the investment construction environment // Economics: yesterday, today, tomorrow. 2018. No. 12. pp. 12-18. (In Russ)]
12. Pospelov D.A. Situatsionnoye upravleniye: teoriya i praktika. M.: Nauka, 1986. 288 s. [Pospelov D.A. Situational management: theory and practice. M.: Nauka, 1986. 288 p. (In Russ)]
13. Klykov YU. I., Gor'kiy L.N. Banki dannykh dlya prinyatiya resheniy. M.: Sov. Radio, 1980. 208 s. [Klykov Yu. I., Gorky L.N. Databanks for decision making. M.: Sov. Radio, 1980. 208p. (In Russ)]
14. Melekhin V.B., Khachumov V.M. Mnogourovnevaya model' situatsionnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obrabotki detaley v mashinostroyenii // Problemy upravleniya. 2019. № 1. С. 73-81. [Melekhin V.B., Khachumov V.M. A multilevel model of situational management of technological processes for processing parts in mechanical engineering // Problems of Management. 2019. No 1. pp. 73-81. (In Russ)]
15. Аугумов Т.Г., Мелекин В.В., Емирова Г.А. Мониторинг экономической среды в управлении производственной деятельностью строительных организаций // Московский экономический журнал. 2018. № 5(2). С. 299-307. [Aigumov T.G., Melekhin V.B., Emirova G.A. Monitoring of the economic environment in the management of the production activities of construction organizations // Moscow Economic Journal. 2018. No. 5 (2). pp. 299-307. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Айгумов Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: 915533@mail.ru

Мелехин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Information about authors:

Timur G.Aigumov, Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Head of the Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: 915533@mail.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: 915533@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.10.2019.

Принята в печать 22.10.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.10.2019.

Accepted for publication 22.10.2019.

Для цитирования: Гебель Е.С., Ибатуллин А.А., Пешко М.С., Гудинов В. Н. Постановка задачи синтеза модели прогнозного управления атмосферной трубчаткой. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4): 75-83. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83.

For citation: E.S.Gebel, A.A.Ibatullin, M.S.Peshko, V.N.Gudinov. Synthesising the model of the predictive maintenance of atmospheric pipe still. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 75-83. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА МОДЕЛИ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ТРУБЧАТКОЙ

Гебель Е.С., Ибатуллин А.А., Пешко М.С., Гудинов В.Н.

*Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11, Россия*

Резюме. Цель. Рассматриваются вопросы разработки модели системы прогнозного управления, обеспечивающей стабилизацию выходных параметров ректификационной установки большой мощности. **Метод.** Для достижения поставленной цели предлагается свести задачу управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом на отборных тарелках, в этом случае задания по температуре будут рассматриваться, как управляющие воздействия. Для реализации предлагаемого принципа управления построена математическая модель, позволяющая перейти от содержания фракций в нефти к непосредственно контролируемым температурам. **Результат.** На основе анализа технологического процесса и конструктивных особенностей атмосферной колонны определены вектора управляющих и возмущающих воздействий, а также критерий оптимизации для задачи управления. Предложено ввести в модель прогнозного управления параметры качества нефтепродуктов, а также дополнить существующие контуры регулирования промежуточными параметрами для улучшения динамических характеристик объекта управления. **Вывод.** Проведенный анализ конструктивных особенностей атмосферной трубчатки и существующего подхода к управлению ректификационной колонной выявил недостатки, связанные с отсутствием оперативного контроля качества отбираемых нефтепродуктов, а также необходимость расширения перечня стабилизируемых технологических параметров с целью оптимизации технологического процесса. Показано, что для перехода на управление по модели требуется разработать статическую модель, отражающую зависимость потенциального выхода требуемых фракций от состава сырья, и динамическую модель в виде многопараметрической оптимизационной задачи.

Ключевые слова: нефтепереработка, управление по модели, статическая и динамическая модель, ректификация

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT SYNTHESISING THE MODEL OF THE PREDICTIVE MAINTENANCE OF ATMOSPHERIC PIPE STILL

E.S. Gebel, A.A. Ibatullin, M.S. Peshko, V.N. Gudinov
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Abstract. Objectives. The aim of the study is to develop a model of a predictive maintenance system allowing the output parameters of a high-capacity distillation unit to be stabilised. **Method.** The problem of controlling the collection of oil products of a given fractional composition can be reduced to the task of controlling the temperature regime at draw-off trays. In this case, temperature control tasks are considered as control actions. In order to implement the proposed control principle, a mathematical model was constructed allowing the oil fraction content to be converted to directly controlled temperatures. **Results.** Based on the analysis of the technological process and design features of the atmospheric distillation column, the vectors of maintaining and disturbing actions are determined along with the optimisation criterion for the maintenance problem. In order to improve the dynamic characteristics of the control object, oil product quality parameters are introduced into the predictive maintenance model along with the supplementation of existing control loops with intermediate parameters. **Conclusion.** An analysis of the structural features of the atmospheric pipe still and the existing approach to the distillation column maintenance reveals certain disadvantages associated with the lack of operational quality control of the collected oil products, as well as the need to expand the list of stabilised technological parameters in order to optimise the technological process. It is shown that in order to switch to the proposed maintenance approach, it is necessary to develop a static model reflecting the dependency of the potential yield of the required fractions on the raw material composition along with a dynamic model in the form of a multi-parameter optimisation problem.

Keywords: oil refining, model maintenance, static and dynamic model, rectification

Введение. Основная задача переработки нефти заключается в увеличении выхода светлых фракций (бензиновой, керосиновой и дизельной фракций с температурой кипения до 360°C), потенциальных выход которых на большинстве российских нефтеперерабатывающих предприятиях составляет 45-60% на нефть. При этом некоторые современные отечественные и большинство зарубежных производств обеспечивают глубину переработки нефти до 90% и более [1, 4, 16].

Для повышения показателя эффективности процесса нефтепереработки применяются деструктивные методы, например коксование, гидрокрекинг и другие, требующие значительных финансовых затрат и, как следствие, доступные только крупным организациям [2, 8]. Отличительными особенностями современной автоматизации является достижение предельных показателей, которые могут быть получены техническими средствами и классическими подходами к регулированию технологических параметров.

Постановка задачи. Для оптимизации технико-экономических показателей производства в свете общего насыщения рынка, усиления конкуренции, введения новых экологических норм и стандартов, а также общего удорожания стоимости производства необходим переход на современные методы усовершенствованного управления, позволяющие оптимизировать процесс за счет более широкого применения прогнозных многопараметрических динамических моделей систем управления с учетом показаний виртуальных анализаторов качества в реальном режиме времени [1, 3, 6, 14, 15].

Таким образом, наиболее перспективным с точки зрения увеличения глубины переработки нефти, достижения требуемого количества и качества выпускаемых нефтепродуктов является использование дополнительных программных надстроек, которые на основе статических и динамических моделей технологического процесса позволят стабилизировать параметры не

только на технологически допустимом уровне, но и в наиболее экономически эффективном состоянии равновесия.

Методы исследования. Анализ исходных данных задачи. Объектом управления в исследуемой системе управления процессом ректификации нефти является атмосферная трубчатка К1 с блоком электрообессоливания (рис. 1) производительностью порядка 5 млн. тонн в год, предназначенная для переработки смеси западносибирских нефтей по топливному варианту. В блоке атмосферной перегонки нефти происходит первичное фракционирование обессоленной нефти с получением бензиновой, керосиновой и дизельной фракций, выкипающих при температуре до 360°C.

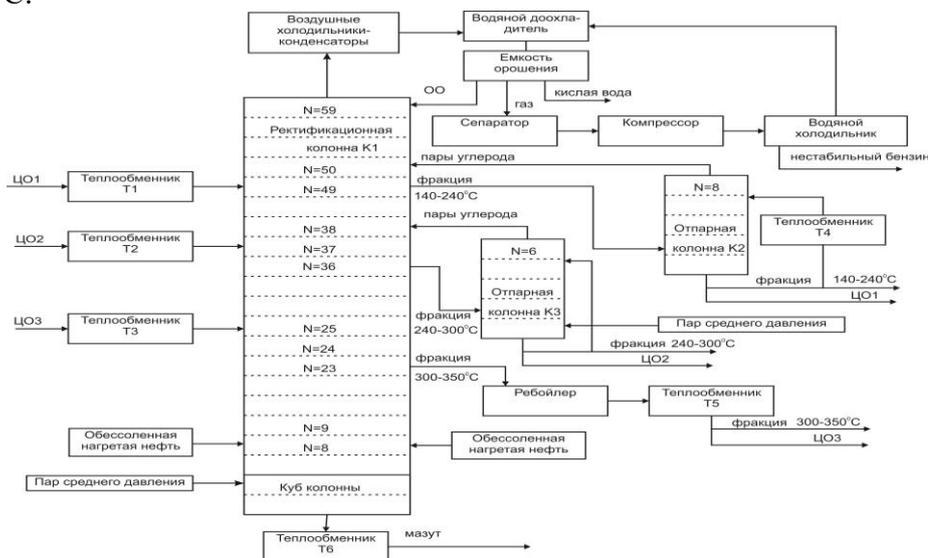


Рис.1. Схема потоков ректификационной установки
Fig. 1. Flow diagram of distillation plant

На установке перегонка нефти осуществляется по схеме с предварительным испарением, т.е. часть легких бензиновых фракций после нагрева обессоленной нефти в теплообменниках отделяется от нефти в предварительной емкости испарения, и, минуя печь, подается на разделение в сложную атмосферную колонну К1 вместе с частично отбензиненной нефтью. В результате получают следующие основные фракции:

- головной погон нестабильный бензин;
- боковой погон фракция 140-240 °С;
- боковой погон фракция 240-300 °С;
- боковой погон фракция 300-350 °С;
- нижний (кубовый) продукт – мазут.

Для снижения концентрации низкокипящих компонентов в мазуте, снижения парциального давления и повышения четкости ректификации в нижнюю часть ректификационной колонны К1 подается водяной пар среднего давления. В его присутствии углеводороды нефти испаряются при более низкой температуре. Боковые погоны ректификационной колонны (кроме фракции 300-350 °С) выводятся каждый в свою отпарную колонну (стриппинг-секцию) К2 и К3, где осуществляется дополнительное удаление части легких компонентов, что позволяет повысить четкость разделения погонов.

Стриппинг-секции (К2 и К3), используемые в технологическом процессе, выполняют функцию буферных емкостей, предназначены для более равномерного отбора боковых погонов при колебаниях режима атмосферной колонны К1.

В связи с тем, что отбор боковых погонов происходит в жидкой фазе, которая в процессе теплообмена поглощает тепло газового потока, в ректификационной колонне К1 нарушается тепловой баланс. Для его восстановления предусмотрены промежуточные циркуляционные орошения (ЦО1, ЦО2 и ЦО3) в зоне отборов боковых погонов. Имеется также острое орошение верха колонны. Циркуляционное орошение представляет собой поток флегмы, который отбира-

ется с одной из тарелок (№49, №36 и №23), охлаждается в теплообменных аппаратах, затем возвращается в колонну К1 на ту же или вышележащую тарелку.

Входные и выходные параметры объекта управления – ректификационной колонны К1, а также внешние возмущения и связь между ними, показаны на рис. 2.

Цель управления ректификационной установкой заключается в достижении максимального отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава в условиях переменного расхода и состава сырьевых потоков и теплоносителей (рис.1). В соответствии с ассортиментом выпускаемых на предприятии нефтепродуктов критерий оптимизации – отбор на нефть (или относительный отбор, выраженный в процентах) заданных фракций, запишем следующим образом:

$$\Phi = F_0 + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \rightarrow \max. \quad (1)$$

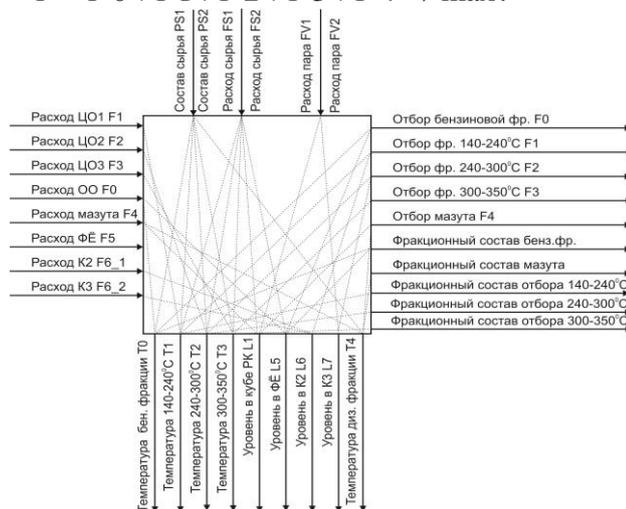


Рис. 2. Взаимосвязи параметров объекта управления

Fig. 2. The relationship of the parameters of the control object

Постановка задачи управления. В процессе эксплуатации ректификационных установок (рис. 1), содержащих помимо колонны К1 (в нашем случае тарельчатого типа), еще и большое количество дополнительного технологического оборудования, например воздушные холодильники концентраторы, рефлюксную емкость, отпарные колонны К2 и К3 и т.д., технологические параметры в силу постоянно действующих контролируемых возмущений по каналу питания, подачи тепло- и хладоносителя, а также других внешних случайных воздействий постоянно изменяются во времени.

Таким образом, процесс ректификации представляет собой сложный динамический объект управления с ярко выраженной распределенностью параметров по температуре, концентрации, составу, давлению, который постоянно находится в динамическом режиме работы [7, 10]. Внешние возмущения, такие как изменение температуры, давления, состава сырья, теплофизических характеристик теплоносителей, приводят к необходимости непрерывного изменения технологического режима работы ректификационной колонны, т.е. коррекции основных входных параметров, а именно расходов циркуляционных и острого орошения, отборов фракций, расходов сырья и пара.

Автоматическое регулирование процесса ректификации – одна из наиболее трудоемких задач, возникающих при автоматизации химических производств, что объясняется сложным характером технологического процесса, взаимной зависимостью основных регулируемых параметров, а также большой инерционностью и запаздыванием, присущим ректификационным колоннам, как объектам управления [2]. Наиболее ответственным с точки зрения выхода требуемого объема и качества продукта заданного фракционного состава является температурный профиль колонны, что отмечено во многих научных публикациях [5, 9, 12]. На практике установлено, что управляющие воздействия, направленные на стабилизацию температуры и давления наверху и внизу ректификационной колонны, обеспечивают заданную концентрацию компонентов, т.е. выход требуемых готовых продуктов.

Задача управления атмосферной установкой ректификации нефти формулируется следующим образом: найти оптимальные решения по управлению атмосферной трубчаткой, при которых достигается максимум отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава Φ (1) с учетом воздействия внешних возмущений V и заданных ограничений на фракционный состав Q :

$$L(T, V, Q, U^*) = \max_U \Phi, \quad (2)$$

где $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ – вектор температур на выходе атмосферной колонны; $V \{FS1, FS2, PS1, PS2\}$ – вектор возмущающих воздействий, $Q \{T_{нк}^1, T_{кк}^1, T_{нк}^2, T_{кк}^2, T_{нк}^3, T_{кк}^3\}$ – вектор фракционного состава содержит значения температур начала и конца кипения отбираемых фракций, $U \{F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_V\}$ – вектор управляющих воздействий, $U^* \{F_0^*, F_1^*, F_2^*, F_3^*, F_4^*, F_V^*\}$ – вектор решений по управлению. Обозначения приняты в соответствии с введенными на рис. 2.

Обсуждение результатов. Анализ существующих на производстве подходов к управлению атмосферной установкой ректификации нефти показал, что, несмотря на высокое качество получаемых нефтепродуктов, ректификационная колонна работает недостаточно эффективно, поскольку допустимый диапазон варьирования большинства технологических параметров согласно технологическому регламенту достаточно широк, а используемые модели не учитывают воздействие возмущений, взаимосвязанность и распределенность параметров.

На основании выявленных недостатков сделан вывод, что внедрение оперативного контроля качества нефтепродуктов (поскольку результаты лабораторного анализа, поступающие с большой задержкой, приводят к выпуску большого объема некачественной продукции), а также системы управления, обеспечивающей компенсацию возмущений и перекрестных связей является актуальным. Следует учитывать, что практическая реализация компенсаторов возмущений и компенсаторов перекрестных связей весьма затруднительна для объектов управления с большим числом параметров [13]. Для нелинейных объектов с распределенными параметрами, таких как ректификационная колонна, подобные системы управления обеспечивают необходимое качество регулирования только при малых возмущениях [13].

Таким образом, для достижения заданного критерия эффективности предлагается усовершенствовать существующую систему управления процессом ректификации нефти, внедрив модель прогнозного управления, содержащую: расчетные значения показателей качества нефтепродуктов, рассчитанных виртуальными анализаторами, с учетом особенностей рассматриваемой установки; промежуточные параметры в контурах регулирования для улучшения динамических характеристик; управляющие воздействия, определенные по модели процесса, учитывающей взаимосвязь технологических параметров.

Для достижения поставленной цели предлагается свести задачу управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом на отборных тарелках, в этом случае задания по температуре будут рассматриваться, как управляющие воздействия. Для реализации предлагаемого принципа управления необходимо построить математическую модель, позволяющую перейти от содержания фракций в нефти к непосредственно контролируемым температурам.

Вектор температур $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ отбираемых нефтяных фракций зависит от состава нефти PS , т.е. потенциального содержания фракций в нефти [5]. Таким образом, задачу управления ректификационной установкой с учетом предлагаемого принципа управления сформулируем следующим образом: определить оптимальные значения температур на отборных тарелках атмосферной колонны, при которых достигается максимум отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава с учетом воздействия внешних возмущений V :

$$L(T^*, V, Q, U) = \max_T \Phi, \quad (3)$$

и выполняются уравнения связи $\Phi = f(T(PS))$ и уравнение кривой истинных температур кипения нефти, отражающее ее физико-химические свойства.

Для решения поставленной задачи оптимизации необходимо разработать статическую модель $\Phi = f(T(PS))$, адекватность которой проверить по кривой истинных температур кипения нефти, построенной на основе данных лабораторных исследований.

Ректификационная установка распределенный, инерционный объект регулирования, подверженный значительным возмущениям [11, 17]. Для улучшения качества регулирования требуется совершенствование его информационной структуры системы управления. Общий подход к регулированию температурного режима ректификационной колонны заключается в изменении расхода и температуры циркуляционных орошений, острого орошения и подачи пара. Определим основные контуры регулирования технологических параметров исследуемой ректификационной установки.

Температура верхнего продукта (бензиновой фракции) колонны К1 после аппаратов воздушного охлаждения, которые оборудованы камерами рециркуляции, регулируется изменением частоты вращения двигателей и положением жалюзи воздухозаборников. Стабилизация уровня раздела фаз в флегмовой емкости осуществляется изменением расхода бензиновой фракции из емкости регулятором уровня.

Расход нестабильного бензина (острого орошения) подаваемого насосами в колонну К1 на тарелку №59 стабилизируется регулятором давления с корректировкой уставки по температуре верха основной колонны.

Для улучшения условий работы атмосферной колонны К1 и снятия избыточного тепла предусмотрены три циркуляционных орошения.

Часть фракции 140-240°C направляется для отпарки легких углеводородов в отпарную колонну К2, уровень в которой регулируется клапаном на питающем входе. Отпаренные легкие углеводороды с верха отпарной колонны К2 возвращаются в атмосферную колонну К1 на тарелку №50, предусмотрен контроль текущей температуры потока. Другая часть фракции 140-240°C с тарелки №49 поступает на прием насосов и в виде 1-го циркуляционного орошения подается в теплообменники и, охладившись, возвращается на 49-ю тарелку ректификационной колонны. Расход 1-го ЦО в атмосферную колонну К1 стабилизируется регулятором расхода по заданной температуре потока. Дополнительно контролируется температура на 49-й тарелке.

С тарелки отбора №36 атмосферной колонны К1 выводится фракция 240-300°C, текущее значение температуры потока контролируется. Часть фракции 240-300°C направляется для отпарки легких углеводородов в отпарную колонну К3, основные технологические параметры (давление и температура вверху колонны К3, а также температура в кубе) стабилизируются соответствующими регуляторами.

Отпаренные легкие углеводороды с верха отпарной колонны К3 возвращаются в атмосферную колонну К1 на тарелку №38. Другая часть фракции 240-300°C с тарелки №36, в виде 2-го циркуляционного орошения подается последовательно в ребойлер отпарной колонны К2, затем через теплообменники, где отдает тепло потокам обессоленной нефти и сырой нефти, и, охладившись, возвращается на 37-ю тарелку атмосферной колонны К1 в виде 2-го ЦО. Стабилизация температуры на 37-ой тарелке ректификационной колонны достигается регулированием расхода и температуры потока 2-го ЦО.

С тарелки №23 отбора колонны К1 выводится фракция 300-350°C, текущее значение температуры потока контролируется. Фракция 300-350°C подается последовательно в ребойлеры стабилизационной и фракционирующей колонн, далее в теплообменники для охлаждения. Затем 3-е циркуляционное орошение возвращается в колонну К1 на тарелку №25, значение уставки регулятора расхода 3-го ЦО зависит от температуры входного потока. Для отпарки легких фракций от мазута в нижнюю часть колонны К1 подается водяной пар среднего давления из пароперегревателя печи, технологические параметры (температура и давление) контролируются

ся, а расход регулируется. Уровень в кубе колонны К1 стабилизируется регулятором уровня, который корректирует уставку контура регулирования расхода мазута с установки.

Задача стабилизации температур на отборных тарелках заключается в поддержании температур $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ отбираемых фракций на заданных уровнях в случае нарушения режима работы из-за изменения расхода или состава сырья и теплоносителя. Регулирование осуществляется путем изменения расходов $U \{F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_V\}$. Применение компенсаторов возмущений и перекрестных связей для рассматриваемого объекта управления не обеспечит необходимое качество в силу ранее указанных причин. Таким образом, требуется разработать динамическую модель процесса ректификации и модели показателей качества нефтепродуктов, чтобы реализовать прогнозное управление рассматриваемой ректификационной установкой по модели.

Задачу управления в этом случае сформулируем следующим образом: определить вектор управляющих воздействий, при котором для заданных точек температурного профиля m среднеквадратичное отклонение текущих значений температур T_i отбираемых фракций от заданных значений T_i^3 достигнет минимального значения:

$$L(T^*, V, Q, U^*) = \min_{T, U} \left(\sum_{i=1}^m (T_i - T_i^3)^2 \right), \quad (4)$$

при выполнении связей в форме уравнений динамики ректификационного процесса и ограничений на допустимый диапазон варьирования температур фракций с учетом их наложения (пересечения).

Вывод. В работе рассмотрен один из наиболее сложных технологических процессов в нефтехимическом производстве, связанный с разложением нефти на заданные фракции.

Проведенный анализ конструктивных особенностей атмосферной трубчатки и существующего подхода к управлению ректификационной колонной выявил недостатки, связанные с отсутствием оперативного контроля качества отбираемых нефтепродуктов, а также необходимость расширения перечня стабилизируемых технологических параметров с целью оптимизации технологического процесса.

Показано, что для перехода на управление по модели требуется разработать статическую модель, отражающую зависимость потенциального выхода требуемых фракций от состава сырья, и динамическую модель в виде многопараметрической оптимизационной задачи.

Библиографический список:

1. Гебель Е.С. Система усовершенствованного управления газоразделительным аппаратом установки подготовки нефти / Е.С. Гебель, С.Д. Фарунцев // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 3.
2. Глаголева О.Ф. Технология переработки нефти. В 2-х частях. Часть 1. Первичная переработка нефти. – М. : Химия, КолосС, 2006. – 400 с.
3. Диго Г. Б. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации // Информатика и системы управления. – 2011. – №4.
4. Дозорцев, В. М. Усовершенствованное управление технологическим процессом (APC) : 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 1
5. Затонский А. В. Моделирование статического режима процесса ректификации с идентификацией состава и свойств нефти / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 6. – С. 109–116.
6. Елизаров В. И. Построение систем управления процессом ректификации / В. И. Елизаров, С. А. Мерзляков, Р. Р. Шавалеев // Вестник технологического университета, 2015. – т.18. – № 11. – С. 177 – 180.
7. Моделирование на ЭВМ объектов управления нефтепереработки и нефтехимии : учеб. пособие / М. Г. Ахмадеев / Уфа : Изд-во «УНИ», 1989 – 97 с.
8. Патышева, Б. А. Синтез системы управления процессом каталитического крекинга нефти с использованием прогнозирующей модели / Б.А. Патышева // Инженерный вестник Дона, 2013. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485)
9. Семенов А.Д. Идентификация объектов управления : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д.В. Артамонов, А.В. Брюхаев // - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003.- 211 с.

10. Софиева, Ю.Н. Применение пакета моделирующих программ ChemCAD в учебно-тренажерных комплексах для изучения систем автоматизации ректификационных установок / Ю.Н. Софиева, К.В. Абрамов // Инженерный вестник Дона, 2012. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619)
11. Тугашова Л. Г. Динамическая модель процесса ректификации нефти / Л.Г. Тугашова, Н. Н. Алаева // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство. Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. Ч. 2 (28 марта–1 апреля 2016 г.). – Альметьевск: АГНИ, 2016. – С. 21–24.
12. Тугашова Л.Г. Управление процессом ректификации нефти с применением моделей процесса и виртуальных анализаторов / Л.Г. Тугашова, А.А. Гончаров // Нефть и газ, 2018. – № 1. – С. 124 – 132.
13. Чадеев, В. М. Идентификация технологических объектов и системы управления с идентификатором // Автоматизация в промышленности, 2019. №6.
14. Bemporad A. Robust model predictive control: survey / A. Bemporad (etc.) // Robustness in Identification and Control, Volume of Lecture Notes in Control and Information Science. Springer-Verlag. 1999. pp. 207.
15. Marquez-Ruiz A. Model Learning Predictive Control for Batch Process: A Reactive Batch Distillation Column Case Study // A. Marquez-Ruiz, M. Loonen, B. Bahadir Saltik, and L. Ozkan // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2019. URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b06474>.
16. Gonsales, D.D. Dynamic Simulation and Control: Application to Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil Refinery // D.D. Gonsales, F.S. Martins, S. Feye de Azevedo / 20th European Symp. on Computer Aided Engineering (ESCAPE 20). 2010. 6p.
17. Werlea, L.O. Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column / L.O. Werlea, C. Marangonia, J.G. Telekena, C. Sayera, R.F. Machado // 10th International Symposium on Process System Engineering. 2009. 6p.

References:

1. Gebel' Ye.S. Sistema usovershenstvovannogo upravleniya gazorazdelitel'nym apparatom ustanovki podgotovki nefiti / Ye.S. Gebel', S.D. Faruntsev // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. – 2019. – № 3. [Gebel E.S. Advanced process control system of the oil-gas separator in the crude oil treatment plant / E.S. Gebel, S.D. Faruntsev // Automation in industry. 2019. No. 3. (In Russ)]
2. Glagoleva O.F. Tekhnologiya pererabotki nefiti. V 2-kh chastyakh. Chast' 1. Pervichnaya pererabotka nefiti. – M. : Khimiya, KolosS, 2006. – 400 s. [Glagoleva O.F. Oil refining technology. Intwo parts. Part 1. Primary oil refining. - M.: Chemistry, KolosS, 2006 . 400 p. (In Russ)]
3. Digo G. B. Issledovaniye modeley virtual'nykh analizatorov massoobmennogo tekhnologicheskogo pro-tsessa rektifikatsii // Informatika i sistemy upravleniya. 2011. №4. [Digo G.B. Study of models of virtual analyzers of the mass-exchange technological process of rectification // Informatics and Control Systems. 2011. No. 4. (In Russ)]
4. Dozortsev, V. M. Usovershenstvovannoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom (ARS) : 10 let v Rossii // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2013. № 1 [Dozortsev V. M. Advanced process control (APC): 10 years in Russia // Automation in industry. 2013. No.1(In Russ)]
5. Zaton'skiy A. V. Modelirovaniye staticheskogo rezhima protsessa rektifikatsii s identifikatsiyey sosta-va i svoystv nefiti / A.V. Zaton'skiy, L.G. Tugashova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. – 2015. – № 6. – С. 109–116. [Zaton'skiy A. V. Modeling of the static mode of the rectification process with identification of the composition and properties of oil / A.V. Zaton'skiy, L.G. Tugashova // Proceedings of higher educational institutions. Oil and gas. 2015. No. 6. pp. 109–116. (In Russ)]
6. Yelizarov V. I. Postroyeniye sistem upravleniya protsessom rektifikatsii / V. I. Yelizarov, S. A. Merz-lyakov, R. R. Shavaleyev // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2015. t.18. № 11. S. 177 – 180. [Elizarov V. I. Design of rectification process control systems/ V. I. Elizarov, S. A. Merzlyakov, R. R. Shavaleyev // Bulletin of the Technological University, 2015. vol. 18. No. 11. pp. 177 – 180. (In Russ)]
7. Modelirovaniye na EVM ob"yektov upravleniya neftepererabotki i neftekhimii : ucheb. posobiye / M. G. Akhmadeyev / Ufa : Izd-vo «UNI», 1989 – 97 s. [Simulation of oil refining and petrochemical process: textbook / M. G. Akhmadeev / Ufa: Publishing House "UNI", 1989. 97 p. (In Russ)]
8. Patysheva, B. A. Sintez sistemy upravleniya protsessom kataliticheskogo krekinga nefiti s ispol'zovaniyem prognoziryushchey modeli / B.A. Patysheva // Inzhenernyy vestnik Dona, 2013. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485) [Pashaeva B. A. Synthesis of oil catalytic cracking control system using predictive model / B. A. Pashaeva // Engineering Bulletin of Don, 2013. No. 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485) (In Russ)]
9. Semenov A.D. Identifikatsiya ob"yektov upravleniya : ucheb. posobiye .A. D. Semenov, D.V. Artamonov, A.V. Bryukhayev // Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003. 211 s. [Semenov A.D. Identification of control system: textbook/ A. D. Semenov, D.V. Artamonov, A.V. Bryukhaev. Penza: Publishing House Penz. SU, 2003. 211 p. (In Russ)]
10. Sofiyeva, YU.N. Primeneniye paketa modeliruyushchikh programm ChemCAD v uchebno-trenazhernykh kompleksakh dlya izucheniya sistem avtomatizatsii rektifikatsionnykh ustanovok / YU.N. Sofiyeva, K.V. Abramov // Inzhenernyy Vestnik Dona, 2012. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619) [Sofieva Yu.N. Application of the ChemCAD modeling software in the training complex to study the automatic control system of distillation process / Yu.N. Sofieva, K.V. Abramov // Engineering Journal of Don, 2012. № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619) (In Russ)]

11. Tugashova, L. G. Dinamicheskaya model' protsessa rektifikatsii nefiti / L.G. Tugashova, N. N. Alayeva // Neftegazovyy kompleks: obrazovaniye, nauka i proizvodstvo. Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. CH. 2 (28 marta–1 aprelya 2016 g.). – Al'met'yevsk: AGNI, 2016. – S. 21–24. [Tugashova L.G. Dynamic model of oil rectification process / L. G. Tugashova, N.N. Alayeva // Proceedings of “Oil and gas complex: education, science and production” conf. Part 2 (March 28 – April 1, 2016). Almet'yevsk: ASOI, 2016. pp. 21-24. (In Russ)]

12. Tugashova, L.G. Upravleniye protsessom rektifikatsii nefiti s primeneniye modeley protsessu i virtu-al'nykh analizatorov / L.G. Tugashova, A.A. Goncharov // Neft' i gaz, 2018. – № 1. – S. 124 – 132. [Tugashova L.G. Control of the oil rectification process using process models and soft sensors / L.G. Tugashova, A.A. Goncharov // Oil and gas, 2018. No.1. pp. 124 – 132. (In Russ)]

13. Chadeyev, V. M. Identifikatsiya tekhnologicheskikh ob'yektov i sistemy upravleniya s identifikatorom // Avtomatizatsiya v promyshlennosti, 2019. – №6. [Chadeev V. M. Identification of technological objects and a control system with an identifier // Automation in Industry, 2019. No. 6. (In Russ)]

14. Bemporad, A. Robust model predictive control: survey / A. Bemporad (etc.) // Robustness in Identification and Control, Volume of Lecture Notes in Control and Information Science. Springer-Verlag. 1999. p. 207.

15. Marquez-Ruiz A. Model Learning Predictive Control for Batch Process: A Reactive Batch Distillation Column Case Study // A. Marquez-Ruiz, M. Loonen, B. Bahadir Saltik, and L. Ozkan // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b06474>.

16. Gonsales, D.D. Dynamic Simulation and Control: Application to Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil Refinery // D.D. Gonsales, F.S. Martins, S. Fayo de Azevedo / 20th European Symp. on Computer Aided Engineering (ESCAPE 20). 2010. 6p.

17. Werlea, L.O. Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column / L.O. Werlea, C. Marangonia, J.G. Telekena, C. Sayera, R.F. Machado // 10th International Symposium on Process System Engineering. 2009. 6p.

Сведения об авторах:

Гебель Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация и робототехника»; e-mail: gebel_es@mail.ru

Ибатуллин Альберт Амирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: ibatullin77@yandex.ru

Пешко Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: nechaet@mail.ru

Гудинов Владимир Николаевич, старший преподаватель, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: gudinov@mail.ru

Information about the authors:

Elena S. Gebel, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Automation and Robotics; e-mail: gebel_es@mail.ru ORCID: 0000-0003-1811-8755

Albert A. Ibatullin, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Automation and Robotics; e-mail: ibatullin77@yandex.ru ORCID: 0000-0002-8910-6412

Michael S. Peshko, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Automation and Robotics; e-mail: nechaet@mail.ru ORCID: 0000-0003-0121-4388

Vladimir N. Gudinov, Senior Lecturer, Department of Automation and Robotics; e-mail: gudinov@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.09.2019.

Принята в печать 21.10. 2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.09.2019.

Accepted for publication 21.10.2019.

Для цитирования: Кадиев И.П., Кадиев П.А., Кудиев Б.Р. Рассеивание элементов «пакетов ошибок» в информационных массивах методом индексной структуризации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 84-90. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-84-90

For citation: I.P. Kadiev, P.A. Kadiev, B.R. Kudaev. Interleaving burst error elements in information arrays using the method of index structurisation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4): 84-90. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-84-90

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.5

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-84-90

РАССЕИВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ «ПАКЕТОВ ОШИБОК» В ИНФОРМАЦИОННЫХ МАССИВАХ МЕТОДОМ ИНДЕКСНОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ

Кадиев И.П., Кадиев П.А., Кудиев Б.Р.

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

Резюме. Цель. «Пакеты ошибок», представляющие собой группы случайно или намеренно искаженных или «стертых» символов в блоках информационных массивах, являются причиной нарушения целостности их содержимого. Использование специальных кодов, обнаруживающих и исправляющих такие ошибки, существенно снижают скорость передачи информации из-за необходимости введения избыточности в виде большого числа контрольных символов. **Метод.** Предварительные перестановки элементов информационных массивов с их «рассеивания» - разнесением по различным блокам в массиве, являются одними из методов борьбы с «пакетами ошибок». Эти процедуры обуславливают, после устранения результатов перестановок элементов, «разнесение» искаженных элементов, возникших при передаче или хранении информационного массива, в различные блоки массива, вызывая в них одиночные или малой кратности ошибки. **Результат.** Предлагается, для решения задач этого класса, использовать новый метод перестановок элементов их совокупности конечных множеств, в основе которых индексная структуризация формируемых конфигураций, интерпретируя эти совокупности с информационными массивами той же конфигурации, для перестановок - «рассеивание» - «перемешивание» их элементов по методу формирования конфигураций с индексной структуризацией их расположения. **Вывод.** Предложены три метода «рассеивания» элементов исходных информационных массивов: по строкам, столбцам и комбинированное – по строкам и столбцам. Использование предложенных методов «рассеивания» позволяет, путем предварительного преобразования информационных массивов перестановками элементов по заданным алгоритмам, задачу борьбы с их искажениями под воздействием «пакетов ошибок», которые приводят к уничтожению отдельных групп символов, свести к решению более простой задачи борьбы с ошибками малой кратности.

Ключевые слова: массивы множеств, «пакеты ошибок», перестановки элементов, «рассеивание» элементов, «индексное представительство»

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

INTERLEAVING BURST ERROR ELEMENTS IN INFORMATION ARRAYS USING THE METHOD OF INDEX STRUCTURISATION

Kadiev I.P., Kadiev P.A., Kudaev B.R.

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

Abstract. Objectives. “Burst errors” representing groups of accidentally or intentionally distorted or “erased” characters in blocks of information arrays violate the integrity of their content. However, the use of special codes for detecting and correcting such errors significantly reduces the speed of information transfer due to the need to introduce redundancy in the form of a large number of control characters. Therefore, this study sets out to develop a method for correcting burst errors. **Method.** A possible approach for correcting burst errors consists in interleaving preliminary permutations of information array elements between different array blocks. After eliminating the results of element permutations, these procedures cause the interleaving of distorted elements occurring during the transfer or storage of the information array between its various blocks, causing single or minor fold errors. **Result.** For solving problems of this class, a new method of permuting elements of an $n \times n$ -set of finite sets is proposed based on the index structuring of the formed configurations. These sets are interpreted as information arrays of the same configuration, and the permutation – interleaving – of their elements is carried out according to the method of configuration formed by the index structuring of their location. **Conclusion.** Three methods for interleaving elements of the original information in arrays are proposed: between rows, between columns and combined – between rows and columns. The proposed interleaving methods based on the preliminary conversion of information arrays by permuting elements according to given algorithms allow their distortions under the influence of burst errors to be corrected. Thus, the task of combating the burst errors leading to the destruction of individual groups of characters can be reduced to solving a simpler problem of minor fold error correction.

Keywords: information arrays, burst errors, element permutations, element interleaving, index representation

Введение. Проблема обеспечения информационной безопасности, в условиях сосредоточения основных ее объемов в телекоммуникационных сетях, относится к категории актуальных. Одной из задач решения этой проблемы является обеспечение целостности информации и ее достоверности.

Перечень факторов, нарушающих целостность информации, достаточно обширен. Это и факторы несовершенства методов и средств, реализующих информационные процессы в системах, влияние окружающей среды. Эти факторы вызывают ошибки, которые в двоичных каналах проявляются в виде трансформаций символов и исследуются в рамках теории помехоустойчивости информационных процессов.

Для последних десятилетий характерны нарушения целостности информации, которые обусловлены преднамеренными действиями пользователями информационных сетей. Эти действия направлены на уничтожение данных и их модификацию злоумышленниками. Они приводят к искажениям данных, проявляющимся в виде «стирания» блоков символов в информационных массивах при передаче информации на расстояние по каналам связи и изменением их содержания. Так, среди вопросов обеспечения достоверности данных в информационных массивах возникла задача борьбы с ошибками большой кратности, которые приводят к стиранию группы символов данных, образующих блоки, которые принято называть блоками или «пакетами ошибок» [1].

Для решения этих задач используются такие известные методы борьбы с ошибками как корректирующие коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки большой кратности, к которым относятся коды Рида-Соломона, Файера и др. Их недостаток - большая избыточностью,

обусловленная вводом в блоки данных дополнительных контрольных символов, число которых часто превышает число символов, несущих информацию [2]. Это существенно снижает скорость передачи информации по каналу, увеличивает время передачи, снижая оперативность, и объем памяти, необходимой для хранения. С другой стороны, это усложняет процессы обеспечения достоверности: для кодов характерны достаточно сложные алгоритмы обнаружения и исправления ошибок [3].

Этими обстоятельствами обусловлено появление проблемы борьбы с ошибками большой кратности или борьба с «пакетами ошибок».

Одним из направлений решения проблем в рамках борьбы с «пакетами ошибок» является использование для этих целей предварительное «рассеивание» или «перемешивание» элементов информационных массивов до передачи по каналам или хранения [4-8]. Часто процессы преобразования объединены общим названием «скремблирование» информационных потоков.

Предварительное общее «рассеивание» элементов массива может быть использовано для «рассеивания» элементов «пакета ошибок» после обратного преобразования. Существует достаточно много методов «рассеивания» элементов информационных массивов, широко используемых для шифрования при защите информации от несанкционированного доступа [9-14]. В их основе - формирование комбинаторных конфигураций из элементов информационных массивов с использованием операций перестановок или подстановок. В качестве примера можно указать перестановки, используемые для сортировки данных, перестановки по схеме распределения чисел в магических квадратах, по схеме хода шахматного коня или другим геометрическим фигурам.

Из отмеченного выше следует, что появление нового метода «рассеивание» может быть обусловлено появлением новых методов перестановок элементов информационных массивов.

Постановка задачи. Исходя из отмеченного выше, предлагается для борьбы с «пакетами ошибок» выполнить «рассеивание» элементов информационного массива, с целью их разнесения на определенное расстояние друг от друга, чтобы в «пакеты ошибок» не попадали одновременно несколько стоящих рядом элементов массива. Это предварительное «рассеивание» элементов массива, должно обеспечить формирование комбинаторных конфигураций, строки и столбцы которых образованы элементами, принадлежащими различным строкам и столбцам исходного информационного массива.

Это обстоятельство приведет при появлении «пакета ошибок» к уничтожению элементов массива, принадлежащих различным блокам массива. При восстановлении структуры массива, искаженные элементы окажутся в различных его блоках, ошибки в блоках будут носить малую кратность, Ошибки «пакета» будут «рассеяны» по всему массиву. Задача борьбы с «пакетами ошибок» будет сведена к борьбе с ошибками малой кратности в отдельных блоках массива.

Методы исследования. Как было отмечено выше существует различные методы «рассеивания» элементов. Для предварительного «рассеивания» элементов с целью рассеивания элементов «пакета ошибок» в работе используется предложенный авторами метод индексного упорядочения расположения элементов в формируемых из элементов исходных информационных массивах комбинаторных конфигурациях [15]. В качестве правила «рассеивания» элементов информационных массивов предлагаются перестановки их элементов, с формированием комбинаторных конфигураций с индексно упорядоченным их расположением использованы функциональные рекуррентные соотношения [16] между индексами элементов.

В основе соотношений - система индексации в виде функциональных зависимостей между значениями индексов элементов и значениями индексов элементов их «окружения». Отличительная особенность формируемых конфигураций «индексное представительство» множеств, образующих информационный массив: значения индексов элементов в строках, столбцах или и в строках, и в столбцах [15,16] принимают значения от 1 до n , в различных вариантах их расположения, общее число которых равно $n!$. Эта особенность отвечает требованиям к

процессу «рассеивания» ошибок в «пакетах» после восстановления предварительного «рассеянного массива».

Обсуждение результатов. Индексное упорядочение имеет в своей основе системы индексации. Они определяют правила «рассеивания» с индексным упорядочением расположения элементов. Так как расположение элементов множества определяет её структуру, то «рассеивание» является процессом индексной структуризации конфигураций.

Системы индексации, как отмечено в [16], задаются правилами, которые представляют собой функциональные зависимости значений индексов элементов «окружения», расположенных непосредственно вокруг каждого из элементов, от значения индексов элемента, который они окружают. Предложенные в [16] функциональные зависимости, в виде системы рекуррентных соотношений на множестве пар индексов элементов, обеспечивают индексацию окружения, при соответствующих ограничениях, которая может быть определена как индексация по принципу «индексного представительства»: в каждой строке и каждом столбце формируемой конфигурации имеется «представитель» из каждой строки и каждого столбца исходного информационного массива.

«Пакеты ошибок» в виде «стирания» любой строки или любого столбца в такой конфигурации, приводит, после обратного «сбора» рассеянных элементов, к одиночным ошибкам в каждой строке или каждом столбце исходного информационного массива. Т.е. «пакет ошибок», вызвавший искажение в виде «стирания» целой строки или столбца, после обратного преобразования, «рассеивается» в виде одиночных ошибок во всех строках или столбцах восстановленного информационного массива.

Ниже приведен пример, иллюстрирующий процессы предварительного «рассеивания» с последующим восстановлением структуры информационного массива $A_{5 \times 5}$, воздействия на процесс передачи, вызвавшего в принятом из канала массиве «пакет ошибок» их 4-х символов, результат после восстановления исходной структуры массив из которого видно «рассеивание» ошибок в пакете по отдельным блокам. Исходный информационный массив $A_{5 \times 5}$, приведен на рис.1.

$$\begin{array}{c}
 A_{11}A_{12}A_{13}A_{14}A_{15} \\
 A_{21}A_{22}A_{23}A_{24}A_{25} \\
 A_{5 \times 5} = A_{31}A_{32}A_{33}A_{34}A_{35} \\
 A_{41}A_{42}A_{43}A_{44}A_{45} \\
 A_{51}A_{52}A_{53}A_{54}A_{55}
 \end{array}$$

Рис.1 Исходный информационный массив
Fig. 1 Source information array

Для предварительного «рассеивания» элементов массива $A_{5 \times 5}$ использована система индексации с функциональными зависимостями значений индексов элемента и значений индексов элементов его окружения (1), приведенные ниже

$$\begin{array}{l}
 f_{11}(i) = i - 1, \quad f_{12}(j) = j - 2; \quad f_{21}(i) = i + 1, \quad f_{22}(j) = j + 2; \\
 f_{31}(i) = i - 2, \quad f_{32}(j) = j - 1; \quad f_{41}(i) = i + 2, \quad f_{42}(j) = j + 1
 \end{array} \quad (1)$$

Структура систем индексации окружения произвольного элемента массива, A_{ij} при предварительном «рассеивании» приведена на рис. 2

$$\begin{aligned} & \dots, A_{i-2, j-1} \dots \\ & \dots, A_{i-1, j-2}, A_{i, j}, A_{i+1, j+2}, \dots \\ & \dots, A_{i+2, j+1}, \dots \end{aligned}$$

Рис.2. Структура окружения элемента $A_{i,j}$, в системе индексации
Fig. 2. The environment structure of the element $A_{i, j}$, in the indexing system

о системе индексного упорядочения окружения элементов (1), приведена на рис. 3.

$$A_{5 \times 5} * = \begin{matrix} A_{11}A_{23}A_{35}A_{42}A_{54} \\ A_{32}A_{44}A_{51}A_{13}A_{25} \\ A_{53}A_{15}A_{22}A_{34}A_{41} \\ A_{24}A_{31}A_{43}A_{55}A_{12} \\ A_{45}A_{52}A_{14}A_{21}A_{33} \end{matrix}$$

Рис.3. Индексно структурированный массив $A_{5 \times 5}$

Fig. 3. An indexed structured $A_{5 \times 5}$ array

Приведенный на рис. 1 информационный массив $A_{5 \times 5}$, после предварительной индексной структуризации «рассеиванием» по приведенной на рис. 2 схеме индексации и преобразованный в массив $A_{5 \times 5}$, при построчной передаче по каналу имеет вид:

$$A_{11}A_{23}A_{35}A_{42}A_{54} A_{32}A_{44}A_{51}A_{13}A_{25} A_{53}A_{15}A_{22}A_{34}A_{41} A_{24}A_{31}A_{43}A_{55}A_{12} A_{45}A_{52} A_{14}A_{21}A_{33}$$

Если в результате некоторого воздействия на процесс передачи образовался «пакет ошибок» во втором блоке, в результате которого оказались «стертыми» символы $A_{44}A_{51}A_{13}A_{25}$, то на приемной стороне канала будет образована последовательность символов вида: $A_{11}A_{23}A_{35}A_{42}A_{54} A_{32} x x x x A_{53}A_{15}A_{22}A_{34}A_{41} A_{24}A_{31}A_{43}A_{55}A_{12} A_{45}A_{52} A_{14}A_{21}A_{33}$

Сформированный по принятым данным информационный массив с «пакетом ошибок», будет иметь вид, приведенный на рис.4.

$$A_{5 \times 5}^{**} = \begin{matrix} A_{11}A_{23}A_{35}A_{42}A_{54} \\ A_{32} x x x x \\ A_{53}A_{15}A_{22}A_{34}A_{41} \\ A_{24}A_{31}A_{43}A_{55}A_{12} \\ A_{45}A_{52}A_{14}A_{21}A_{33} \end{matrix}$$

Рис.4. Принятый по каналу информационный массив с «пакетом ошибок»

Fig. 4. Information array received over the channel with an “error package”

После устранения результатов предварительного «рассеивания» массива, будет сформирована конфигурация, приведенная на рис.5. Рис. 5 полученного массива иллюстрирует «рассеивание элементов «пакета ошибок» по строкам и столбцам полученного массива.

Ошибка кратности 4 в одном из блоков массива будет «рассеяна в виде одиночных ошибок в 4- блоках. Угроза потери целого блока данных массива будет сведена к задаче обнаружения и исправления одиночных ошибок в 4-х блоках этого массива, Её решение может оказаться более целесообразным, чем устранение пакета ошибок».

$$A_{5 \times 5} = \begin{matrix} A_{11} & A_{12} & x & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & x \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & x & A_{45} \\ x & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{matrix}$$

Рис.5. Информационный массив с рассеянным «пакетом ошибок»

Fig. 5. Information array with a scattered "error package"

Вывод. Предлагаемый метод «рассеивания» элементов «пакета ошибок», имеет в основе сведение задачи борьбы с «пакетом ошибок» в одном блоке массива к борьбе с ошибками малой кратности в нескольких блоках. Метод предполагает предварительное «рассеивание» элементов массива, в результате которого элементы массива будут разнесены по различным его блокам. Искажение всего блока в таком массиве будет соответствовать искажениям отдельных символов в каждом блоке после устранения результатов предварительного рассеивания элементов массива. Областью применения метода являются каналы передачи информации и внешние запоминающие устройства, в которых высока вероятность возникновения «пакетов ошибок». Особо важно их применение при передаче по каналам связи и передачи данных с ретрансляцией.

В качестве достоинства предлагаемого метода борьбы с «пакетами ошибок» можно отметить простоту алгоритмов и программной реализации. Кроме того, следует иметь ввиду обстоятельство, что в качестве «побочного эффекта» методом обеспечивается мягкое шифрование информационного массива «рассеиванием» элементов.

Библиографический список:

1. Кларк Дж., Кейн Дж. мл., Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: «Радио и связь», 1987г. 390с.
2. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации. Л.: Энегтоатомиздат, 1990. 435с.
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд.ИЛ. 1963. 843с.
4. Виленкин Н.Я. Комбинаторика. М.: «Наука», 1969г., 328с.
5. Тараканов В.Е., Айгнер М.А. Комбинаторная теория. М.: Мир, 1982, 362с.
6. Холл М. Комбинаторика. /Перевод с английского С.А. Широкова под ред. А.О. Гельфанда и Тараканова В.Е.- М.: Мир, 1970г., С.10-50.
7. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика М.: Мир, 1990г.
8. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ. М.: изд. МГУ, 1994г.
9. [http://www. google/ru](http://www.google.ru). Алгоритмы индексной сортировки массивов данных
10. Леонтьев В.К. Избранные задачи комбинаторного анализа.- М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, С. 20-30.
11. Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ. Учебник / В. Н. Волкова, А. А. Денисов Теория систем и системный анализ. М.: Юрайт, 2015. 615с.
12. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991.
13. Рыбников К. А. Комбинаторный анализ. Очерки истории. — М.: Изд. мехмата МГУ, 1996. — 124 с.
14. Андерсен Дж.А. Дискретная математика и комбинаторика: /пер. с англ.- М.: Вильямс, 2003.
15. Кадиев И.П. Об одном классе комбинаторных конфигураций. / Кадиев И.П. , Кадиев П.А. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т.31. 2013. с.45-50.
16. Кадиев И.П., Мелехин В.Б. Система индексной структуризации комбинаторных конфигураций методом рекуррентных соотношений для защиты передаваемых по каналам связи данных. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 2, 2019г. С.37-43.

References:

1. Klark Dzh., Keyn Dzh. ml., Kodirovaniye s ispravleniyem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi.- М.: «Radio i svyaz», 1987g. -390s [Clark, J., Kane, J. Jr., Error-correcting coding in digital communication systems .- М.: “Radio and Communication”, 1987. 390 p. (In Russ)]

2. Mutter V.M. Osnovy pomekhoustoychivoy teleperedachi informatsii.-L.: Enegoatomizdat,1990.- 435s. 3 [Mutter V.M. Fundamentals of noise-resistant television information transmission.-L. : Enegoatomizdat, 1990. 435p. (In Russ)]
3. Shannon K. Raboty po teorii informatsii i kibernetike. - M.: Izd.IL. 1963.- 843s [Shannon K. Works on information theory and cybernetics. M. : Izd. IL. 1963. 843p. (In Russ)]
4. Vilenkin N.YA. Kombinatorika. - M.: «Nauka»,1969g.,328s [Vilenkin N.Ya. Combinatorics. - M.: “Science”, 1969, 328p. (In Russ)]
5. Tarakanov V.Ye., Aigner M.A. Kombinatornaya teoriya. M.: Mir,1982, 362s. [Tarakanov V.E., Aigner M.A. Combinatorial Theory. M.: Mir, 1982, 362p. (In Russ)]
6. Khol M. Kombinatorika. /Perevod s angliyskogo S.A. Shirokova pod red. A.O. Gel'fanda i Tarakanova V.Ye.- M.: Mir,1970. s.10-50 [Hall M. Combinatorics. / Translation from English S.A. Shirokova, ed. A.O. Gelfand and Tarakanova V.E. M. : Mir, 1970, pp.10-50. (In Russ)]
7. Stenli R. Perechislitel'naya kombinatorika - M.: Mir, 1990g. [Stanley R. Enumeration combinatorics - M. : Mir, 1990. (In Russ)]
8. Rybnikov K.A. Vvedeniye v kombinatornyy analiz.- M.: izd. MGU, 1994g. [Rybnikov K.A. Introduction to combinatorial analysis.- M. : ed. Moscow State University, 1994. (In Russ)]
9. [http://www. google.ru](http://www.google.ru). Algoritmy indeksnoy sortirovki massivov dannykh 1 [[http:// www. google / ru](http://www.google.ru). Algorithms for indexing data arrays (In Russ)]
10. Leont'yev V.K. Izbrannyye zadachi kombinatornogo analiza.- M.: izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2001. s. 20-30. [Leontyev V.K. Selected tasks of combinatorial analysis. - M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2001. pp. 20-30. (In Russ)]
11. Volkova V.N. Teoriya sistem i sistemnyy analiz. Uchebnik / V. N. Volkova, A. A. Denisov Teoriya sistem i sistemnyy analiz. – M.: Yurayt, 2015.-615s. [Volkova V.N. Theory of systems and systems analysis. Textbook / V.N. Volkova, A.A. Denisov Theory of systems and system analysis. M. : Yurayt, 2015. 615p. (In Russ)]
12. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991.
13. Rybnikov K. A. Kombinatornyy analiz. Ocherki istorii. — M.: Izd. mekhmata MGU, 1996. — 124 s.[Rybnikov K. A. Combinatorial analysis. Essays on the story. - M.: Publishing. Mehmat Moscow State University, 1996 . 124 p. (In Russ)]
14. Andersen Dzh.A. Diskretnaya matematika i kombinatorika: /per. s angl.- M.: Vil'yams, 2003. [Andersen J.A. Discrete mathematics and combinatorics: / Per. from English.- M.: Williams, 2003. (In Russ)]
15. Kadiyev I.P. Ob odnom klasse kombinatornykh konfiguratsiy. / Kadiyev I.P. , Kadiyev P.A. Vestnik Dag. Gos. Tekh.. Un-ta, T.31. 2013.- s.45-50 [Kadiev I.P. On a class of combinatorial configurations. / Kadiev I.P. , Kadiev P.A. Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. T.31. 2013.p. 45-50. (In Russ)]
16. Kadiyev I.P., Melekhin V.B. Sistema indeksnoy strukturizatsii kombinatornykh konfiguratsiy me-todom rekurrentnykh sootnosheniy dlya zashchity peredavayemykh po kanalam svyazi dannykh. zh. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. № 2 ,2019g.- s.37-43[Kadiev I.P., Melekhin V.B. An index structuring system for combinatorial configurations using the method of recurrence relations to protect data transmitted through communication channels. g. Devices and systems. Management, control, diagnostics. No. 2, 2019 pp. 37-43.

Сведения об авторах:

Кадиев Исламудин Пашаевич, соискатель кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Кадиев Пашай Абдулгамидович, кандидат технических наук, профессор кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Кудаев Буниямин Русланович, магистрант, кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: kudaev@mail.ru

Information about the authors:

Islamudin P. Kadiev, Applicant, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Pashay A. Kadiev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Buniyamin R.Kudaev, Graduate Student, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: kudaev@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2019.

Принята в печать 19.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10. 2019.

Accepted for publication 19.11.2019.

Для цитирования: Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами в зависимости от числа Прандтля для различных геометрических и режимных параметров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 91-101 DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101

For citation: I.E. Lobanov. Modeling heat exchange depending on the prandtl number for various geometric and regime parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 91-101. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБАХ С ПОЛУКРУГЛЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ПРАНДТЛЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Лобанов И.Е.

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет),

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Цель работы состоит в исследовании и доказательстве зависимости от числа Прандтля распределения интегрального теплообмена при турбулентном конвективном теплообмене в трубе с последовательностью периодических выступов полукруглой геометрии на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менстера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках. **Метод.** Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менстера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ). **Результат.** Расчёты показали, что с увеличением числа Прандтля при малых числах Рейнольдса сначала имеет место заметное увеличение относительного теплообмена, а потом относительный теплообмен изменяется меньше, причём для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение. При больших числах Рейнольдса происходит снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при дальнейшей его стабилизации. Проведён анализ полученных расчётных зависимостей относительного теплообмена от числа Прандтля Pr при различных значениях относительной высоты турбулизатора h/D , относительного шага между турбулизаторами t/D , при различных значениях числа Рейнольдса Re , при прочих равных условиях, который показал качественные и количественные изменения рассчитываемых параметров. **Вывод.** При малых числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше, а при больших — меньше, высоты пристенного слоя, следовательно, имеет место турбулизация только ядра потока, что приводит только к увеличению гидросопротивления и к неувеличению теплообмена. На основании ограниченного расчётного материала было теоретически подтверждено осязаемое снижение уровня интенсификации теплообмена для малых чисел Прандтля. Полученные результаты интенсифицированного теплообмена в области низких чисел Прандтля обосновывают перспективную разработку исследований в данном направлении. Полученные в работе теоретические данные детерминировали закономерности относительного теплообмена в широком диапазоне чисел Прандтля, в том числе в тех областях, где ещё не существует экспериментального материала.

Ключевые слова: моделирование; численный; канал; труба; конвективный; модель Менстера; турбулизатор; теплообмен; гидравлическое сопротивление; число Прандтля

MODELING HEAT EXCHANGE DEPENDING ON THE PRANDTL NUMBER FOR VARIOUS GEOMETRIC AND REGIME PARAMETERS

I.E. Lobanov

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
125993, Moscow, A-80, GSP-3, Volokolamskoe Shosse, 4, Russia*

Abstract. Objectives. The aim is to study the dependency of the distribution of integral heat transfer during turbulent convective heat transfer in a pipe with a sequence of periodic protrusions of semicircular geometry on the Prandtl number using the calculation method based on a numerical solution of the system of Reynolds equations closed using the Menter's shear stress transport model and the energy equation on different-sized intersecting structured grids. **Method.** A calculation was carried out on the basis of a theoretical method based on the solution of the Reynolds equations by factored finite-volume method closed with the help of the Menter shear stress transport model, as well as the energy equation on different-scaled intersecting structured grids (fast composite mesh method (FCOM)). **Results.** The calculations performed in the work showed that with an increase in the Prandtl number at small Reynolds numbers, there is an initial noticeable increase in the relative heat transfer. With additional increase in the Prandtl number, the relative heat transfer changes less: for small steps, it increases; for median steps it is almost stabilised, while for large steps it declines insignificantly. At large Reynolds numbers, the relative heat transfer decreases with an increase in the Prandtl number followed by its further stabilisation. **Conclusion.** The study analyses the calculated dependencies of the relative heat transfer on the Prandtl number for various values of the relative h/D height of the turbulator, the relative t/D pitch between the turbulators and for various values of the Re Reynolds number. Qualitative and quantitative changes in calculated parameters are described all other things being equal. The analytical substantiation of the obtained calculation laws is that the height of the turbuliser is less for small Reynolds numbers, while for large Reynolds numbers, it is less than the height of the wall layer. Consequently, only the core of the flow is turbulised, which results in an increase in hydroresistance and a decrease in heat transfer. In the work on the basis of limited calculation material, a tangible decrease in the level of heat transfer intensification for small Prandtl numbers is theoretically confirmed. The obtained results of intensified heat transfer in the region of low Prandtl numbers substantiate the promising development of research in this direction. The theoretical data obtained in the work have determined the laws of relative heat transfer across a wide range of Prandtl numbers, including in those areas where experimental material does not currently exist.

Keywords: modelling, numerical, channel, pipe, convective, Menter's model, turbuliser, heat exchange, hydraulic resistance, Prandtl number

Введение. Нанесение периодических выступов на стенки омываемых поверхностей является хорошо апробированным на практике способом вихревой интенсификации теплообмена [1, 7, 8, 26]. Интенсификация теплообмена для условий течения теплоносителей в трубах с турбулизаторами проводились и проводятся в основном экспериментальными методами [7, 8, 26], а теоретические исследования довольно немногочисленны, многие из них основаны на интегральных подходах [2, 11, 14, 18, 19].

Постановка задачи. На современном этапе исследований задачи аэромеханики и теплофизики отрывных и вихревых течений всё активнее решаются методами многоблочных вычислительных технологий, базирующихся на пересекающихся структурированных сетках [22-25, 28]. Настоящее исследование является логическим продолжением вышеуказанных вычислительных методов [1, 3-6, 9-13, 15-17] для анализа турбулентного течения и теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами потока (диафрагмами) с различными относительными

высотами, шагами для различных режимов течения теплоносителя с целью более подробного анализа интенсификации теплообмена для теплоносителей с различными числами Прандтля. Ранее данный аспект исследовался недостаточно полно.

Методы исследования. Математическая и дискретная модели. В данной работе с помощью полностью неявных конечно-разностных схем на центрированной неравномерной косоугольной сетке решается система уравнений Рейнольдса и энергии, записанных в естественных переменных.

Для расчёта поля давления используется процедура SIMPLEC; имеет место принцип расщепления по физическим процессам. Аппроксимация конвективных слагаемых производится с помощью квадратичной противопоточной схемы. Разностные уравнения решаются с помощью высокоэффективного метода неполной матричной факторизации при ускоренной сходимости с применением метода аддитивной коррекции. Многоблочный алгоритм решения задачи на пересекающихся разномасштабных сетках, апробированный при решении задач вихревой динамики и теплообмена [22], применяется для корректного описания турбулентного теплообмена. С помощью зональной низкорейнольдсовой модели Менгера [28] реализовано описание турбулентного переноса. В исследовании рассматривались каналы постоянного цилиндрического сечения с расположенными на стенках восемью турбулизаторами в форме периодических диафрагм полукруглого поперечного сечения.

Параметры изменялись в следующих диапазонах: $d/D=0,95\div 0,92$; $t/D=0,25\div 1$, где t — шаг размещения турбулизаторов; d — диаметр диафрагмы; D — диаметр трубы; $Re=10^4\div 10^5$ — число Рейнольдса; $Pr=1\div 20$ — число Прандтля (для ограниченного расчётов — $Pr=1\div 0,05$).

Кратким образом расчётная модель может быть охарактеризована следующим образом. Исследуемая трёхмерная расчётная область имеет несколько секций, каждая из которых состоит из одного выступа (рис. 1).

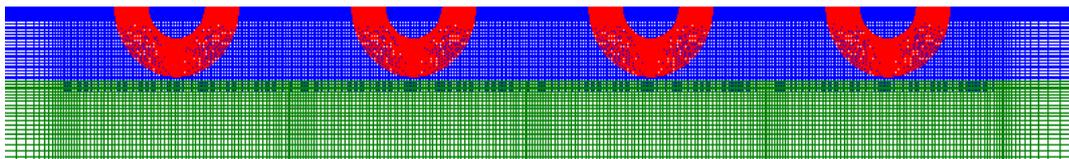


Рис. 1. Сетка трубы, состоящая из нескольких секций с расположенным посередине полукруглым турбулизатором, входного и выходного гладкого участков
Fig. 1. A pipe grid consisting of several sections with a semicircular turbulator located in the middle, inlet and outlet smooth sections

При расчёте предполагается, что при рассматриваемом числе турбулизаторов турбулентное течение становится установившимся.

В основной части исследования расчёт теплообмена проводился при граничном условии на стенке первого рода с последовательным изменением числа Прандтля с 1 до 20 в целях установления закономерности изменения интенсификации теплообмена для различных теплоносителей. На предварительном этапе исследования проводится модификация многопрофильного вычислительного комплекса численного моделирования пространственных отрывных течений и вихревого теплообмена с целью адаптации и уточнения математической модели течения и вихревого теплообмена в каналах с турбулизаторами в предположении возникновения пространственных вихревых структур, ответственных за вихревую интенсификацию теплообменных процессов, в пристеночных зонах труб с турбулизаторами.

В целях решения задачи интенсифицированного теплообмена расчётная трёхмерная сетка строилась одинаковым образом: конструировалась двумерная сетка в осевой и радиальной координатах, разворачиваемая по окружной координате с постоянным шагом. В целях достижения необходимого разрешения в окрестности препятствия использовались двумерные сетки в виде многоярусных структурированных сеток, а препятствие описывалось на наиболее подробной сетке с наибольшим пространственным разрешением. Подробная сетка встраивалась в бо-

лее грубую сетку, с помощью которой описывалось течение в ближнем следе препятствия, а переход от пристеночной области к оси также осуществлялся с использованием промежуточных сеток, назначение которых — увеличение продольного шага сетки в районе препятствия и изменение разрешения по окружной координате. В дальнейшем не будем останавливаться на подробностях непосредственно модельных аспектов численных расчётов по данной методике, поскольку они были рассмотрены в [3,4, 6, 8, 9, 11, 15, 20, 22-24, 28].

Данные для исходных расчётов. Во входном сечении рассматриваемого участка трубы рассматривался равномерный поток с тонким допускающим варьирование пограничным слоем; параметры турбулентности соответствуют экспериментальным испытаниям в трубе, полагая масштаб турбулентности порядка диаметра трубы, который выбран в качестве характеристического размера, а степень турбулентности принимается равной полутора процентам.

В выходном сечении рассматриваемого участка трубы задаются «мягкие» граничные условия, иначе называемые условиями продолжения решения, для которых характерно экстраполирование параметров вне области расчёта. На омываемых теплоносителем стенках трубы, считающихся при граничных условиях первого рода изотермическими и имеющих большую или меньшую на определённое число градусов по отношению к температуре набегающего потока температуру, имеют место условия прилипания.

Для выбранной геометрии канала каждая отдельная задача из нескольких секций решается два этапа: сначала решается динамическая задача, после чего для предварительного расчётных полей составляющих скорости потока и характеристик турбулентности решается тепловая задача для различных чисел Прандтля.

Критерии сходимости для динамической задачи детерминируются ограничением погрешностей расчёта декартовых составляющих скорости, а для тепловой задачи — ограничением величины приращения тепловых потоков на стенках; в рамках данной работы за относительную погрешность была принята величина 0,0001.

Определение влияния числа прандтля на теплообмен в прямых круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока полукруглого поперечного сечения при различных геометрических и режимных параметрах. Коэффициент сопротивления ξ и осреднённое число Нуссельта Nu для трубы с полукруглыми турбулизаторами при турбулентном конвективном теплообмене в данной работе детерминировались расчётным методом на основе численного решения системы уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках.

Адекватность применённого метода обоснована тем, что ранее для сравнения в [3-5, 9-11, 13, 15, 16] были использованы аналогичные экспериментальные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению для труб с полукруглыми турбулизаторами или диафрагмами, где имела место хорошая корреляция теории и эксперимента.

Выявленная в предыдущих теоретических работах автора (например, в [3-5, 9-11, 13, 15, 16]) адекватность существующим экспериментальным данным реализованной расчётной модели для локальных и осреднённых характеристик течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами обуславливает её применение в целях выявления закономерности интегральных (осреднённых) параметров теплообмена в трубах с различными числами Прандтля в зависимости от геометрии канала и режима течения теплоносителя.

В данном исследовании рассматриваются только самые распространённые турбулизаторы полукруглого поперечного сечения, характерные для труб с диафрагмами. Данный вопрос представляется важным, поскольку необходимо знать, для каких чисел Прандтля имеет место более высокая интенсификация теплообмена в зависимости от определяющих параметров.

Расчёт интенсифицированного теплообмена по данному факторизованному контрольно-объёмному методу проводился для наиболее характерных геометрических и режимных характеристик для труб с турбулизаторами ($d/D=0,92; 0,90; t/D=0,25; 0,50; 1,00; Re=10^4; 10^5$) [7, 8, 26] для довольно широкого диапазона чисел Прандтля $Pr=1 \div 20$.

В качестве иллюстрации полученных данным методом расчётных данных на рис. 2-4 приведены характерные расчётные линии тока для труб с поперечными кольцевыми турбулизаторами полукруглого поперечного сечения для рассматриваемых условий течения для закрытых (рис. 2), полуоткрытых (рис. 3) и открытых (рис. 4) впадин (классификация по [11-19]) соответственно.

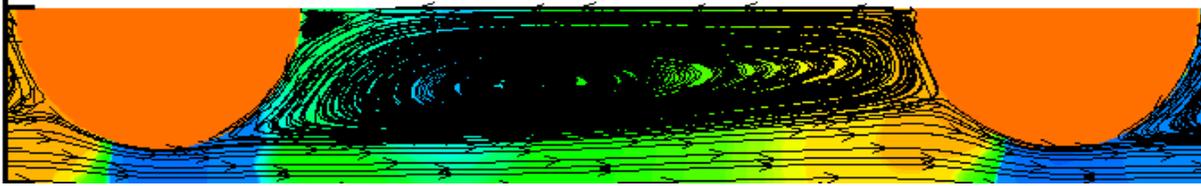


Рис. 2. Расчётные линии тока для закрытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при $Re=10^5$; $d/D=0,92$; $t/D=0,25$

Fig. 2. The calculated streamlines for a closed cavity in a pipe with turbulators with a semicircular cross section at $Re = 105$; $d / D = 0.92$; $t / D = 0.25$

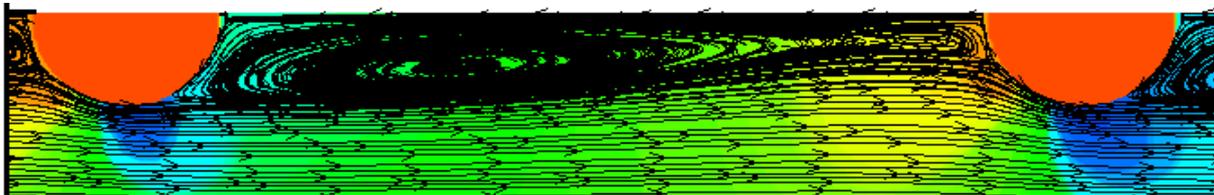


Рис. 3. Расчётные линии тока для полуоткрытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при $Re=10^4$; $d/D=0,95$; $t/D=0,25$

Fig. 3. The calculated streamlines for a half-open cavity in the pipe with turbulators with a semicircular cross section at $Re = 104$; $d / D = 0.95$; $t / D = 0.25$

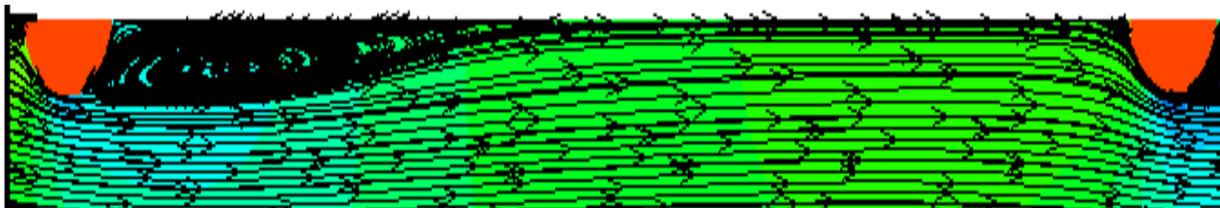


Рис. 4. Расчётные линии тока для открытой впадины в трубе с турбулизаторами с полукруглым поперечным сечением при $Re=10^4$; $d/D=0,92$; $t/D=1,00$

Fig. 4. The calculated streamlines for the open cavity in the pipe with turbulators with a semicircular cross section at $Re = 104$; $d / D = 0.92$; $t / D = 1.00$

Значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ для различных чисел Прандтля при прочих равных условиях рассчитывались для изотермического течения при эквивалентных параметрах как для труб с турбулизаторами, так и без них. Полученные результаты расчёта по предложенной модели для вышеуказанного диапазона определяющих параметров приведены на рис. 5-7, где они распределены по малым ($t/D=0,25$), средним ($t/D=0,50$) и большим ($t/D=1,00$) шагам между турбулизаторами.

Как видно из рис. 5-7, при относительно небольших числах Рейнольдса ($Re=10^4$) сначала имеет место ошутимое увеличение относительного теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ с увеличением числа Прандтля, затем относительный теплообмен изменяется слабее: для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение.

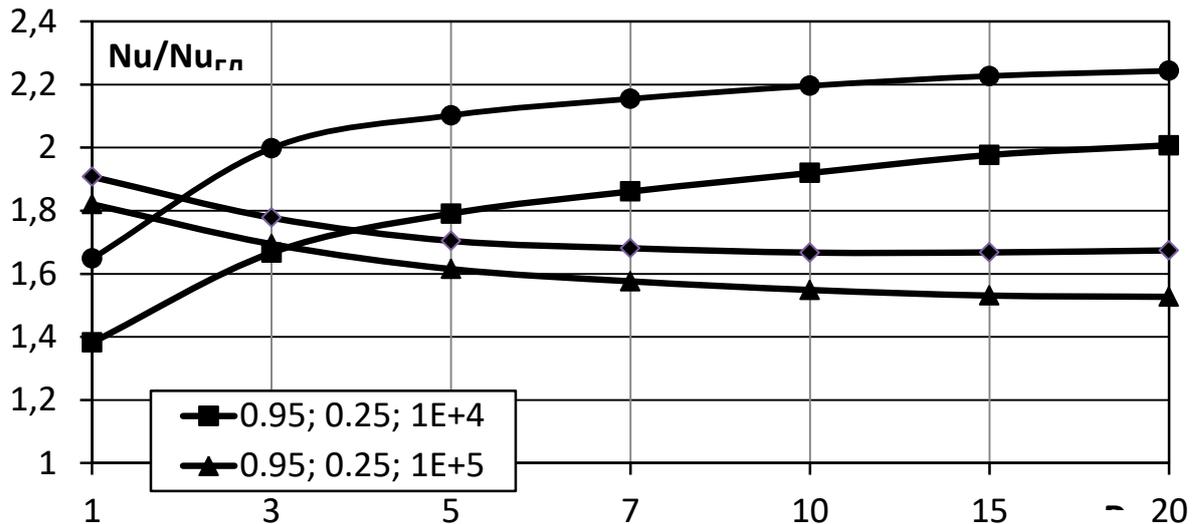


Рис. 5. Расчётные значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ для $t/D=0,25$; $d/D=0,92$ и $0,90$; $Re=10^4$ и 10^5 в зависимости от числа Прандтля $Pr=1 \div 20$

Fig. 5. The calculated values of the relative heat transfer $Nu / Nu_{ГЛ}$ for $t / D = 0.25$; $d / D = 0.92$ and 0.90 ; $Re = 10^4$ and 10^5 depending on the Prandtl number $Pr = 1 \div 20$

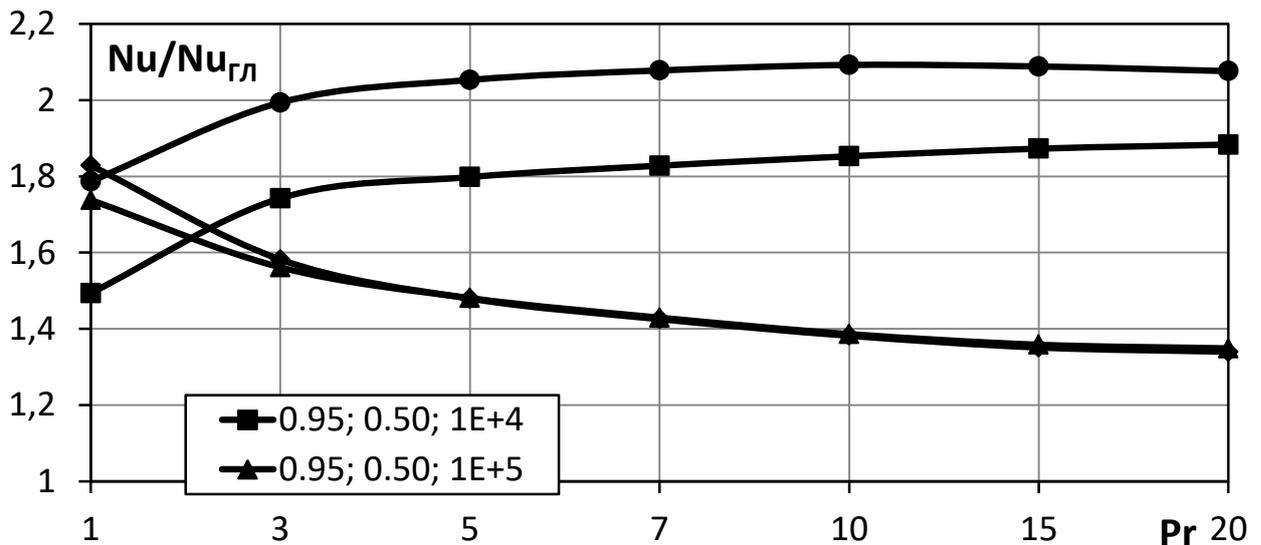


Рис. 6. Расчётные значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ для $t/D=0,50$; $d/D=0,92$ и $0,90$; $Re=10^4$ и 10^5 в зависимости от числа Прандтля $Pr=1 \div 20$

Fig. 6. The calculated values of the relative heat transfer $Nu / Nu_{ГЛ}$ for $t / D = 0.50$; $d / D = 0.92$ and 0.90 ; $Re = 10^4$ and 10^5 depending on the Prandtl number $Pr = 1 \div 20$

При относительно больших числах Рейнольдса ($Re=10^5$) имеет место снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при практической его стабилизации для наибольших значений из рассматриваемого диапазона чисел Прандтля.

Различие в закономерностях изменения относительного теплообмена в зависимости от числа Прандтля (рис. 5-7) обосновывается тем, что при небольших числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше высоты пристенного слоя [7, 8, 20, 21, 26], а при больших числах Рейнольдса - меньше. Последнее обуславливает турбулизацию только ядра потока, увеличивая только гидравлическое сопротивление, почти не увеличивая теплообмен. Экспериментальное подтверждение приведённых теоретических данных было приведено в работах [7, 8, 20, 21, 26], где анализируются собственно эксперименты авторов, эксперименты [27], а также закономерности для предельного теплообмена [7, 8, 20, 21, 26].

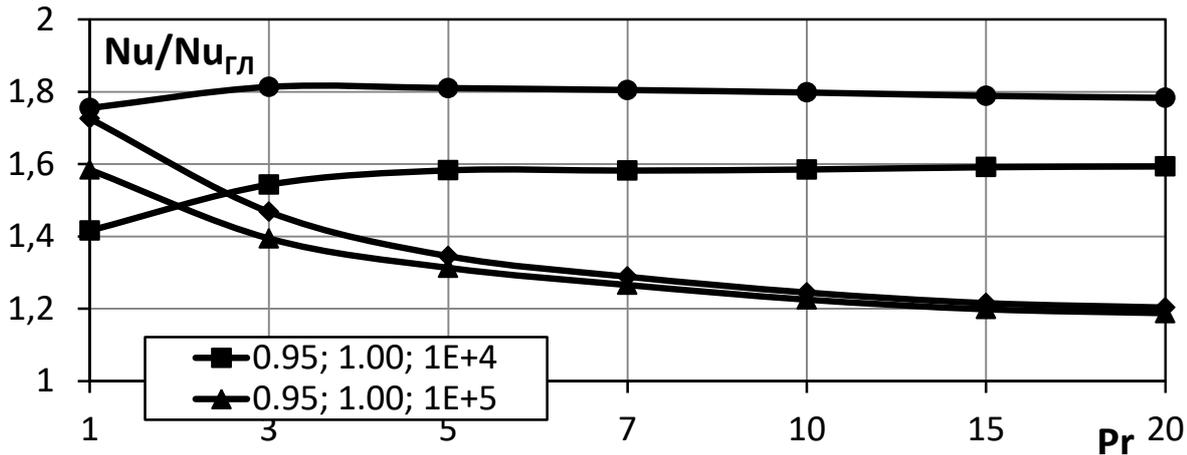


Рис. 7. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu_{GL} для $t/D=1,00$; $d/D=0,92$ и $0,90$; $Re=10^4$ и 10^5 в зависимости от числа Прандтля $Pr=1 \div 20$.

Fig. 7. The calculated values of the relative heat transfer Nu / Nu_{GL} for $t / D = 1.00$; $d / D = 0.92$ and 0.90 ; $Re = 10^4$ and 10^5 depending on the Prandtl number $Pr = 1 \div 20$.

Ещё одним подтверждением полученных расчётных численных зависимостей являются данные аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [2, 11, 18, 19].

Обсуждение результатов. В рамках данной работы были проведены расчёты для условий, сходных с характерными для вышеупомянутых экспериментов [27] ($d/D=0,912$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$; $Pr=1,15 \div 6,7$) [7, 8, 26], которые представлены на рис. 8 (расчётные линии тока представлены на рис. 9), из которого видно, что теоретический характер изменения относительного теплообмена от числа Прандтля полностью сходен с экспериментом [7, 8, 26].

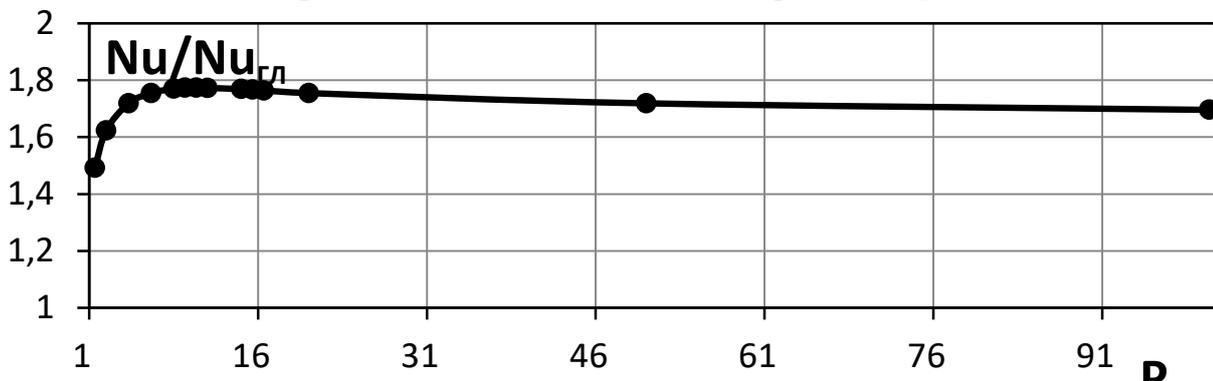


Рис. 8. Расчётные значения относительного теплообмена Nu/Nu_{GL} для $d/D=0,912$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$ в зависимости от числа Прандтля $Pr=1 \div 100$

Fig. 8. The calculated values of the relative heat transfer Nu / Nu_{GL} for $d / D = 0.912$; $t / D = 0.50$; $Re = 10^4$ depending on the Prandtl number $Pr = 1 \div 100$

В классических работах по интенсифицированному теплообмену [7, 8, 26] указывается, что надёжных экспериментальных данных не имеется, но предполагается, что искусственная турбулизация жидкометаллических потоков должна иметь низкую эффективность [7, 8, 26]. В рамках данной работы было проведено моделирование интенсифицированного теплообмена при течении жидких металлов в только в ограниченном диапазоне, поскольку данный аспект не является главным для данной работы, которое показало, что относительный теплообмен для условий вышеупомянутых экспериментов [27] снижается на 12% для $Pr=0,5$ по отношению к относительному теплообмену для $Pr=1$; аналогичные снижения для $Pr=0,1$ и $Pr=0,05$ составляют 37% и 40% соответственно. Следовательно, теоретически подтверждено, что интенсифицированный теплообмен для жидких металлов ниже, чем для газообразных теплоносителей. Вышесказанное подтверждается и данными аналитических решений для интенсифицированного теплообмена, полученных по модифицированной четырёхслойной модели турбулентного по-

граничного слоя [2, 11, 18, 19].

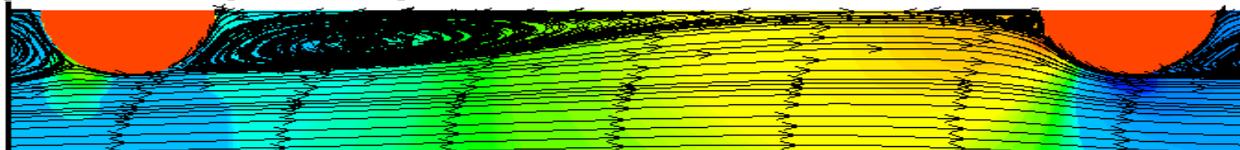


Рис. 9. Расчётные линии тока для течения в трубе с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения при $Re=10^4$; $d/D=0,912$; $t/D=0,50$

Fig. 9. The calculated streamlines for flow in a pipe with turbulators of a semicircular cross-section at $Re = 104$; $d / D = 0.912$; $t / D = 0.50$

Полученные в работе для ограниченного диапазона определяющих параметров теоретические расчётные данные о снижении уровня интенсификации теплообмена для малых числах Прандтля обуславливают перспективность данного научного направления — в дальнейшем по данной модели можно будет рассчитать относительный теплообмен в трубах с диафрагмами для жидких металлов для широкого диапазона геометрии канала и режима течения теплоносителя.

Вышепредставленный анализ указывает на то, что теоретические данные полностью соответствуют существующему экспериментальному материалу, значительно перекрывая диапазон определяющих параметров последнего. Теоретические данные позволили выявить закономерности относительного теплообмена в зависимости от числа Прандтля в тех областях, где ещё нет надёжных экспериментальных данных.

Вывод. 1. Разработанный и используемый в данном исследовании метод расчёта, основанный на решении конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью моделью переноса сдвиговых напряжений Менгера и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках позволил с приемлемой точностью провести расчёты относительного теплообмена в трубах с полукруглыми кольцевыми турбулизаторами для теплоносителей с различным числами Прандтля.

2. В исследовании был проведён анализ полученных расчётных зависимостей относительного теплообмена от числа Прандтля P_r при различных значениях относительной высоты турбулизатора h/D , относительного шага между турбулизаторами t/D , при различных значениях числа Рейнольдса Re , при прочих равных условиях, который показал качественные и количественные изменения рассчитываемых параметров.

3. Проведённые в работе расчёты показали, что с увеличением числа Прандтля при малых числах Рейнольдса сначала имеет место заметное увеличение относительного теплообмена, а потом относительный теплообмен изменяется меньше, причём для малых шагов имеет место его увеличение, для средних — почти стабилизация, для больших — незначительное снижение.

4. При больших числах Рейнольдса происходит снижение относительного теплообмена с увеличением числа Прандтля при дальнейшей его стабилизации.

5. Аналитическое обоснование полученных расчётных закономерностей заключается в том, что при малых числах Рейнольдса высота турбулизатора меньше, а при больших — больше, высоты пристенного слоя, следовательно, имеет место турбулизация только ядра потока, что приводит только к увеличению гидросопротивления и к неувеличению теплообмена.

6. В работе на основании ограниченного расчётного материала было теоретически подтверждено ощутимое снижение уровня интенсификации теплообмена для малых чисел Прандтля. Полученные результаты интенсифицированного теплообмена в области низких чисел Прандтля обосновывают перспективную разработку исследований в данном направлении.

7. Полученные в работе теоретические данные детерминировали закономерности относительного теплообмена в широком диапазоне чисел Прандтля, в том числе в тех областях, где ещё не существует экспериментального материала.

Библиографический список:

1. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А.Исаев, И.Е.Лобанов, О.А.Бояркина и др. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный

теплообмен. М.: МЭИ, 2010. С. 84-87.

2. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 5460.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223-230.
4. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. 2004. Т. 11. № 2. С. 28-35.
5. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академиком РАН А.И.Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 57-60.
6. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А.Исаев, П.А.Баранов, И.Е.Лобанов и др. // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 66.
7. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
8. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
9. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2008. Т. 1. С. 101-103.
10. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 12. С. 4-15.
11. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М., 2005. 632 с.
12. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 12. С. 9-15.
13. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 7. С. 45-58.
14. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей с переменными физическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 144-147.
15. Лобанов И.Е. Структура вихревых зон между периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Электронный научный журнал "Исследования технических наук". 2012. Май. Выпуск 4. Том 2. С. 18-24.
16. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование кинетической энергии турбулентных пульсаций и её составляющих в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 1. С. 23-30.
17. Лобанов И.Е., Антюхов И.В. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах с помощью периодически поверхностно расположенных турбулизаторов потока прямоугольного поперечного сечения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3-2(299). С. 22-27.
18. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: Издательство МАИ, 2011. — 160 с.
19. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: МГАКХиС, 2010. — 288 с.
20. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
21. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
22. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В.Ермишина и С.А.Исаева. М.—СПб, 2001. 360 с.
23. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации тепломассообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании её потоком несжимаемой вязкой жидкости с учётом влияния асимметрии формы, естественной конвекции и нестационарных процессов / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, А.Е.Усачов и др. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 121—124.
24. Численные методы исследования течений вязкой жидкости, А.Д.Госмен, В.М. Пан, А.К.Ранчел и др. М.: Мир, 1986. 234 с.
25. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев и др. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
26. Эффективные поверхности теплообмена. Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
27. Hustrup R.C., Sabersky R.H., Bartz D.F., Noel M.B. // Jet Propulsion. 1958. Vol. 28. № 4. P. 259-263.
28. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. № 8. P. 1598.

References:

1. Vkhrevaya intensifikatsiya konvektivnogo teploobmena pri turbulentnom techenii vozdukha i masla v trubakh i kanalakh s periodicheskimi elementami diskretnoy sherokhovatosti / S.A.Isayev, I.Ye.Lobanov, O.A.Boyarkina i dr. // Trudy Pyatoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. Tom 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionny i slozhny teploobmen. M.: MEI, 2010. S. 84-87. [Vortex intensification of convective heat exchange in turbulent flow of air and oil in pipes and channels with periodic elements of discrete roughness / S.A.Isaev, I.E.Lobanov, O.A.Boyarkina et al. // Proceedings of the Fifth Russian national confer-

- ence on heat exchange. In 8 volumes. Volume 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat exchange. Moscow: MEI, 2010. pp. 84–87. (In Russ)]
2. Dreytser G.A., Lobanov I.Ye. Modelirovaniye izotermicheskogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh v usloviyakh intensifikatsii teploobmena // *Teploenergetika*. 2003. № 1. S. 5460. [Dreytser G.A., Lobanov I.E. Modeling of isothermal heat exchange at turbulent current in channels in conditions intensification of heat transfer // *Heat Power engineering*. 2003. No. 1. pp. 54–60. (In Russ)]
 3. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi raspolozhennymi poverkhnostnymi turbulizatorami potoka // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2005. T. 43. № 2. S. 223-230. [Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically arranged surface vortex generators flow // *Thermophysics of high temperatures*. 2005. V. 43. No. 2. pp. 223–230. (In Russ)]
 4. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // *Vestnik MAI*. 2004. T. 11. № 2. S. 28-35. [Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // *Bulletin of the MAI*. 2004. V. 11. No. 2. pp. 28–35. (In Russ)]
 5. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // *Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XIV Shkoly-seminara molodykh uchonykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I.Leont'yeva*. M.: MEI, 2003. T. 1. S. 57-60. [Dreytser G. A., Isayev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic projections // *Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: Proceedings of the XIV school-seminar of young scientists and specialists under the leadership of academician A. I. Leontiev*. Moscow: MEI, 2003. V. 1. pp. 57–60. (In Russ)]
 6. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob'yomnymi i poverkhnostnymi vikhregeneratorami dlya neodnorodnykh tep-lonositeley / S.A.Isayev, P.A.Baranov, I.Ye.Lobanov i dr. // *Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh: Chetvortaya mezhdunarodnaya konferentsiya: tezisy dokladov*. – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2011. S. 66. [Intensification of heat exchange in pipes with volumetric and surface vortex generators for inhomogeneous heat carriers / S.A.Isayev, P.A. Baranov, I.E. Lobanov et al. // *Heat and mass Transfer and hydrodynamics in swirling flows: Fourth international conference: Abstracts*. – Moscow: Publishing house MEI, 2011. pp. 66. (In Russ)]
 7. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 220 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Jarcho S.A. Intensification of heat exchange in channels. Moscow: Mashinostroyeniye, 1972. 220 p. (In Russ)]
 8. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 208 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Jarcho S.A. Intensification of heat exchange in channels. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. 208 p. (In Russ)]
 9. Kalinin E.K., Lobanov I.Ye. Problemy issledovaniya teploobmennyykh protsessov pri techeniyakh odnofaznykh sred na etape uspehnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya // *Tezisy dokladov i soobshcheniy VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu*. Minsk, 2008. T. 1. S. 101-103. [Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problems of research of heat exchange processes at flows of single-phase environments at a stage of successful development of numerical modeling // *Abstracts of reports and messages of VI Minsk international forum on heat and mass transfer*. Minsk, 2008. V. 1. pp. 101–103. (In Russ)]
 10. Lobanov I.Ye., Kalinin E.K. Teoreticheskoye issledovaniye, sopostavleniye s eksperimentom liniy toka i sostavlyayushchikh kineticheskoy energii turbulentnykh pul'satsiy v vikhrevykh strukturakh v trubakh s turbulizatorami // *Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk*. 2011. № 12. S. 4-15. [Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical research, comparison with experiment of current lines and components of kinetic energy of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators // *Branch aspects of technical Sciences*. 2011. No. 12. pp. 4–15. (In Russ)]
 11. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchonyy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. M., 2005. 632 s. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels: Thesis for the degree of doctor of technical Sciences. M., 2005. 632 p. (In Russ)]
 12. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki razvitiya vikhrevykh struktur v trubakh s turbulizatorami // *Moskovskoye nauchnoye obozreniye*. 2013. № 12. S. 9-15. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of dynamics of development of vortex structures in pipes with turbulators. Moscow scientific review. 2013. No. 12. pp. 9–15. (In Russ)]
 13. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi tur-bulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2012. T. 24. № 7. S. 45-58. [Lobanov I.E. Modeling of the structure of vortex zones between periodic surface-located turbulators of rectangular cross-section flow. Mathematical modeling. 2012. V. 24. No. 7. pp. 45–58. (In Russ)]
 14. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye teploobmena i soprotivleniya pri turbulentnom techenii v kanalakh teplonositeley s peremennymi fizicheskimi svoystvami v usloviyakh intensifikatsii teploobmena // *Trudy Tret'yey Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu*. V 8 tomakh. T.6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teplo-obmen. M.: Izd-vo MEI, 2002. S. 144-147. [Lobanov I.E. Modeling of heat transfer and resistance under turbulent flow in heat transfer media channels with variable physical properties under conditions of heat exchange intensification. Proceedings of the Third Russian national conference on heat exchange. In 8 volumes. Volume. 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat exchange. Moscow: MEI Publishing house, 2002. pp. 144–147. (In Russ)]
 15. Lobanov I.Ye. Struktura vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Issledovaniya tekhnicheskikh nauk"*. 2012. May. Vypusk 4. Tom 2. S. 18-24. [Lobanov E.I. Structure of vortex zones between periodic surface-located flow turbulators of rectangular cross-section // *Electronic scientific journal "Research of technical Sciences"*. 2012. Issue 4. Vol. 2. pp. 18–24. (In Russ)]
 16. Lobanov I.Ye. Teoreticheskoye issledovaniye kineticheskoy energii turbulentnykh pul'satsiy i yeyo sostavlyayushchikh v trubakh s turbulizatorami // *Moskovskoye nauchnoye obozreniye*. 2013. № 1. S. 23-30. [Lobanov E.I. Theoretical study of the kinetic energy of turbulent pulsations and its components in pipes with turbulators // *Moscow scientific review*. 2013. No. 1. pp. 23–30. (In Russ)]
 17. Lobanov I.Ye., Antyukhov I.V. Sovremennyye problemy intensifikatsii teploobmena v kanalakh s pomoshch'yu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennykh turbulizatorov potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2013. № 3–2(299). S. 22-27. [Lobanov E.I., Antyukhov I.V. Modern problems of heat transfer intensification in channels with the help of periodically surface-located turbulators of rectangular cross-section flow. fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2013. No. 3–2 (299). pp. 22–27. (In Russ)]
 18. Lobanov I.Ye., Paramonov N.V. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri techenii v kanalakh na

osnove slozhnykh modeley turbulentnogo pogrannichnogo sloya. — M.: Izdatel'stvo MAI, 2011. — 160 s. [Lobanov E.I., Paramonov N.V. Mathematical modeling of intensified heat transfer during flow in channels based on complex models of turbulent boundary layer. — Moscow: MAI publishing house, 2011. 160 p. (In Russ)]

19. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskome proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom III. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniym mnogoslonykh, supermnogo-slonykh i kompaundnykh modeley turbulentnogo pogrannichnogo sloya. — M.: MGAKHiS, 2010. — 288 s. [Lobanov E.I., Stein L.M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels using multilayer, super-multilayer and compound models of turbulent boundary layer. Moscow: MGAKHiS, 2010. 288 p. (In Russ)]

20. Migay V.K. Modelirovaniye teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya. L.: Energoatomizdat. Leningradskoye otdeleniye, 1987. 263 s. [Migay V.K. Modeling of heat exchange power equipment. — Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1987. 263 p.]

21. Migay V.K. Povysheniye effektivnosti sovremennykh teploobmennikov. L.: Energiya. Leningradskoye otdeleniye, 1980. 144 s. [Migay V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers. — Leningrad: Energy. Leningrad branch, 1980. 144 p.]

22. Upravleniye obtokaniyem tel s vikhrevymi yacheykami v prilozhenii k letatel'nykh apparatam integral'noy komponovki (chislennoye i fizicheskoye modelirovaniye) / Pod red. A.V.Yermishina i S.A.Isayeva. M.—SPb, 2001. 360 s. [Control of the flow of bodies with vortex cells in the application to aircraft integrated layout (numerical and physical modeling) / Ed. A.V.Ermishin and S.A.Isaev. St. Petersburg, 2001. 360 p. (In Russ)]

23. Chislennoye issledovaniye struyno-vikhrevogo mekhanizma intensivatsii teplomassoobmena v okrestnosti sfericheskoy lunki na ploskosti pri obtokanii yeyo potokom neszhimayemoy vyazkoy zhidkosti s uchotom vliyaniya asimmetrii formy, yestestvennoy konveksii i nestatsionarnykh protsessov / S.A.Isayev, A.I.Leont'yev, A.Ye.Usachov i dr. // Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. T.6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teploobmen M.: Izd-vo MEI, 1998. S. 121—124. [Numerical study of jet-vortex mechanism of intensification of heat and mass transfer in the vicinity of a spherical well on the plane when the flow of incompressible viscous fluid flows taking into account its influence of shape asymmetry, natural convection and unsteady processes / S.A.Isaev, A.I.Leontiev, A.E.Usachov et al. // Proceedings of the second Russian national conference on heat exchange. In 8 volumes. Vol. 6. Intensification of heat exchange. Radiation and complex heat transfer. — Moscow: MEI Publishing house, 1998. pp. 121—124. (In Russ)]

24. Chislennyye metody issledovaniya techeniy vyazkoy zhidkosti / A.D.Gosmen, V.M. Pan, A.K.Ranchel i dr. M.: Mir, 1986. 234 s. [Numerical methods for the study of viscous fluid flows / A.D.Gosman, V.M.Pan, A.K.Ranchel et al. Moscow: Mir, 1986.— 234 p. (In Russ)]

25. Chislennoye modelirovaniye vikhrevoy intensivatsii teploobmena v paketakh trub / YU.A.Bystrov, S.A.Isayev, H.A.Kudryavtsev i dr. SPb: Sudostroyeniye, 2005. 398 s. [Numerical simulation of vortex intensification of heat transfer in pipe packages / Y.A.Bystrov, S.A.Isaev, H.A.Kudryavtsev et al. St. Petersburg: Sudostroenie, 2005. 398 p. (In Russ)]

26. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z.Kopp i dr. M.: Energoatomizdat, 1998. 408 s.

[Effective heat transfer surfaces / E.K.Kalinin, G.A.Dreitzer, I.Z.Kopp et al. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 408 p. (In Russ)]

27. Hustrup R., Sabersky R.H., Bartz D.F., Noel M.B. // Jet propulsion. 1958. V. 28. No. 4. pp. 259–263.

28. Menter F.R. Turbulence models with two vortex viscosity equations for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. No. 8. pp. 1598.

Сведения об авторе:

Игорь Евгеньевич Лобанов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ) – 204. e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Information about the author.

Igor' E.Lobanov, Dr. Sci. (Technical), Leading researcher, Problematic scientific-research Laboratory – 204 e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 04.11.2019.

Принята в печать 22.11.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 04.11.2019.

Accepted for publication 22.11.2019.

Для цитирования: Магомедова М.Р., Курбанова З.А., Шангереева Б.А. Компьютерное моделирование определения объемов заиления водохранилища на реке Аксай. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 102-112. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112.

For citation: M.R. Magomedova, Z.A. Kurbanova, B.A. Shangereeva. Computer simulation of determining siltation volumes of water reservoir storage on the Aksay river. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 102-112. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-102-112

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ АКСАЙ

Магомедова М.Р., Курбанова З.А., Шангереева Б.А.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка математической модели зон повышенной мутности реки Аксай для определения объемов заиления Аксайского водохранилища. **Метод.** Математическая модель, разработанная на основе теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и закона Релея для распределения их максимумов использована для расчета «шлейфа мутности» на реке Аксай. **Результат.** Вследствие многофакторного характера непрерывно связанных процессов заиления и занесения верхних бьефов гидроузла Аксайского водохранилища взвешенными и донными наносами, для обеспечения достоверности прогноза занесения, разработана математическая модель процесса занесения водохранилища с пространственной и временной увязкой с моделью процесса заиления, что реально осуществимо на базе компьютерного моделирования. **Вывод.** Разработанная модель, основанная на вероятностном подходе, с применением теории выбросов случайных процессов, в целом правильно отражает процесс транспорта наносов в открытых руслах. Разработка и выполнение программ моделирования осуществлялись в студии разработчика Microsoft Developer Studio (MDS) на алгоритмическом языке Fortran Power Station, который содержит не только систему программирования, но и объединенный в Microsoft Developer Studio (Мастерская разработчика) набор инструментов поддержки больших программных проектов.

Ключевые слова: мутность потока, водохранилище, моделирование, взвешенные наносы, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

COMPUTER SIMULATION OF DETERMINING SILTATION VOLUMES OF
WATER RESERVOIR STORAGE ON THE AKSAY RIVER

M.R. Magomedova, Z.A. Kurbanova, B.A. Shangereeva
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objectives. The development of a mathematical model for the increased turbidity zones of the Aksay river in order to determine the siltation volumes of the Aksay water reservoir storage. **Method.** The mathematical model is developed using the theory of probability and the theory of random process outliers. The model takes the normal distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities into account, as well as the Rayleigh law of the distribution of their maxima. The proposed model is used to calculate the "turbidity tail" of the Aksay river. **Result.** Due to the multifactorial nature of the continuously associated processes of siltation and deposition of suspended and bottom sediments in the upper pounds of the Aksay reservoir storage hydrological system, a mathematical model of the reservoir accretion process is developed. This model provides the reliability of accretion forecasting with spatial and temporal correlation with the siltation process model, which is actually feasible on the basis of computer simulation. **Conclusion.** The developed model, which is based on a probabilistic approach and the theory of random process outliers, reflects the overall process of sediment transport in open channels. The development and execution of simulation programmes is carried out using the Microsoft Developer Studio (MDS) and the Fortran Power Station algorithmic language, which comprises not only a programming system, but also a set of tools for supporting large software projects integrated into MDS.

Keywords: turbidity, reservoir storage, modelling, suspended sediment, particle size distribution, flow velocity, sediment flow rate, turbulent flow

Введение. Проблема борьбы с заилением и занесением водохранилищ значительно усложняет эксплуатацию гидроузлов и вызывает ряд неблагоприятных последствий: потерю регулирующей емкости водохранилища, занесение водозаборных отверстий, истирание турбин наносами и др., что приобретает в настоящее время большую актуальность и народнохозяйственную значимость. Образование наносов в водохранилищах имеет негативные экономические и экологические последствия.

Действующие методики расчета заиления водохранилищ являются упрощенными, которые не учитывают многофакторность процесса заиления.

Заиление водохранилищ и определения срока их службы является одним из основных и еще недостаточно разработанных вопросов гидрологии. Отсутствие достоверных данных стока взвешенных наносов и несовершенство методов прогноза заиления вынуждает проектировщиков учитывать наносы как некоторый процент от стока взвешенных, который колеблется в пределах от 20% до 300%.

Даже действующие «Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании» рекомендуют вычислять расход наносов по четырем формулам и контролировать вычисления подбором аналога.

В связи с этим оценка динамики заиления водохранилищ должна быть основана на гидродинамических уравнениях взвешенных водных масс и учитывать основные факторы, определяющие этот процесс. Достоверность прогноза деформации речных русел, прогноз опасных гидроэкологических процессов, заиления водохранилищ, а также решение других вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией гидротехнических сооружений зависит от точности расчета расхода наносов.

Математическое моделирование заилиения водохранилищ, построенное на основе теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов позволяет не только оценивать динамику отметок дна при текущих гидродинамических условиях, но и давать прогнозы при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе, вызванного различными антропогенными мероприятиями; позволяет прогнозировать время и объемы накопления наносов на Аксайском водохранилище. Также при математическом моделировании имеется непрерывная взаимосвязь между изменением морфометрических характеристик котловины водохранилища и переменными состояниями водной массы.

Постановка задачи. Реки Кавказа, особенно в их верховьях, отличаются сравнительно быстрым течением, паводковым режимом, относительно низкими температурами в течение всего года, значительными сезонными колебаниями содержания взвешенного и влекомого материала.

Река Аксай берёт начало из родников на северо-восточном склоне хребта Суяси-Меэр, на северном склоне Андийского хребта и впадает в р. Акташ на 37 – м км от устья. Полностью находится в пределах Дагестана. Четвертичный покров реки сложен самыми разнообразными по механическому составу породами: глинами, песчаными глинами, супесями, песками, лессовидными суглинками, галечниками и илисто-песчаными речными наносами. Какой-либо закономерности в залегании этих пород не наблюдается, ближе к рекам распространены глинисто-песчаные породы типа речных наносов, а в средней части низменности преобладают суглинистые грунты.

Водный режим реки Аксай характеризуется дождевыми летними паводками с максимальными расходами: 5% обеспеченности $Q = 368$ м³/с, 1 % обеспеченности $Q = 638$ м³/с. Среднегодовой расход обеспеченностью 50% составляет 6,94 м³/с, среднемноголетний объем стока – 218 млн.м³. После строительства канала Акташский тракт воды р. Акташ сбрасываются в р. Сулак в районе села Языковка. Длина составляет 144 км, площадь водосбора — 1390 км², средняя его высота — 444 м, средний уклон 14,5%, ширина реки изменяется от 5 до 25 м. Характер реки меняется с высотой — в верхнем течении она горная, а в низовьях становится равнинной. Река характеризуется паводочным режимом в тёплую часть года и низкой зимней меженью.

При высоких паводках мутность реки Аксай может граничить с мутностью селевых потоков (максимально наблюдаемая мутность – 106 кг/м³), среднегодовой объем твердого стока – 1280 тыс.м³ [1]. Показатели годового стока наносов и растворенных веществ в реке Аксай представлены в табл. 1.

Таблица 1. Годовой сток наносов и растворенных веществ в реке Аксай
Table 1. Annual runoff of sediment and solutes in the Aksai River

Взвешенных наносов, тыс. тонн Weighted sediment, thousand tons	Влекомых наносов, тыс. тонн Deposited sediment, thousand tons	Растворенных в воде веществ Substances dissolved in water	Модуль эрозии в год, т/км ² The erosion modulus per year, t / km ²
95	152	1558	2543

Состав взвешенных наносов р. Аксай характеризуется следующими значениями (табл.2):

Таблица 2. Состав взвешенных наносов р. Аксай
Table 2. Composition of suspended sediment p. Aksai

d, мм	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0.01
%	-	-	-	0,08	0,17	2,04	11,67	13,34

В таблице 3 представлена ведомость измеренных расходов воды на р. Аксай.

Таблица 3. Ведомость измеренных расходов воды

Table 3. Statement of measured water discharge

№ гидротвора No. of hydraulic ram	Состояние реки River condition	Уровень воды, м ВС Water level, m BS	Расход воды, м ³ /с Water consumption, m ³ / s	Площадь водного сече- ния, м ² Water section area, m ²	Скорость течения, м/с Speed, m / s		Ширина реки, м River width, m	Глубина, м Depth, m		Уклон водной поверхности средний, % Water slope surface average %
					средняя average	максимальная maximum		средняя average	максимальная maximum	
1	св.	95,83	2,87	5,04	0,57	0,81	17,40	0,29	0,51	0,78
1	св.	97,92	112,2	62,13	1,81	2,58	38,43	1,62	2,60	0,78
1	св.	96,23	9,1	11,12	0,82	1,17	22,80	0,49	0,91	0,78

В низовье реки построено Акташское водохранилище. Створ ГТС расположен в 150 км от истока реки, бассейн реки Аксай. Исследование за мертвым объемом водохранилища в течение 25-30 лет, показало, что в водохранилище будет оседать 90% всех наносов, влекомых рекой (порядка 1150 тыс. м³ в год).

В настоящее время аккумулирующая емкость водохранилища в результате заилиния значительно уменьшилось. Кроме того, ложе заросло растительностью. Отметки ложа водохранилища поднялись на 5-7 метров, возвышение гребня дамб над уровнями воды уменьшилось до минимума. Вследствие этих причин водохранилище своего предназначения (среза пика паводков) не выполняет.

Кроме того имеется угроза перелива через гребень дамб с прорывом вод реки и созданию аварийной ситуации. Затоплению подвержены Бабаюртовский и Хасавюртовский районы Республики Дагестан. Под угрозой затопления находятся населенные пункты Камыш-Кутан, Чагар-Отар, Тукита, Нарыш Кутан, селения Герменчик, Бабаюрт, кутаны животноводства [1].

Методы исследования. При проектировании и эксплуатации водохранилищ на реках с повышенным содержанием наносов приходится решать вопросы заилиния водохранилищ, а в ряде случаев намечать соответствующие меры по борьбе с этим явлением.

Существенное заилиние водохранилища влечет за собой потерю полезного объема и, как следствие, может привести, как к уменьшению диапазона регулирования объема и отметок верхнего бьефа, так и к отсутствию способности обеспечить водопотребителей расходами в требуемых количества, или способности поддерживать требуемые уровни нижнего бьефа. Проведенные исследования показывают, что ежегодные потери объема в результате заилиния составляют от 0,02% до 14%.

Существующие в настоящее время методы расчета заилиния водохранилищ, как правило, дают лишь общую оценку условно равномерного заполнения водохранилища речными наносами. Эти методы не учитывают сложную морфометрию водохранилищ, распределение поступившего с речным стоком твердого вещества по всей акватории водохранилища и его внутригодовую динамику, обусловленную изменением водности в течение года, регулированием стока водохранилища, влиянием ветра и ледовых явлений, осыпание берегов, образование органического осадка и так далее.

Случайный характер срыва и перемещения частиц грунта турбулентным потоком обусловлен воздействием мгновенных гидродинамических сил, зависящих от актуальных скоростей течения, являющихся случайными функциями времени. Сила, с которой водный поток воздействует на частицу, покоящуюся на дне потока, подвержена мгновенным изменениям, обусловленным пульсационным характером скоростей.

При расчете осаднения наносов в водохранилищах и отстойниках необходимо, кроме того, знание закона распределения концентрации наносов по глубине потока.

Сложный характер движения речных наносов и отсутствие единой теории движения обусловили многообразие методов расчета твердого расхода.

Исследование движения распространения взвешенных частиц и разработка методов расчета транспортирующей способности взвесенесущих потоков ведется по двум направлениям: по пути обобщения данных натуральных наблюдений и по пути создания и развития различных теорий движения взвешенных наносов.

На основе анализа и обобщения данных натуральных измерений на реках предложено большое количество эмпирических формул для оценки транспортирующей способности потока в открытом русле.

В инженерной практике широко используются формулы, в которых средняя по сечению предельная концентрация взвешенных наносов в потоке представлена в виде функции гидравлических параметров потока и средней гидравлической крупности частиц, в ряде случаев с учетом гранулометрического состава взвешенных наносов, оцениваемого по эмпирическим функциям распределения гидравлической крупности.

Разнообразие методов определения расхода наносов и расхождение между ними при количественных расчетах обусловлено чрезвычайной сложностью процессов взаимодействия турбулентного потока с размываемым и транспортируемым материалом и связанной с этой сложностью учета всех определяющих факторов процесса, а также отсутствием единой теории движения руслоформирующих наносов – донных и взвешенных [2-5].

Вследствие случайного характера процессов срыва, взвешивания, транспорта и осаждения наносов в турбулентном потоке задача разработки достоверных моделей этих процессов, отвечающей физической сущности явления, а, следовательно, и усовершенствования методов расчета твердого расхода требует для своего решения привлечения методов теории вероятностей и теории случайных процессов.

Существующее состояние проблемы расчета объемов наносов, определение их расхода, когда отсутствуют даже нормативные документы по применению тех или иных методов в проектной практике, более надежные методы достаточно сложны, что вызывает необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета твердого расхода, а также разработки алгоритмов и программ. В этой связи является актуальной задача математического моделирования процесса движения наносов на ЭВМ для определения зон повышенной мутности реки Аксай.

Исследование взаимосвязи между объемом наносов и факторами, определяющими накопление и перенос наносов, установленными на основе теоретических, экспериментальных и натуральных исследований, является трудной задачей из-за сложности физической природы, стохастического характера и многофакторности процесса [3,15].

В естественных условиях, вследствие неупорядоченного расположения, а также различия размеров и форм, частицы несвязного грунта испытывают различное силовое воздействие со стороны потока: частицы, более возвышающиеся над соседними, испытывают большее усилие, менее возвышающиеся - меньшее.

В явлениях захвата зерен со дна для относительно крупных зерен устанавливается избирательное действие донных вихрей, состоящее в том, что крупные зерна наносов захватываются со дна и поднимаются движущимися у дна вихрями больших размеров, а меньшие по величине зерна захватываются вихрем, соответственно, меньших размеров.

В шероховатых руслах захват зерен со дна и подъем их осуществляется механизмом вихревых областей, образующихся в углублениях за выступами шероховатости дна.

Для частиц, крупнее толщины прилипшего слоя, известную роль играет явление подскокивания зерен, движущихся по дну, при встрече с выступами шероховатости дна. При достаточно больших скоростях своего движения зерна при встрече с выступами шероховатости могут не останавливаться, а подскокивать при ударе.

Между нижней гранью частицы и дном потока происходит движение жидкости за счет разности напоров между передней и тыловой гранями. Сдвиг одной из частиц на поверхности дна есть случайное событие, связанное со случайным мгновенным превышением сдвигающих сил над удерживающими. При массовом движении наносов горизонтальное перемещение частицы будет происходить и при опускании ее ниже уровня $y = \Delta$, вследствие участия в дви-

жении большинства частиц верхнего слоя, где Δ – средняя высота выступов шероховатости русла [2-4, 6].

С возникновением гряд движение наносов изменяется. На пологом верховом откосе оно остается таким же, как и при плоском дне, т. е. частицы грунта движутся скачкообразно с периодическими остановками. Дойдя до гребня гряды, часть из них (более крупные) скатывается вниз, и накапливаются на крутом низовом откосе гряды, наращивая его, в силу чего гребень гряды смещается по течению на некоторое расстояние. Часть частиц (более мелких) задерживается на гребне восходящими токами вихря, образовавшегося в результате отрыва потока за низовым откосом. Обратные горизонтальные токи этого вихря размывают подвалье гряды и наращивают смытыми частицами низовой откос гряды снизу [3, 7-9].

Влечение, перенос, скачкообразное движение и взвешивание частиц грунта водным потоком осуществляется системой мгновенных гидродинамических сил, которые являются случайными функциями горизонтальной и вертикальной мгновенных скоростей течения, в отношении которых используется экспериментально подтвержденная гипотеза о нормальном законе их распределения и Релеевском законе распределения их максимумов [3].

На рис. 1 показан график реализации процесса $P(t)$ длительностью t ; в момент t_m реализация имеет максимальную амплитуду (максимум максимумов) P_{max} .

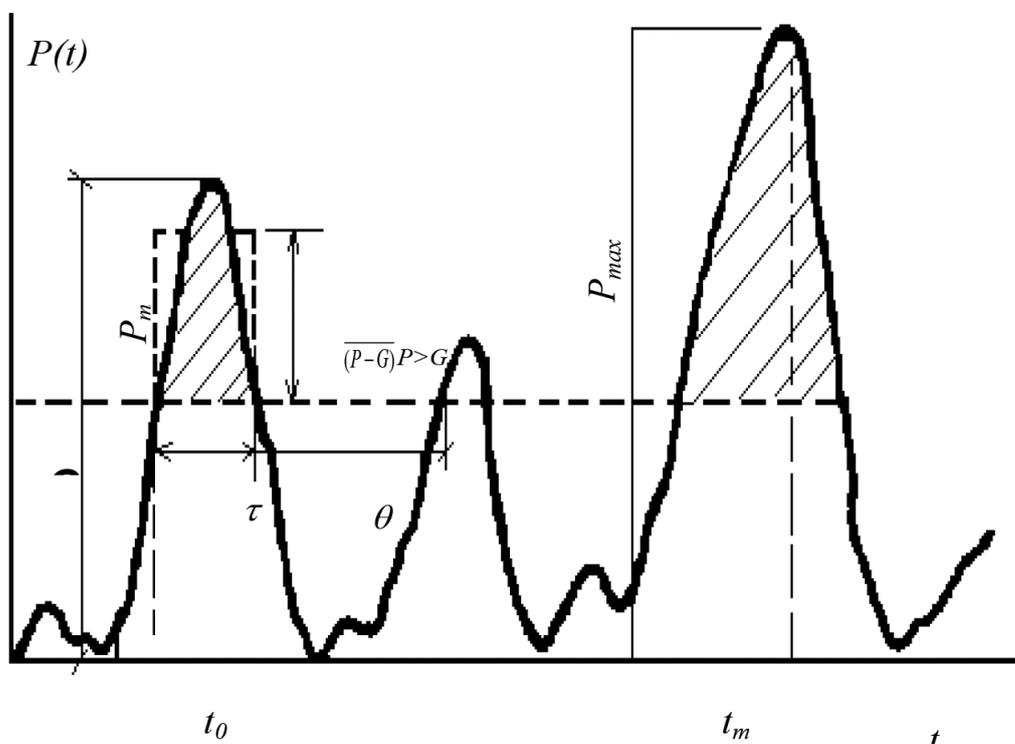


Рис. 1. Пересечение траекторией случайного процесса $P(t)$ критического уровня G
 Fig. 1. The intersection of the trajectory of a random process $P(t)$ critical level G

Прямая G – фиксированный уровень, пересекаемый несколько раз реализацией процесса $P(t)$. Пересечение случайным процессом уровня G снизу вверх – положительный выброс $P(t)$ за уровень G ; в момент времени t_0 происходит первый выброс.

В интервале $(0, t)$ реализация $P(t)$ имеет N выбросов. Число выбросов N , длительность положительных выбросов τ , интервал между выбросами, величина максимума P_m – являются характеристиками процесса $P(t)$, знание которых необходимо при решении задач связанных с транспортом придонных наносов [3].

Расход взвешенных наносов определяем по формуле:

$$q_{вз} = q_{дон} \eta_c \tau_c V_c \frac{P_{вз} d_{вз} \ell_{вз}}{P_0 d_0 \ell_{дон}}, \quad (1)$$

Для определения расхода донных наносов применяем формулу (2):

$$q_{дон} = \rho_{отл} d^2 \eta_c \tau_c V_c / t_{\Delta}, \quad (2)$$

где d – диаметр частиц грунта, м, $\rho_{отл} = \beta \rho_c$ – плотность русловых отложений, кг/м³, $\rho = 1000$ кг/м³, ρ_c – плотность материала частиц грунта, $\rho_c = 1800$ кг/м³, g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с², V_c – средняя частота срывающих турбулентных возмущений; τ_c – средняя длительность воздействия турбулентных возмущений на частицы грунта на дне; t_{Δ} – длительность срыва твердых частиц, с; η_c – вероятность срыва твердых частиц одним вихревым возмущением.

Для вычисления расхода наносов с учетом грядовой формы дна применяем формулу, полученную О.К. Карлыхановым и О.Б. Шевченко [10]:

$$q_T = \alpha \gamma c_r h_r, \quad (3)$$

где c_r – скорость перемещения гряды; h_r – высота гряды; α – коэффициент формы гряды, принимаемый большинством авторов в пределах 0,5-0,7; γ – объемный вес грунта в теле гряды. Сопоставление значений расходов, измеренных двумя способами на прямолинейном канале, показало, что они совпадают при $\alpha = 0,4$.

Общий расход наносов определяют суммированием расходов отдельных струй по ширине потока [11, 12]:

$$G_T = \sum_{k=1}^{N_k} q_{T,K} b_k \quad (4)$$

$$q_{T,K} = q_{дон,K} + q_{вз,K} \quad (5)$$

где $q_{T,K}$, $q_{дон,K}$, $q_{вз,K}$ – соответственно удельные расходы руслоформирующих, донных и взвешенных наносов, b_k – ширина к-й струи.

Дальность переноса донных и взвешенных наносов, определяем по зависимостям:

$$\ell_{вз} = V_{вз} t_{вз} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} V_{вз} t_{вз} \right] \quad (6)$$

$$\ell_{дон} = \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} \bar{v}_{\Delta c} t_{дон} \right]. \quad (7)$$

Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков определяем по формуле:

$$L = G_T / wQ. \quad (8)$$

Среди существующих формул наиболее приемлемым для практического использования является способ выражения гидравлической крупности через стандартную гидравлическую крупность, предложенный В.Н. Гончаровым [12-13]:

$$w = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2g(\rho_2 - \rho)d}{1,75\rho}}, \quad (9)$$

где φ – параметр турбулентности, показывающий во сколько раз меньше действительная скорость падения в сравнении с той, которой обладали бы наносы при турбулентном режиме их падения.

Расчет параметра турбулентности φ в зависимости от температуры (5, 10, 15 и 20 градусов по Цельсию) принят по шкале, предложенной В.Н. Гончаровым.

Для численной реализации на ЭВМ, на языке Fortran PowerStation создан модуль Fall_parameter, входящий в программный комплекс. При $d > 1,5$ мм, $\varphi = 1$; в диапазоне 0,15 – 1,5 мм параметр турбулентности определяется по формуле :

$$\varphi = \frac{1}{\beta} \sqrt[3]{\frac{\rho\mu}{\rho_1 - \rho}} \sqrt{\frac{2g}{1,75\rho d}}; \quad (10)$$

для частиц $d < 0,15$ мм φ определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{33,8}{\sqrt{1,75\rho(\rho_1 - \rho)d^3}}. \quad (11)$$

где φ – параметр турбулентности, показывающий во сколько раз меньше действительная скорость падения в сравнении с той, которой обладали бы наносы при турбулентном режиме их падения.

С уменьшением крупности зерен значение φ возрастает, доходя при $d < 0,01$ мм до $\varphi = 300$.

Разработка и выполнение программ на ЭВМ осуществляется в студии разработчика Microsoft Developer Studio (MDS) на алгоритмическом языке FortranPowerStation.

Разработанная математическая модель определения объемов наносов в русле реки Аксай реализована в программном комплексе Sediment_Aksai.

Программный комплекс состоит из файлов головной программы Sediment_Aksai и подпрограмм с расширением f90.

Алгоритм расчета расхода наносов, включает определение следующих параметров:

1. Гидравлическая крупность.
2. Параметр турбулентности.
3. Допускаемая неразмывающая донная скорость потока.
4. Максимальный диаметр подвижных фракций грунта.
6. Выполняется расчет диаметра частиц, определяющего шероховатость русла при транспорте неоднородных по крупности наносов.
7. Выполняется расчет осредненной во времени донной скорости потока по формуле В.Н. Гончарова.
8. Определяется относительная донная скорость.
9. Определяется средняя гидравлическая крупность подвижных фракций.
10. Отбор массивов данных по критериям В.Н. Гончарова при образовании грядовых форм.
11. Отбор массивов данных по критериям Н.С. Знаменской при образовании грядовых форм.
13. Определение высоты гряд.
14. Определение глубины потока в средней части гряды.
16. Определение местной средней скорости потока в средней части донных гряд.
17. Расчет осредненной во времени фактической донной скорости потока.

18. Определение статистических характеристик транспорта наносов.
19. Определение относительного теоретического расхода наносов.
20. Определение массового расхода наносов.
21. Определение относительного расхода наносов.

Обсуждение результатов. Массив охватывает следующий диапазон изменения гидравлических характеристик потока и русла:

Расход воды $Q = 5,17 \text{ м}^3/\text{с}$, объем наносов $V = 7\,400 \text{ м}^3$, расход наносов $Q_n = 32,2 \text{ кг/с}$, глубина потока $h = 1,6 \text{ м}$, ширина потока $b = 38 \text{ м}$, средняя скорость потока $V = 1,8 \text{ м/с}$, диаметр частиц наносов $d = 0,003 \text{ м}$, мутность воды $\mu = 6,5 \text{ кг/м}^3$

В результате объемы наносов в русле реки составляют (табл. 4):

Таблица 4. Концентрация взвеси в воде
Table 4. Suspension concentration in Water

Показатели Indicators	Концентрация взвеси в воде, кг/м^3 Suspension concentration in water kg/m^3					
Мутность воды	$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
Объемы наносов	120978	60489	24195	12097	6048	1209

Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной, представлено в табл. 5:

Таблица 5. Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков с концентрацией частиц наносов выше заданной
Table 5. The distance from the gauge site to the place of precipitation with a concentration of sediment particles above a given

Показатели Indicators	Концентрация взвеси в воде, кг/м^3 Suspension concentration in water kg/m^3					
Мутность воды	$\geq 0,100$	$\geq 0,050$	$\geq 0,020$	$\geq 0,010$	$\geq 0,005$	$\geq 0,001$
Расстояние от створа гидроузла	333,3	666,6	1666,7	3333,5	6667	34300,5

Вывод. Посредством проведенного компьютерного моделирования были получены сведения об объемах, площадях зон влияния повышенной мутности, относительном содержании взвешиваемых фракций в грунте, средней частоте взвешивающих вихревых возмущений, вероятности взвешивания сорванных частиц, высоте подъема взвешенных наносов, длительности переноса частиц взвешенных наносов, удельных показателях расхода донных, взвешенных и общего расхода наносов на реке Аксай, что позволяет прогнозировать аккумуляционные характеристики заиления Аксайского водохранилища.

Библиографический список:

1. Сайпулаев И.М., Эльдаров Э.М. Водные ресурсы Дагестана: состояние и проблемы. Махачкала, 1996 г. С.19-30.
2. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
3. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. 137 с.
4. Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
5. Vagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. pp. 303-312.
6. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т.37, №2. С.88-91.
7. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел // Журнал университета водных коммуникаций. СПб, т.2, 2010. С.90-93.
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, Vol. 5, pp. 774-792.

9. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 103–107.
10. Карлыханов О.К., Шевченко О.Б. Транспорт наносов в криволинейном русле // Гидротехническое строительство. 1991. № 7. С. 41– 43
11. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т.42, №3. С.106-109.
12. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. М.: ВЗПИ, 1990. С.88-108.
13. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1954. 453 с.
14. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С.127-130.
15. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, Vol. 106, No. 6, pp.662-673.
16. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.

References:

1. Saypulayev I.M., El'darov E.M. Vodnyye resursy Dagestana: sostoyaniye i problemy. Makhachkala, 1996 g. S.19-30. [Saipulaev I.M., Eldarov E.M. Water resources of Dagestan: state and problems. Makhachkala, 1996, pp. 19-30. (In Russ)]
2. Alekseyevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'yefa // Me-teorologiya i gidrologiya. 1990. № 9, s. 100-105. [Alekseevsky N.I. Transport of sediment load with the developed structure of the channel relief // Meteorology and hydrology. 1990. No. 9, pp. 100-105. (In Russ)]
3. Magomedova M.R. Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014. 137 s. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014.137 p. (In Russ)]
4. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181. [Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on river sedimentation. Moscow, 2007, Vol. 3, pp. 175–181. (In Russ)]
5. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. P. 303-312. [Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. pp. 303-312. (In Russ)]
6. Magomedova M.R. Prakticheskoye primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2015. T.37, №2 S.88-91. [Magomedova M.R. The practical application of the author's model of transport of mineral particles // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2015. Vol. 37, No. 2 pp.88-91. (In Russ)]
7. Baryshnikov N.B., Pagan A.O. Gidravlicheskoye soprotivleniye rechnykh rusel// Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. SPb, t.2 , 2010. S.90-93. [Baryshnikov N.B., Pagan A.O. Hydraulic resistance of river channels // Journal of the University of Water Communications. St. Petersburg, Vol. 2, 2010. S.90-93. (In Russ)]
8. By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, vol. 5, P. 774-792. [By Rasmus Wiuff Transport of suspended material in open and submerged streams // Water Recurs. Moscow, 1986, Vol. 5, pp. 774-792. (In Russ)]
9. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nyye issledovaniya i gidravlicheskoye modelirovaniye rechnykh potokov i ruslovogo protsesssa. SPb.: Nestor-Istoriya, 2011. S. 103–107. [Klavin A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. pp. 103–107. (In Russ)]
10. Karlykhanov O.K., Shevchenko O.B. Transport nanosov v krivolineynom rusle // Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo. 1991. № 7. S. 41– 43. [Karlykhanov O.K., Shevchenko O.B. Sediment transport in a curved channel // Hydrotechnical construction. 1991. No. 7. pp. 41–43(In Russ)]
11. Grigor'yana O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoye matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2016. T.42, №3. S.106-109. [Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the distribution of suspended particles to determine areas of high turbidity in assessing damage to the aquatic biological resources of the Cherek River // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2016. Vol. 42, No. 3. pp.106-109. (In Russ)]
12. Magomedova A.V. Eroziionnyye protsessy v ruslakh rek i kanalov. M.: VZPI, 1990. S.88-108. [Magomedova A.V. Erosion processes in riverbeds and canals. M.: VZPI, 1990. pp.88-108. (In Russ)]
13. Goncharov V.N. Osnovy dinamiki ruslovykh potokov. L.: Gidrometeozdat, 1954. 453 s. [Goncharov V.N. Fundamentals of the dynamics of channel flows. L.: Gidrometeozdat, 1954.453 p. (In Russ)]
14. Rzhantsyn N.A. Rusloformiruyushchiye protsessy rek. L.: Gidrometeozdat, 1985. S.127-130. [Rzhantsyn N.A. River-forming processes of rivers. L.: Gidrometeozdat, 1985. pp.127-130. (In Russ)]

15. Brian W. D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. *The Journal of Geology*, 2011, Vol. 106, no. 6, pp. 662-673.
16. Benoit C., Magnus L. A. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, pp. 251-258.

Сведения об авторах:

Магомедова Милада Руслановна, кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства; e-mail: n-guseinova@mail.ru

Курбанова Зухра Адамовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра мелиорации, землеустройства и кадастров; e-mail: adamovna05@mail.ru

Шангереева Бийке Алиевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники; e-mail: biyke@mail.ru

Information about authors:

Milada R. Magomedova, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Oil, Gas and Environmental Engineering.

Zuhra A. Kurbanova, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Land Reclamation, Land Management and Cadastres; e-mail: adamovna05@mail.ru

Biyke A. Shangereeva, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: biyke@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.10.2019.

Принята в печать 20.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.10.2019.

Accepted for publication 20.11.2019.

Для цитирования: Наздрыухин А.С., Храмцов И.Н., Тушев А.Н. Обработка изображений товарных чеков для выделения и распознавания текстовой информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 113-122. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-113-122

For citation: A.S. Nazdryukhin, I.N. Khramtsov, A.N. Tushev. Processing images of sales receipts for isolating and recognising text information. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 113-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-113-122

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.932.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-113-122

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТОВАРНЫХ ЧЕКОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Наздрыухин А.С., Храмцов И.Н., Тушев А.Н.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия*

Резюме. Цель. В данной статье рассматривается приложение, позволяющее осуществить обработку изображений товарных чеков для последующего извлечения текстовой информации с помощью Tesseract OCR Engine. Такое приложение полезно для ведения семейного бюджета или при проведении бухгалтерского учета в небольших компаниях. Основная проблема распознавания чеков – низкое качество краски и бумаги для печати, из-за чего она легко мнется и рвется, а напечатанные буквы быстро выцветают. **Метод.** Исследование основано на ряде алгоритмов, основанных на методах математической морфологии операции размыкания, замыкания и морфологического градиента, преобразования изображений, которые позволяют существенно улучшить итоговое распознавание символов системой Tesseract. **Результат.** Для решения этой проблемы был предложен специальный алгоритм нормализации изображения, включающий в себя нахождение чека на изображении, обработку полученного участка изображения, удаление дефектов съемки и дефектов носителя и точечную обработку для восстановления символов. Разработанное приложение позволяет значительно повысить точность распознавания текстовой информации при использовании Tesseract OCR. **Вывод.** Разработанная система распознает знаки с достаточно высокой точностью, и показывает результат выше, чем при распознавании оригинальным методом Tesseract, однако все же уступает точности распознавания ABBY FineReader. Также были предложены методы, предположительно позволяющие улучшить разработанный алгоритм.

Ключевые слова: товарные чеки, обработка изображений, анализ изображений, OCR, нейронные сети

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
PROCESSING IMAGES OF SALES RECEIPTS FOR ISOLATING AND RECOGNISING
TEXT INFORMATION

A.S. Nazdryukhin, I.N. Khramtsov, A.N. Tushev
Polzunov Altai State Technical University,
46 Lenin Ave., Barnaul 656038, Russia

Abstract Objectives. This article presents an application for the processing of scanned images of sales receipts for subsequent extraction of text information using the Tesseract OCR Engine. Such an application is useful for maintaining a family budget or for accounting in small companies. The main problem of receipt recognition is the low quality of ink and printing paper, which results in creasing and tears, as well as the rapid fading of printed characters. **Methods.** The study is based on a number of algorithms based on mathematical morphology methods for opening, closing and morphological gradient operations, as well as image conversion, which can significantly improve the final recognition of characters by Tesseract. **Results.** In order to solve this problem, a special image normalisation algorithm is proposed, which includes locating a receipt on an image, processing the received image section, removing image capture and carrier defects, as well as point processing for restoring missing characters. The developed application supports increased recognition accuracy of text information when using Tesseract OCR. **Conclusion.** The developed system recognises characters with fairly high accuracy, demonstrates a result that is better than that obtained when using the unmodified Tesseract method, but which is still inferior to the recognition accuracy of ABBY FineReader. Methods are also been proposed aimed at improving the developed algorithm.

Keywords: sales receipts, image processing, image analysis, OCR, neural networks

Введение. Оптическое распознавание текста (англ. Optical Character Recognition или OCR) представляет собой программную систему, выделяющую текстовую информацию из различных графических изображений. Оптическое распознавание текста в основном используется для распознавания текста в книгах или документах. Наиболее известной и практически не имеющей конкурентов для русскоязычных текстов является система ABBYY FineReader [1]. Алгоритм оптического распознавания текста, используемый в системе ABBYY FineReader, является результатом многолетних исследований и обеспечивает очень хорошее качество для самых разнообразных документов. Система FineReader коммерческая и достаточно дорогая, поэтому не подходит для массового использования, особенно для обработки фотографий, полученных камерой мобильных устройств.

В последние годы в различных областях деятельности универсальные системы обработки сигналов и изображений, распознавания образов, основанные на методах глубокого обучения нейронных сетей, стали вытеснять специализированные программные системы. Одной из наиболее популярных систем OCR с открытым программным кодом является система Tesseract [2], основанная на обучении нейронных сетей. На данном этапе Tesseract и аналогичные системы OCR не могут составить конкуренции FineReader, но благодаря открытому коду и передовой технологии глубокого обучения они развиваются очень активно.

Постановка задачи. В работе решается задача распознавания текстов на товарных чеках. Приложение, позволяющее из фотографий или сканов товарных чеков выделять приобретенные товары и их стоимости в текстовом виде, полезно, например, для планирования семейного бюджета или при проведении бухгалтерского учета в небольших компаниях.

Особенностью проблемы обработки товарных чеков является низкое качество изображений из-за плохой бумаги, которая легко рвется и мнется, а нанесенная на нее информация быстро выцветает. Поэтому качество распознавания символов системой FineReader и, тем более, Tesseract очень низкое.

С другой стороны, в задаче не требуется высокого качества распознавания. Пользователь может вручную исправить ошибки, главное, чтобы их исправление занимало существенно меньше времени, чем набор текста целиком вручную. Важно отметить, что ошибочно распознанные символы легко добавляются к обучающей выборке нейронной сети, и затем выполняется обучение сети заново с улучшением качества работы.

Методы исследования. В работе предлагается применение ряда специально выбранных алгоритмов преобразования изображений, которые позволяют существенно улучшить итоговое распознавание символов системой Tesseract.

Разработанный алгоритм состоит из двух модулей (рис. 1):

1. Обработка изображения.
2. Распознавание символов (OCR).

Первый модуль состоит из двух частей: обнаружение товарного чека на изображении и коррекция изображения.

Для тестирования алгоритма была реализована программа на базе библиотеки компьютерного зрения OpenCV [3] с помощью языка C++.

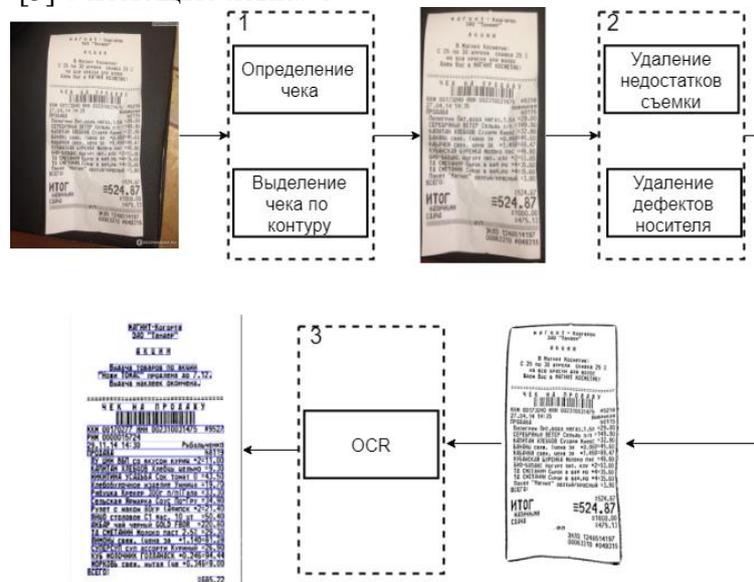


Рис. 1. Граф-схема алгоритма
 Fig. 1. Scheme of algorithm

Для поиска чека на изображении используется ряд алгоритмов, основанных на методах математической морфологии [4]: операции размыкания, замыкания и морфологического градиента (англ. Morphological Gradient).

В случае бинарной морфологии [4] изображение $f(x, y)$ представляется множеством пикселей вида $(x_0, y_0) \in Z^2$, где Z – множество целых чисел. Тогда морфологические преобразования сводятся к операциям на множествах $A, B \subset Z^2$.

Интенсивность P пикселя (x_0, y_0) позволяет определить принадлежность элемента множеству с помощью адаптивной бинаризации изображения [5]: $P \rightarrow \{0,1\}$, где 1 (принадлежность элемента множеству) обозначается черным цветом, 0 (отсутствие элемента) – белым. Рассматривается случай бинарной морфологии, однако ее методы легко расширяются для морфологии нечетких множеств с элементами (x, y, p) , где $p \in [0,1]$ – нормализованная интенсивность пикселя.

К основным операциям на множествах требуется добавить операции, необходимые для описания методов математической морфологии: две унарные операции (отражения и переноса на вектор трансляции) и четыре бинарные (расширение, сужение, открытие, закрытие). Операция отражения множества A обозначается \hat{A} и определяется как

$$\hat{A} = \{\omega | \omega = -a, \quad a \in A\}$$

Операция переноса на вектор $t = (t_x, t_y)$, соответственно,

$$A_t = \{\omega | \omega = a + t, \quad a \in A\}$$

Бинарные операции математической морфологии (рис. 2, 3): расширение: $A \oplus B = \{t | (\hat{B})_t \cap A = \emptyset\}$, сужение: $A \ominus B = \{t | B_t \subseteq A\}$, открытие (размыкание): $A \nabla B = (A \ominus B) \oplus B$, закрытие (замыкание): $A \blacktriangledown B = (A \oplus B) \ominus B$.

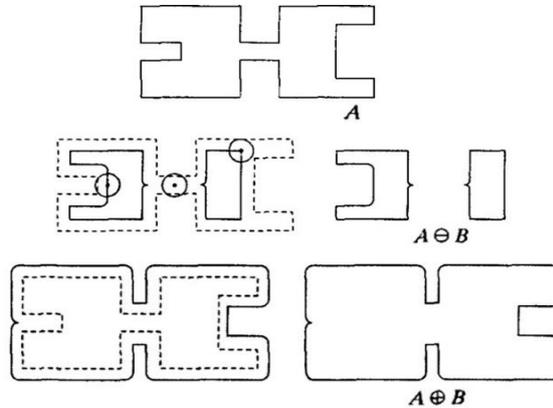


Рис. 2. Расширение и сужение множества A шаблоном B
 Fig. 2. Dilation and erosion A by B

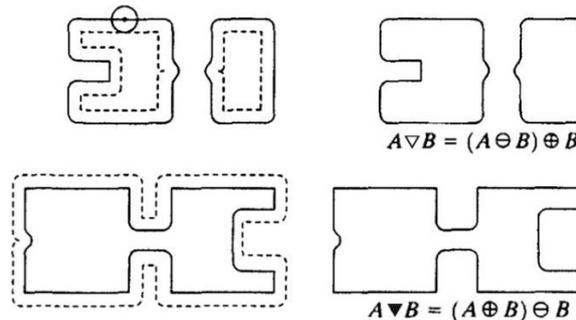


Рис. 3. Размыкание и замыкание множества A .
 Fig. 3. Opening and closing A by B .

При использовании методов математической морфологии для исходного изображения A множество B выбирается специальным образом, в зависимости от операции и задачи в целом. B называется структурным элементом (шаблоном) и, как правило, данное изображение гораздо меньше по размеру изображения A . В OpenCV имеется три стандартных типа структурных элементов: матрицы в виде эллипса, прямоугольника, креста.

С помощью основных операций можно легко обозначить границы множества A как (1), заполнение региона, очерченного границами как (2):

$$\beta(A) = A \setminus (A \ominus B) \tag{1}$$

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A^c, \quad \odot^{\text{TM}} \Sigma k = 1, 2, 3 \dots \tag{2}$$

С учетом описанных выше определений и обозначений граф-схема алгоритма выделения чека из фотографии показана на рис.4.

Результат работы показан на рис. 5. Для нахождения контуров (англ. Find Contours) на изображении A применялся алгоритм Судзуки-Абэ [6], для описания подходящего многоугольника по контуру (англ. Convex Hull) – алгоритм Склански [7] (рис.4, блок 2).

Данные алгоритмы являются стандартными для OpenCV. Тем не менее, похожий результат для A можно получить с помощью комбинирования методов $\beta(A)$ и X_k с остальными методами морфологии при хорошо подобранных структурных элементах.

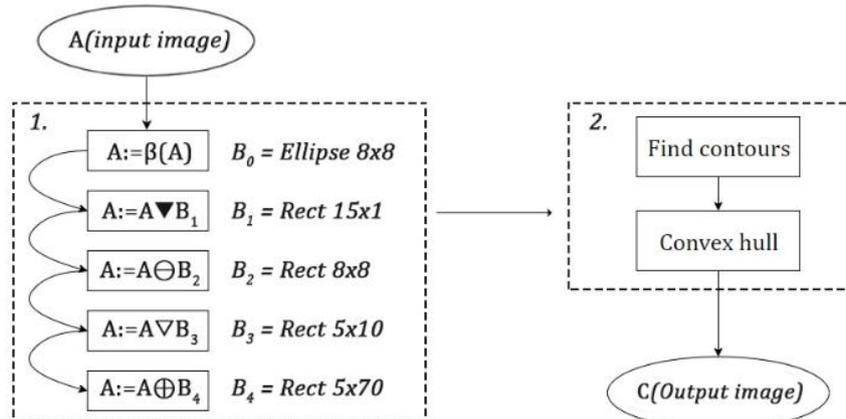


Рис. 4. Граф-схема алгоритма выделения чека, где $B_k, k = 1 \dots 4$ – шаблоны, а *Ellipse* и *Rec (Recage)* – типы шаблонов с указанным размером $m \times n$ матрицы изображения

Fig. 4. Flowchart of sale receipt detection algorithm, where $B_k, k = 1 \dots 4$ – structuring elements, *Ellipse* and *Rec (Recage)* – type of schemes with size $m \times n$ of image matrix



Рис. 5. Результат работы модуля, где (а) – бинаризованное изображение, полученное с помощью морфологии, (б) – изображение с выделенным контуром чека и минимальным прямоугольником, его описывающим

Fig. 5. The result of the module, where (a) – binarized image, obtained using morphology, (b) – image with a contour of sales receipt and a minimal rectangle selected contour

Коррекция и обработка фотографии. Как правило, фотографии с камеры смартфона имеют множество дефектов, таких как цифровой шум, хроматические aberrации, дефекты экспозиции и т.д. [8]. Также печать текста на товарном чеке и низкое качество бумаги, из которой чек изготовлен, вносят дополнительные искажения.

Таким образом, можно выделить два класса дефектов изображения: недостатки съемки и недостатки физического носителя информации. Для каждого класса был построен алгоритм повышения качества.

На рис. 6 показана граф-схема алгоритма. Узлы графа – методы, описание которых приведено ниже в порядке применения.

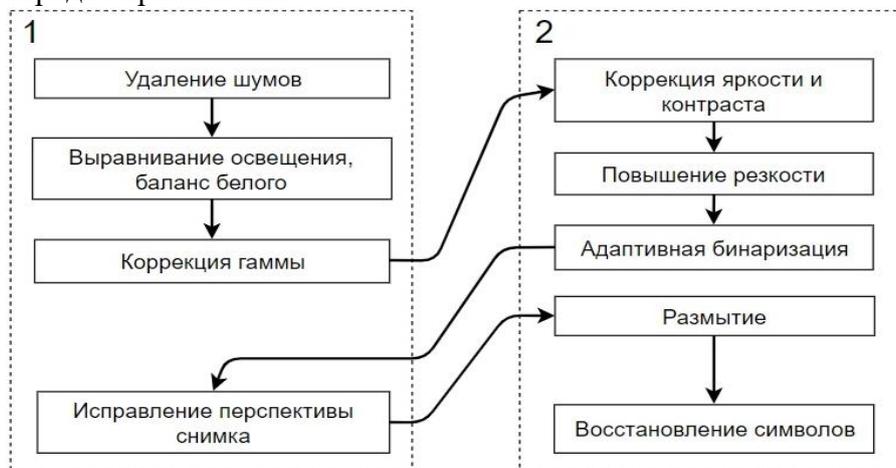


Рис. 6. Граф-схема алгоритма для коррекции и обработки изображения
 Fig. 6. Flowchart for image correction algorithm

Удаление шумов. Принцип шумоподавления состоит в том, что яркость пикселя заменяется на среднее значение яркостей похожих k пикселей (часто количество пикселей берется как $k = n^2, n \in N$). Основное отличие методов шумоподавления в способах поиска похожих пикселей на f . В данной работе использовался метод NL-средних [9] вида:

$$NL[u(p)] = \frac{1}{C(p)} \int y(d(B(p), B(q))) u(q) dq$$

Где $d(B(p), B(q))$ – евклидово расстояние между патчами (прямоугольными областями изображения), с центрами в пикселях p и q , $y(x)$ – убывающая функция, $C(p)$ – нормализующая функция, $u(p)$ – функция, определяющая схожесть пикселей p и q .

Выравнивание освещения, регулирование баланса белого. Данный метод использует последовательно алгоритмы SSR (Single Scale Retinex) [9] и Gray World [10] (рис. 7). Результат работы SSR вычисляется как

$$f := \log f - \log(f * g)$$

Для трехканального изображения алгоритм Gray World по каждому пикселю (x, y) с интенсивностями $R, B, G \in [0, 255]$ выглядит следующим образом:

$$scale = \frac{R_{avg} + B_{avg} + G_{avg}}{3}; R := \frac{R * scale}{R_{avg}}; B := \frac{B * scale}{B_{avg}}; G := \frac{G * scale}{G_{avg}}$$

Где $R_{avg}, B_{avg}, G_{avg}$ – средние значения интенсивностей каждого из каналов для f .



Рис. 7. Изображение товарного чека (а) до и (б) после выравнивания освещения и баланса белого

Fig. 7. The image of sale receipt (a) before and (b) after illumination equalization and white balance correction

Гамма-коррекция. [12,13] использует показанную ниже формулу. Где P – нормализованная средняя яркость изображения.

$$\gamma = \frac{-0.3}{lgP}$$

Далее для каждого (x, y) интенсивность p определяется с помощью

$$p := 255 \left(\frac{p}{255} \right)^\gamma$$

Коррекция яркости и контраста. Пусть A – матрица изображения. Тогда скорректированное изображение рассчитывается по формулам:

$$\alpha = \frac{255}{\max(A) - \min(A)}; \beta = -\frac{\min(A)}{\alpha}$$

$$A := \alpha A + \beta$$

Повышение резкости изображения. Повышение резкости изображения f для более четкого выделения символов выполняется с помощью лапласиана гауссиана [13,14]. Положим, что все операторы T над f определены в некоторой окрестности точки (x, y) .

Если f – дискретная функция, а $\nabla^2 f$ – двумерный оператор Лапласа, то используется приближенное вычисление производных и $\nabla^2 f$, соответственно,

$$\frac{\delta f}{\delta x} \approx f(x+1, y) - f(x, y); \quad \frac{\delta f}{\delta y} \approx f(x, y+1) - f(x, y)$$

$$\nabla^2 f \approx [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y)$$

Пусть g – гауссиан, e – единичный фильтр, a – коэффициент резкости, тогда, переходя к свертке, получим формулу для повышения резкости f

$$f + a(f - f * g) = f * ((1 + a)e - ag), \text{ где } e - g \approx \nabla^2 g - \text{лапласиан гауссиана}$$

Адаптивная пороговая бинаризация изображения. [5,16,17] Один из главных недостатков глобальной бинаризации – необходимость чрезвычайно точно подобрать коэффициент бинаризации. Алгоритм адаптивной бинаризации зависит от яркости $f(x, y)$ в точке, а не от координат точки, как в случае глобальной и локальной бинаризации.

Алгоритм рассматривает небольшое количество соседей вокруг определенного пикселя и затем определяет оптимальный коэффициент бинаризации для них. Такой подход позволяет обрабатывать различные изображения с большим разбросом яркостей, что сильно влияет на точность распознавания (рис. 8).



Рис. 8. (а) Применение пороговой бинаризации глобальной, (б) адаптивной бинаризации

Fig. 8. Applying (a) global threshold binarization, (b) adaptive threshold binarization

Поворот и пространственная коррекция изображения. Осуществлялись с помощью алгоритмов, описанных Адрианом Роусброком [17].

Первый алгоритм осуществляет преобразование перспективы прямоугольного объекта с помощью четырех опорных точек (x_k, y_k) , $k = 1 \dots 4$ на исходном изображении и матрицы M преобразования перспективы:

$$(x_k, y_k) \rightarrow \frac{1}{w} (x'_k, y'_k)$$

$$(x'_k, y'_k, w)^T = M(x_k, y_k, 1)^T, \text{ где } w = \begin{cases} w', w' \neq 0 \\ \infty, \text{ иначе} \end{cases}$$

Второй алгоритм – детектирование и коррекция наклона и смещения изображения (англ. Image Skew Detection and Correction) исправляет дефекты поворота таким образом, чтобы текст на товарном чеке был горизонтально расположен. Второй алгоритм обычно служит для небольшого дополнительного снижения отклонения текста от горизонтального расположения.

Пространственная коррекция, хотя и может внести дополнительные искажения, применяется после пороговой бинаризации и повышения резкости, поскольку именно тогда можно наиболее точно определить опорные точки для преобразования.

Размытие изображения. Небольшое размытие изображения помогает замаскировать дефекты букв и различные аберрации, полученные применением предыдущих методов. Для размытия используется алгоритм двусторонней фильтрации [18] или фильтр Гаусса. Восстановление символов с помощью морфологических преобразований.

Для изображения A восстановление символов можно провести как операцию $A \blacktriangledown B$, где B – шаблон в виде эллипса с небольшим (например, 3x4) размером матрицы. Размытие изображения и проход по изображению операцией замыкания с небольшим шаблоном помогают удалить небольшие дефекты в буквах (рис. 9).



Рис. 9. Пример символов до (а) и после (б) восстановления.

Fig. 9. Example of symbols before (a) and after (b) restoration.

Распознавание текста. Для получения информации из изображения товарного чека была использована библиотека оптического распознавания текста с открытым исходным кодом Tesseract, которая основана на предварительно тренированной модели нейронной сети. Имеется возможность дополнительно обучать нейронную сеть. В данном случае это имеет смысл, так как шрифт, используемый кассовыми аппаратами для печати на чеках специфичен, следовательно, некоторые символы могут распознаваться некорректно, или же не распознаваться вовсе (например, символ ≡).



Рис. 10. Результат распознавания текста с отмеченным расположением.

Fig. 10. Result of text recognition with marked positions.

Обсуждение результатов. Для проверки эффективности предложенного алгоритма была проведена проверка распознавания символов на товарных чеках в крупной торговой сети. Тестирующая выборка состояла из пятидесяти товарных чеков, объединенных в пять групп по десять чеков в каждой, по возрастанию величины дефектов.

В табл. 1 показано сравнение точности распознавания для разработанного алгоритма, Tesseract OCR и ABBYY FineReader

Таблица 1. Точность распознавания знаков

Table 2. Accuracy of character recognition

Алгоритм Algorithm	1-ый	2-ой	3-ий	4-ый	5-ый	Среднее значение Mean
Original OCR	0.86	0.81	0.74	0.62	0.53	0.73
ABBY FineReader	0.93	0.89	0.85	0.81	0.76	0.87
Tesseract OCR	0.86	0.76	0.67	0.58	0.41	0.67

Как видно из табл.1, качество работы разработанной системы все же уступает ABBYY FineReader, однако превосходит «чистый» Tesseract OCR.

Поскольку основная цель – бухгалтерский учет в компании или же анализ личных расходов, а названия многих товаров имеют сокращения и аббревиатуры, зачастую может быть не совсем понятно, что же написано на чеке. Также разные магазины используют разные сокращения для названий одних и тех же товаров.

Для решения данных проблем к исходному алгоритму может быть добавлена языковая модель [19-21]. Предполагается, что добавление языковой модели поможет значительно повысить точность распознавания, поскольку большинство ошибок представляют собой или отдель-

ные буквы в словах, или некорректные последовательности знаков, появившихся из-за коллизий распознавания при попытке интерпретации штрихового кода и разделительных черт (рис. 11) как последовательностей букв и цифр.



Рис. 11. Пример области товарного чека
Fig.11. Example of receipt region

Вывод. В данной работе был описан алгоритм, позволяющий распознавать текстовую информацию с товарных чеков посредством предложенной OCR-системы на основе Tesseract Engine.

Разработанная система распознает знаки с достаточно высокой точностью, и показывает результат выше, чем при распознавании оригинальным методом Tesseract, однако все же уступает точности распознавания ABBY FineReader. Также были предложены методы, предположительно позволяющие улучшить разработанный алгоритм.

Библиографический список:

1. Главная страница ABBYY FineReader, <https://www.abbyy.com/en-us/finereader/>
2. Главная страница Tesseract Open Source OCR Engine, <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>
3. Главная страница OpenCV Homepage, <https://opencv.org/>
4. Gonzalez, R., Woods, R.: Digital Image Processing, 4th edn. – Pearson, New York, 2018.
5. Bradley, D., Roth, G. Adaptive Thresholding using the Integral Image // J. Graphics Tools. – 2007. - №12. pp.13-21.
6. Suzuki, S., Keiichi A. Be. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1935. - №30(1). - p.32–46 .
7. Sklansky, J.: Finding the Convex Hull of a Simple Polygon. Pattern Recognition Letters 1(2), 79-83 (1982).
8. Sencar, H.T., Memon, N. Digital image forensics: There is more to a picture than meets the eye. Springer, New York (2013).
9. Chambolle, A., Caselles, V., Novaga, M., Cremers, D., Pock, T. An introduction to Total Variation for Image Analysis 9 (2010).
10. Ma, Z. & Wen, J. Single-scale Retinex sea fog removal algorithm fused the edge information // Jisuanji Fuzhu Sheji Yu Tuxingxue Xuebao/Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics 27. 217-225 (2015).
11. Li, B., Xu, D., Lee, M., Feng, S. A Multi-Scale Adaptive Grey World Algorithm // IEICE Transactions 90-D, 1121-1124 (2007).
12. Babakhani, R., Zarei, P. Automatic gamma correction based on average of brightness // Advances in Computer Science: an International Journal 4(6), 156-159 (2015).
13. Rahman, Sh., Rahman, Md. Mostafijur, Abdullah-Al-Wadud, M., Al-Quaderi, Golam Dastagir, Shoyaib, M. An adaptive gamma correction for image enhancement // EURASIP Journal on Image and Video Processing 35, (2016).
14. Haralick, R., Shapiro, L. Computer and Robot Vision, 1st edn, Addison-Wesley Publishing Company, Boston (1992).
15. Marr, D., Hildreth, E. Theory of Edge Detection. Proceedings of the Royal Society of London B 207, 187- 217 (1980)
16. Пелевин Е.Е., Балясный С.В. Использование метода Adaptive Threshold в системе технического зрения // Juvenis scientia. 2017. №1. С. 4-7.
17. A.Rosebrock, Practical Python and OpenCV, 3rd edn. PyImageSearch.com (2016).
18. Tomasi, C., Manduchi, R. Bilateral filtering for gray and color images // Sixth International Conference on Computer Vision, 839-846 (1998).
19. Peter Norvig's cite: How to write a spelling corrector, <https://norvig.com/spell-correct.html>, last accessed 2019/11/30.
20. Liu, X., Cheng, K., Luo, Y., Duh, K., & Matsumoto, Y. A hybrid Chinese spelling correction using language model and statistical machine translation with reranking // In Proceedings of the Seventh SIGHAN Workshop on Chinese Language Processing, 54-58 (2013).
21. Popov, V., Kudinov, M., Piontkovskaya, I., Vytovtov, P., Nevidomsky, A. Differentially Private Distributed Learning for Language Modeling Tasks (2017). arXiv, <https://arxiv.org/abs/1712.07473>

References:

1. ABBYY FineReader Homepage, <https://www.abbyy.com/en-us/finereader/>
2. Tesseract Open Source OCR Engine, <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>
3. OpenCV Homepage, <https://opencv.org/>
4. Gonzalez R., Woods, R.: Digital Image Processing, 4th edn. Pearson, New York (2018).
5. Bradley D., Roth, G.: Adaptive Thresholding using the Integral Image. J. Graphics Tools 12, 13-21 (2007).
6. Suzuki S., Keiichi A. Be.: Topological structural analysis of digitized binary images by border following. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 30(1), 32–46 (1985).
7. Sklansky J.: Finding the Convex Hull of a Simple Polygon. Pattern Recognition Letters 1(2), 79-83 (1982).
8. Sencar H.T., Memon, N.: Digital image forensics: There is more to a picture than meets the eye. Springer, New York (2013).
9. Chambolle A., Caselles V., Novaga M., Cremers D., Pock, T.: An introduction to Total Variation for Image Analysis 9 (2010).
10. Ma Z. & Wen, J.: Single-scale Retinex sea fog removal algorithm fused the edge information. Jisuanji Fuzhu Sheji Yu Tuxingxue Xuebao/Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics 27. 217-225 (2015).
11. Li, B., Xu, D., Lee, M., Feng, S.: A Multi-Scale Adaptive Grey World Algorithm. IEICE Transactions 90-D, 1121-1124 (2007).
12. Babakhani R., Zarei P.: Automatic gamma correction based on average of brightness. Advances in Computer Science: an International Journal 4(6), 156-159 (2015).
13. Rahman, Sh., Rahman, Md. Mostafijur, Abdullah-Al-Wadud, M., Al-Quaderi, Golam Dastagir, Shoyaib, M.: An adaptive gamma correction for image enhancement. EURASIP Journal on Image and Video Processing 35, (2016).
14. Haralick R., Shapiro, L.: Computer and Robot Vision, 1st edn, Addison-Wesley Publishing Company, Boston (1992).
15. Marr D., Hildreth, E.: Theory of Edge Detection. Proceedings of the Royal Society of London B 207, 187- 217 (1980)
16. Pelevin Ye.Ye., Balyasnyy S.V. Ispol'zovaniye metoda Adaptive Threshold v sisteme tekhnicheskogo zreniya // Juvenis Scientia. 2017. №1. S. 4-7. [Pelevin, E., Balyasny, S.: The usage of adaptive threshold method in the system of computer vision. Juvenis Scientia 1, 4-7 (2017). (In Russ)]
17. A.Rosebrock, Practical Python and OpenCV, 3rd edn. PyImageSearch.com (2016).
18. Tomasi, C., Manduchi, R.: Bilateral filtering for gray and color images. Sixth International Conference on Computer Vision, 839-846 (1998).
19. Peter Norvig's cite: How to write a spelling corrector, <https://norvig.com/spell-correct.html>, last accessed 2019/11/30.
20. Liu, X., Cheng, K., Luo, Y., Duh, K., & Matsumoto, Y.: A hybrid Chinese spelling correction using language model and statistical machine translation with reranking. In Proceedings of the Seventh SIGHAN Workshop on Chinese Language Processing, 54-58 (2013).
21. Popov, V., Kudinov, M., Piontkovskaya, I., Vytovtov, P., Nevidomsky, A.: Differentially Private Distributed Learning for Language Modeling Tasks (2017), <https://arxiv.org/abs/1712.07473>

Сведения об авторах:

Наздрюхин Александр Сергеевич, студент; e-mail: a.nazdryukhin@gmail.com

Храмцов Игорь Николаевич, студент; e-mail: igorxramcov@yandex.ru

Тушев Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, вычислительной техники и информационной безопасности; e-mail: tushev51@mail.ru

Information about the authors:

Alexandr S. Nazdryukhin, Student; e-mail: a.nazdryukhin@gmail.com

Igor N. Khrantsov, Student; e-mail: igorxramcov@yandex.ru

Alexandr N. Tushev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Informatics, Computer Engineering and Information Security; e-mail: tushev51@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.10.2019.

Принята в печать 07.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.10.2019.

Accepted for publication 07.11.2019.

Для цитирования: *Рогозин Е.А., Силка Д.Г., Гуляев О.А. Методика оценивания защищенности информации по техническим каналам на объекте информатизации специального назначения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 123-133. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-123-133*

For citation: *E.A. Rogozin, D.G. Silka, O.A. Gulyaev. Methodology for assessing the security of information passed through the technical channels of a special-purpose informatisation object. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 123-133. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-123-133*

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.3: 004.05

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-123-133

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ КАНАЛАМ НА ОБЪЕКТЕ ИНФОРМАТИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рогозин Е.А.¹, Силка Д.Г.¹, Гуляев О.А.²

¹ Воронежский институт Министерства внутренних дел России,
¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²АО «Аэроприбор Восход»,
²105318, г. Москва, ул. Ткацкая, д. 19, Россия

Резюме: *Цель.* В целях определения «защищенности» объекта информатизации специального назначения, необходимо провести расчёт показателей эффективности мероприятий по защите информации (ЗИ) от угроз НСД, связанных с утечкой информации по техническим каналам (по акустическому каналу). С целью определения актуальных каналов утечки информации необходимо разработать перечень действий, по нейтрализации потенциальных угроз (включая разработку системы защиты информации для объекта информатизации специального назначения). **Метод.** Оценка защищенности объекта информатизации специального назначения проводится с использованием экспертно-документального и инструментального методов. **Результат.** Приведены результаты оценивания показателей защищенности от утечки информации по воздушному (акустическому) каналу и определены аспекты совершенствования специальных мероприятий по защите информации на объекте информатизации специального назначения. **Вывод.** Направление данного исследования является весьма актуальным и требует дальнейшего развития организационно-технических мероприятий, по реализации требований нормативно правовых документов по защите информации на объектах информатизации специального назначения.

Ключевые слова: *объект информатизации специального назначения, оценка защищенности, аттестационные испытания, эффективность, утечка защищаемой информации, несанкционированное получение информации, закладные устройства*

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SECURITY OF INFORMATION PASSED THROUGH THE TECHNICAL CHANNELS OF A SPECIAL-PURPOSE INFORMATISATION OBJECT

E.A. Rogozin¹, D.G. Silka¹, O.A Gulyaev²

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

²Joint Stock Company «Aeropribor Voskhod»,

²19 Tkatskaya St., Moscow 105318, Russia

Abstract Objectives. In order to determine the security of a special-purpose informatisation object, it is necessary to calculate the effectiveness indicators of information security (IS) measures aimed at preventing unauthorised access (UA) threats associated with information leakage through technical (acoustic) channels. In order to determine the actual channels of information leakage, it is necessary to develop a list of actions to neutralise potential threats, including the development of an information protection system for a special-purpose informatisation object. **Method.** A security assessment of the special-purpose informatisation object is carried out using expert documentary and instrumental methods. **Results.** The results of evaluating the indicators of protection against information leakage through the air (acoustic) channel are presented and aspects of improving special measures for protecting information at the special-purpose informatisation object are identified. **Conclusion.** Due to its relevance, the direction of this study requires further development of organisational and technical measures to implement the requirements of regulatory documents on the protection of information in special-purpose informatisation objects.

Keywords: special purpose informatisation object, security assessment, certification tests, efficiency, leakage of protected information, unauthorised access, covert devices

ведение. Для выполнения поставленной задачи необходимо изучить исходные данные рассматриваемого объекта информатизации специального назначения. В качестве примера был рассмотрен потенциальный объект информатизации, в котором могут проходить конфиденциальные совещания, план которого изображен на (рис.1).



Рис. 1. Размещение объекта информатизации специального назначения относительно границ КЗ
Fig. 1. Placement of a special-purpose informatization object relative to the boundaries of the short circuit

В дальнейшем этот кабинет будем трактовать и интерпретировать, как объект информатизации специального назначения (ОИСН).

На ОИСН находятся следующие технические средства представленные табл.1.

Таблица 1. Технические средства
Table 1. Technical means

№	Название Name	Тип, модель Type, Model	Заводской номер Serial Number	Класс Class TC
1	Акустический модуль Acoustic module	ОП 073	ТЗИ001387	BTCC
2	Видеодвойка Video double	Samsung DVD-V8500K	6VCY902678Z	BTCC
3	Видеопроектор Video projector	Sanyo PLC-XV70	№66410747	OTCC
4	Ноутбук Laptop	Acer Aspire 4702Z	№LXAL70X00274305892	OTCC
5	Датчик пожарной сигнализации (2шт.) Fire Alarm Sensor (2pcs.)	Bolid ДИП-34А	ТЗИ 001389ТЗИ 001388	BTCC
6	Колонка акустическая Acoustic speaker	Inter M SWS-03	020216407 Л2827839	BTCC
7	Розетка электрическая Sockets	Рондо Sch. E RS16 - 121	ТЗИ 001380	BTCC
8	Акустическая система Speaker System (5 + 1) (5+1)	BBK MA-900S	АО0550514832 Л2827834	OTCC
Л1	Линия для акустического модуля ОП 073 Line for acoustic module OP 073	Двухжильный медный провод Two-core copper wire	-	-
Л2	Линия электропитания Power line	Двухжильный медный провод Two-core copper wire	-	-
Л3	Линия для оповещения посредством Inter M SWS-03 Alert line via Inter M SWS-03	Двухжильный медный провод Two-core copper wire	-	-
Л4	Линия пожарной сигнализации Fire alarm line	Двухжильный медный провод Two-core copper wire	-	-

Постановка задачи. Исходя из визуального анализа каналов утечки информации, можно сделать вывод, что на ОИСН возможна утечка информации по следующим техническим каналам: 1. по воздушному (акустическому) каналу; 2. по вибрационному каналу; 3. по параметрическому каналу; 4. по оптико-электронному каналу; 5. по электроакустическому каналу [4,5].

Кроме того, так как при проведении совещаний широко используются бумажные носители защищаемой информации, средства визуального отображения информации (монитор ПК и видеопроектор), необходимо так же рассматривать и визуальный канал утечки информации.

Таким образом, необходимо провести оценивание реальной защищенности для ОИСН от утечки информации по следующим техническим каналам: визуальному каналу; воздушному (акустическому) каналу; виброакустическому каналу; электроакустическому каналу; оптико-электронному каналу; параметрическому каналу.

Оценивание защищенности ОИСН от утечки информации по техническим каналам является составной частью мероприятий при аттестации объектов информатизации по требованиям безопасности информации, которая, в свою очередь, призвана подтвердить, что объект соответствует требованиям стандартов или иных нормативно-технических документов по безопасности информации.

Методы исследования. Для оценивания защищенности ОИСН от утечки защищаемой информации по воздушному (акустическому) каналу применялся как экспертно-документальный, так и инструментальный метод [1,3,5].

Утечка речевой информации по воздушному (акустическому) каналу возможна:

1. Через закладные устройства, установленные в ограждающих конструкциях или предметах интерьера.
2. Через закладные устройства, вмонтированные во вспомогательные технические средства.
3. Через ограждающие конструкции (двери, стены, воздуховоды, окна) путем прямого прослушивания, вследствие недостаточной звукоизоляции.

Разберем последовательно каждую возможность.

1. Однозначно говорить об отсутствии закладочных устройств, установленных в ограждающих конструкциях или предметах интерьера можно только после проведения комплекса мероприятий по поиску данных устройств – специального обследования объекта информатизации специального назначения. Результаты специального обследования оформляются актом. При изучении документации на данное помещение акт специального обследования обнаружен не был, сведения о проведении данного мероприятия отсутствуют. Следовательно, существует вероятность утечки защищаемой информации через закладные устройства, установленные в ограждающих конструкциях или предметах интерьера.

2. Специальная проверка вспомогательных технических средств проводится только для средств иностранного производства. На объекте информатизации специального назначения находятся вспомогательные технические средства (ВТСС) в составе: системы звукоусиления ВВК МА-900S, динамиков системы оповещения Inter M SWS-03 и ОП 073, видеодвойки Samsung DVD-V8500K и датчиков пожарной сигнализации Bolid ДИП-34А. Динамики системы оповещения и датчики пожарной сигнализации отечественного производства, следовательно, не подлежат обязательной специальной проверке, тем не менее, с большой вероятностью компоненты из которых состоят устройства, произведены за рубежом, поэтому специальную проверку устройства должны пройти. Система звукоусиления и видеодвойка специальную проверку проходили, об этом свидетельствуют соответствующие акты.

3. Для оценивания защищенности объекта информатизации специального назначения от утечки информации путем прямого прослушивания через ограждающие конструкции применялся комплекс «Спрут-11М». Проверка выполнения норм эффективности защиты речевой информации от утечки по акустическому каналу заключается в количественной оценке величины показателя эффективности защиты речевой информации с последующим ее сравнении с нормированными значениями [1,2].

Эффективность защиты речевой информации от утечки по акустическому каналу оценивается по одному из двух показателей: словесная разборчивость речи, определяемая в контрольных точках; распределение отношений «речевой сигнал/акустический шум» в октавных полосах частот в контрольных точках.

Контрольными точками (КТ) являются места возможной установки акустических и вибрационных датчиков аппаратуры акустической речевой разведки, или места расположения отражающих поверхностей, уязвимых для лазерного съема речевой информации (в первую очередь это оконные стекла), а также места непреднамеренного прослушивания речи, в которых производится измерение отношений «сигнал/шум».

При выборе контрольных точек необходимо строго следовать рекомендациям, изложенным в нормативно-методических документах по контролю эффективности защиты информации от акустической речевой разведки [1,5]. Возможные варианты утечки речевой информации из объекта информатизации представлены на рис.2.



Рис. 2. Утечка речевой информации из помещения
Fig. 2. Leak of speech information from the premises

В процессе аттестационных испытаний измерительный микрофон располагается на средней вертикальной линии на расстоянии от 1 до 2 метров от измеряемой ограждающей конструкции или ее участка.

Защищенность речевой информации от ее перехвата по электронно-оптическому каналу аппаратурой технической разведки считается обеспеченной, если значение контролируемого параметра, рассчитанного по результатам измерений на оконном остеклении, не превышает нормированного значения.

Контрольные точки выбираются на расстоянии 0,5 м от ограждающих конструкций на высоте 1,5 м от пола с внешней стороны объекта информатизации.

Контрольные точки изображены на рис.3, рис.4, рис.5, рис.6.

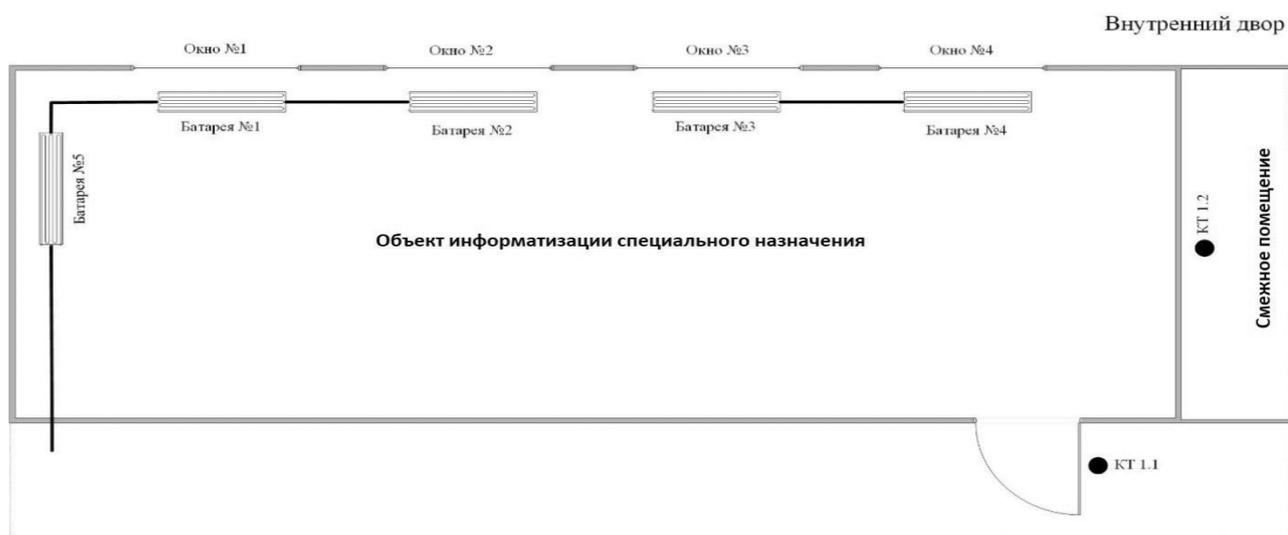


Рис. 3. Контрольные точки на стенах
Fig. 3. Control points on the walls

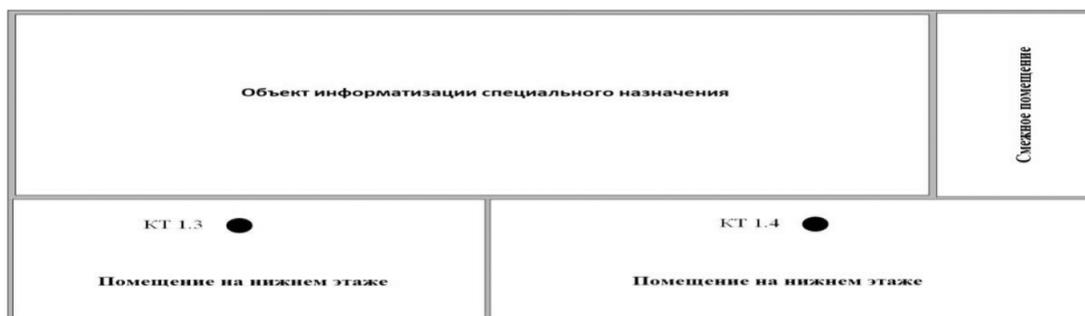


Рис. 4. Контрольные точки между этажами
 Fig. 4. Control points between floors

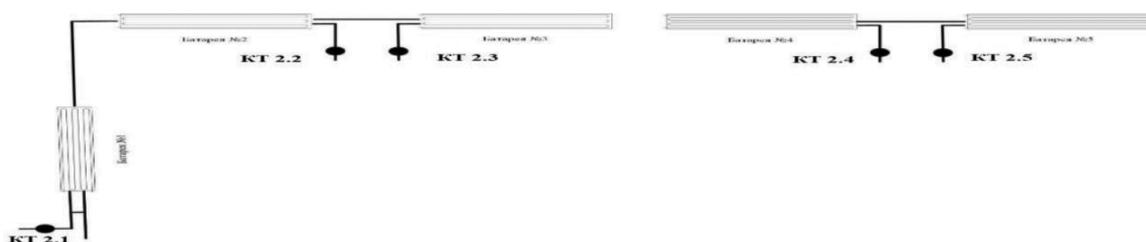


Рис. 5. Контрольные точки на трубах отопления
 Fig. 5. Test points on heating pipes

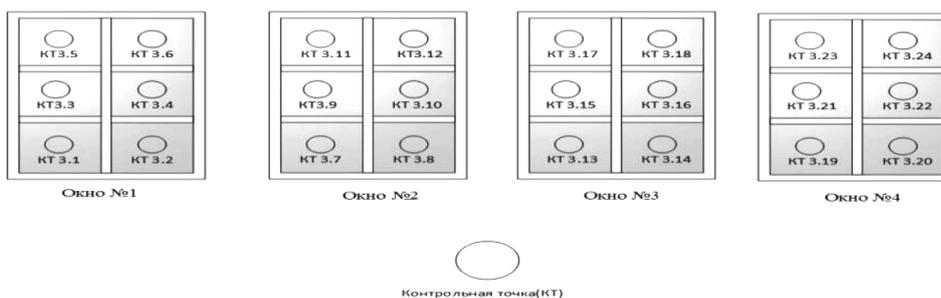


Рис. 6. Контрольные точки на окнах
 Fig. 6. Control points on the Windows

Выберем контрольные точки на внешних поверхностях ограждающих конструкций:

- Контрольная точка 1.1 – дверь ОИСН;
- Контрольная точка 1.2 – стена смежного помещения;
- Контрольная точка 1.3 – помещение на нижнем этаже;
- Контрольная точка 1.4 – помещение на нижнем этаже;
- Контрольная точка 2.1 – батарея отопления, выходящая в смежное помещение;
- Контрольная точка 2.2 – Контрольная точка 2.5 – батареи отопления, выходящие на нижний этаж;
- Контрольная точка 3.1 – Контрольная точка 3.24 – окна в ОИСН;

В связи с тем, что окна выходят на проезжую часть, существует прямая угроза для защищаемой информации, следовательно, установка акустических датчиков аппаратуры акустической речевой разведки должна быть произведена.

В результате инструментального контроля с использованием комплекса «Спрут-11М» получены данные по акустическому сигналу для помещения.

Обсуждение результатов. Ниже представлены расчеты выполнения норм эффективности защиты речевой информации от утечки по акустическому каналу для первой контрольной точки 1.1. (табл. 2).

Контрольная точка 1.1 – дверь ОИЧН на расстоянии 0,5 м от внешней поверхности двери.

Таблица 2. Результаты измерений в октавных полосах, в контрольной точке 1.1
Table 2. Measurement results in octave bands, at control point 1.1

Номер октавной полосы, i Octave band number	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц The geometric mean frequency of the octave band, Hz	Уровень акустического шума в контрольной точке $L_{ш_i}$, дБ The level of acoustic noise at the control point $L_{ш_i}$, dB	Уровень суммарного акустического сигнала и акустического шума в контрольной точке $L_{(c+w)_i}$, дБ The level of the total acoustic signal and acoustic noise at the control point $L_{(c+w)_i}$, dB
1	125	52,26	53,83
2	250	65,23	65,38
3	500	60,18	60,48
4	1000	57,50	57,89
5	2000	56,42	58,03
6	4000	61,43	61,76
7	8000	55,94	56,15

Расчеты по остальным контрольным точкам производились аналогичным образом. Данные по результатам расчетов приведены в табл. 3-5.

1. Вычисляем уровень акустического сигнала в контрольной точке 1.1 для семи октавных полос по следующей формуле:

$$L_{C_i} = 10 \lg\{10^{0,1L_{(c+w)_i}} - 10^{0,1L_{ш_i}}\}$$

$$L_{C_1} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 53,83} - 10^{0,1 \cdot 52,26}\} = 48,65$$

$$L_{C_2} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 65,38} - 10^{0,1 \cdot 65,23}\} = 50,68$$

$$L_3 = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 60,48} - 10^{0,1 \cdot 60,18}\} = 48,72$$

$$L_{C_4} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 57,89} - 10^{0,1 \cdot 57,50}\} = 47,22$$

$$L_{C_5} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 58,03} - 10^{0,1 \cdot 56,42}\} = 52,94$$

$$L_{C_6} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 61,76} - 10^{0,1 \cdot 61,43}\} = 50,40$$

$$L_{C_7} = 10 \lg\{10^{0,1 \cdot 56,15} - 10^{0,1 \cdot 55,94}\} = 42,89$$

2. Рассчитываются отношения сигнал/шум в октавных полосах.

В случае акустического сигнала:

$$E_i = L_{C_i} - L_{ш_i}$$

$$E_1 = L_{C_1} - L_{ш_1} = 48,64 - 52,26 = -5,18$$

$$E_2 = L_{C_2} - L_{ш_2} = 50,48 - 65,23 = -14,69$$

$$E_3 = L_{C_3} - L_{ш_3} = 48,65 - 60,18 = -11,75$$

$$E_4 = L_{C_4} - L_{ш_4} = 47,27 - 57,50 = -10,66$$

$$E_5 = L_{C_5} - L_{ш_5} = 52,96 - 56,42 = -5,09$$

$$E_6 = L_{C_6} - L_{ш_6} = 50,40 - 61,43 = -11,35$$

$$E_7 = L_{C_7} - L_{ш_7} = 42,88 - 55,94 = -13,26$$

Полученный результат E_i сравнивается с нормированным значением отношения «сигнал/шум» в октавных полосах $E_{Н_i}$, приведенными в табл.2 НМД АРР.

После сравнения E_i с нормированными значениями можно сделать вывод, что нормы противодействия не выполняются. Так как условие $E_i \leq E_{Н_i}$ не выполняется хотя ни для одной октавы, вычисляются октавные индексы артикуляции речи:

$$r_i = K_i \left| z - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |E_i - A_i|)^2]}{1 + 10^{0,1|E_i - A_i|}} \right|$$

где $z = \begin{cases} 0, & \text{если } E_i \leq A_i \\ 1, & \text{если } E_i > A_i \end{cases}$

A_i – формантный параметр спектра речевого сигнала в октавной полосе, дБ;

K_i – весовой коэффициент октавной полосы частот.

Таблица 3. Числовые значения формантного параметра спектра речевого сигнала $D A_i$ и весового коэффициента K_i в октавных полосах
Table 3. Numerical values of the formant parameter of the spectrum of the speech signal $D A_i$ and the weight coefficient K_i in octave bands

Наименование параметров Name of parameters	Среднегеометрические частоты октавных полос fcp.i, Гц Geometrical mean frequencies of octave bands fcp.i, Hz						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Числовое значение формантного параметра спектра речевого сигнала в октавной полосе $D A_i$, дБ The numerical value of the formant parameter of the spectrum of the speech signal in the octave band $D A_i$, dB	25	18	14	9	6	5	4
Числовое значение весового коэффициента в октавной полосе K_i The numerical value of the weight coefficient in the octave band K_i	0,01	0,03	0,12	0,2	0,3	0,26	0,07

Вычисляются октавные индексы артикуляции речи:

$$r_1 = 0,01 \left| 0 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-3,62 - 25|)^2]}{1 + 10^{0,1|-3,62-25|}} \right|$$

$$r_1 = 0,00003$$

$$r_2 = 0,03 \left| 0 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-14,75 - 18|)^2]}{1 + 10^{0,1|-14,75-18|}} \right|$$

$$r_2 = 0,02999$$

$$r_3 = 0,12 \left| 1 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-11,53 - 14|)^2]}{1 + 10^{0,1|-11,53-14|}} \right|$$

$$r_3 = 0,11845$$

$$r_4 = 0,2 \left| 1 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-10,23 - 9|)^2]}{1 + 10^{0,1|-10,23-9|}} \right|$$

$$r_4 = 0,19587$$

$$r_5 = 0,03 \left| 1 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-3,46 - 6|)^2]}{1 + 10^{0,1|-3,46-6|}} \right|$$

$$r_6 = 0,26 \left| 1 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-11,03 - 5|)^2]}{1 + 10^{0,1|-11,03-5|}} \right|$$

$$r_6 = 0,25541$$

$$r_7 = 0,07 \left| 1 - \frac{0,78 + 5,46 \exp[-4,3 * 10^{-3} (27,3 - |-13,06 - 4|)^2]}{1 + 10^{0,1|-13,06-4|}} \right|$$

$$r_7 = 0,06919$$

3. Рассчитывается интегральный индекс артикуляции речи:

$$R = \sum_{i=1}^5 r_i = 0,00003 + 0,02999 + 0,11845 + 0,19587 + 0,27912 + 0,25541 + 0,06919$$

$$= 0,94807$$

4. Рассчитывается значение показателя противодействия APP:

$$W = \begin{cases} 1,54R^{0,25}[1 - \exp(-11R)], & \text{если } R < 0,15 \\ 1 - \exp\left(-\frac{11R}{1 + 0,7R}\right), & \text{если } R \geq 0,15 \end{cases}$$

Так как $R \geq 0,15$ ($0,94807 \geq 0,15$), то значение показателя противодействия APP рассчитываю по формуле:

$$W = 1 - \exp\left(-\frac{11R}{1 + 0,7R}\right)$$

$$W = 1 - \exp\left(-\frac{11 * 0,7587}{1 + 0,7 * 0,7587}\right) = 0,998$$

Сравнив полученные в результате расчетов контрольных точек, значения показателя противодействия APP с нормированными, можно сделать вывод, что нормы не выполняются и утечка защищаемой информации возможна.

Таблица 4. Результаты показателя противодействия W по каждой из контрольных точек
Table 4. The results of the counteraction index W for each of the control points

Контрольные точки	Значение показателя противодействия W
1.1	0,998
1.2	0,984
1.3	0,911
1.4	0,863
2.1	0,932
2.2	0,933
2.3	0,992
2.4	0,845
2.5	0,654
3.1	0,922
3.2	0,885
3.3	0,931
3.4	0,936
3.5	0,988
3.6	0,943
3.7	0,954
3.8	0,978
3.9	0,922
3.10	0,935
3.11	0,993
2.12	0,954
3.13	0,995
3.14	0,934
3.15	0,911
3.16	0,945
3.17	0,966
3.18	0,987
3.19	0,945
3.20	0,957
3.21	0,924
3.22	0,876
3.23	0,968
3.24	0,890

Таблица 5. Результаты определения отношений «сигнал/шум» в октавных полосах в контрольной точке КТ1.1.

Table 5. The results of determining the signal-to-noise ratios in octave bands at the control point KT1.1.

Номер октавной полосы, i Octave band number	Уровень акустического шума в контрольной точке $L_{шi}$, дБ Acoustic noise level at the control point, $L_{шi}$, dB	Уровень суммарного акустического сигнала и акустического шума в контрольной точке $L(c+ш)_i$, дБ The level of the total acoustic signal and acoustic noise at the control point $L(s+w)_i$, dB	Уровень акустического сигнала в контрольной точке L_{ci} , дБ Acoustic signal level at the control point L_{ci} , dB	Отношение сигнал/шум в контрольной точке E_i , дБ Signal to Noise Ratio at Checkpoint E_i , dB
1	52,26	53,83	48,65	-5
2	65,23	65,38	50,68	-14
3	60,18	60,48	48,72	-11
4	57,50	57,89	47,22	-10
5	56,42	58,03	52,94	-5
6	61,43	61,76	50,40	-11
7	55,94	56,15	42,89	-13

Вывод. Таким образом, анализ результатов оценивания защищенности позволяет сделать следующий вывод, что существует реальная возможность утечки речевой информации через ограждающие конструкции, а также несанкционированное получения информации с помощью закладных устройств, установленных в ВТСС или ограждающих конструкциях. Для защиты объекта информатизации специального назначения подтверждена необходимость использования средств активной защиты информации от утечки по акустическому и виброакустическому каналам, что позволит реально повысить защищенности ОИСН.

Библиографический список:

1. Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Технические средства и методы защиты информации. М.: Машиностроение, 2009. – 507 с.
2. Хорев А.А., Защита информации от утечки по техническим каналам. Часть 1. Технические каналы утечки информации. – М.: Гостехкомиссия РФ, 1998. – 320 с.
3. Кабанов А.С. Временная модель оценивания риска нарушения информационной безопасности / А.С. Кабанов, А.Б. Лось, В.И. Трунцев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. Т. 1. № 25. С. 87-91.
4. Хорев А.А., Способы и средства защиты информации. Учебное пособие. – М.: МО РФ, 2000. – 316 с.
5. Торокин А.А.. Инженерно-техническая защита информации: Гелиос АРВ. – 2005, - 960с.
6. Бузов Г.А. Защита от утечки информации по техническим каналам : учеб. пособие / Г.А. Бузов, С.В. Калинин, А.В. Кондратьев. М.: Горячая линия Телеком, 2014. 416 с.
7. Charaf H. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2017. pp. 277–282.
8. Jasiul B. Detection and Modeling of Cyber Attacks with Petri Nets / B. Jasiul, M. Szyrka, J. Sliwa // Entropy. 2014. Vol. 16. Issue 12. pp. 6602–6623.
9. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). — 2016. pp. 133–187.
10. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы / Ю.Н. Павловский. — М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. С. 134.
11. Краснощёков П.С. Оптимизация в автоматизированном проектировании / П.С. Краснощёков, В.В. Морозов, Н.М. Попов. М.: МАКС Пресс, 2008. 323 с.
12. Nikishin K. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri NET / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp. 1–5.
13. Korniyenko B.Y. Design and research of mathematical model for information security system in computer network / B.Y. Korniyenko, L.P. Galata // Science-Based Technologies. 2017. Vol. 34. Issue 2. pp. 114–118.
14. White S.C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S.C. White, S.S. Sarvestani // Advances in Computers. 2014. Vol. 94. pp. 1–24.

References:

1. Zaytsev A.P., Shelupanov A.A., *Tekhnicheskiye sredstva i metody zashchity informatsii*. M.: Mashinostroyeniye, 2009. – 507 s. [Zaitsev AP, Shelupanov AA, Technical means and methods of information protection. M.: Engineering, 2009. 507 p. (In Russ)]
2. Khorev A.A., *Zashchita informatsii ot utechki po tekhnicheskim kanalim. Chast' 1. Tekhnicheskiye kanaly utechki informatsii*. – M.: Gostekhkomissiya RF, 1998. – 320 s. [Khorev AA, Protection of information from leakage through technical channels. Part 1. Technical channels of information leakage. - M.: State Technical Commission of the Russian Federation, 1998. -320 p. (In Russ)]
3. Kabanov A.S. *Vremennaya model' otsenivaniya riska narusheniya informatsionnoy bezopasno-sti* / A.S. Kabanov, A.B. Los', V.I. Truntsev // *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo univer-siteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2012. T. 1. № 25. S. 87-91. [Kabanov A.S. A temporary model for assessing the risk of information security breach / A.S. Kabanov, A.B. Moose, V.I. Truntsev // *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2012.V. 1. No. 25. pp. 87-91. (In Russ)].
4. Khorev A.A., *Sposoby i sredstva zashchity informatsii. Uchebnoye posobiye*. – M.: MO RF, 2000. – 316 s. [Khorev AA, Methods and means of information protection. Tutorial. - M.: MO RF, 2000. 316 p. (In Russ)].
5. Torokin A.A., *Inzhenerno-tekhnicheskaya zashchita informatsii: Gelios ARV*. – 2005, - 960s. [Torokin A.A. Engineering and technical information protection: Helios ARV. 2005, 960p. (In Russ)].
6. Buzov G.A. *Zashchita ot utechki informatsii po tekhnicheskim kanalim : ucheb. posobiye* / G.A. Bu-zov, S.V. Kalinin, A.V. Kondrat'yev. M.: Goryachaya liniya Telekom, 2014. 416 s. [Buzov G.A. Protection against information leakage through technical channels: textbook. allowance / G.A. Buzov, S.V. Kalinin, A.V. Kondratyev. M.: Hotline Telecom, 2014.416 p. (In Russ)]
7. Charaf H. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // *4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2017. pp. 277–282.
8. Jasiul B. Detection and Modeling of Cyber Attacks with Petri Nets / B. Jasiul, M. Szpyrka, J. Sliwa // *Entropy*. 2014. Vol. 16. Issue 12. pp. 6602–6623.
9. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. 2016. pp. 133–187.
10. Pavlovskiy YU.N. *Imitatsionnyye modeli i sistemy* / YU.N. Pavlovskiy. — M.: Fazis: VTS RAN, 2000. — S. 134. [Pavlovsky Yu. N. Simulation models and systems / Yu. N. Pavlovsky. M.: Fazis: VC RAN, 2000. 134 p. (In Russ)].
11. Krasnoshchokov P.S. *Optimizatsiya v avtomatizirovannom proyektirovanii* / P.S. Krasnoshchokov, V.V. Morozov, N.M. Popov. M.: MAKS Press, 2008. 323 s. [Krasnoshchekov P.S. Optimization in computer-aided design / P.S. Krasnoshchekov, V.V. Morozov, N.M. Popov. M.: MAKS Press.] 2008. 323 p. (In Russ)]
12. Nikishin K. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri NET / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2017. pp. 1–5.
13. Korniyenko B.Y. Design and research of mathematical model for information security system in computer network / B.Y. Korniyenko, L.P. Galata // *Science-Based Technologies*. 2017. Vol. 34. Issue 2. pp. 114–118.
14. White S.C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S.C. White, S.S. Sarvestani // *Advances in Computers*. 2014. Vol. 94. pp. 1–24.

Сведения об авторах:

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

Силка Дмитрий Григорьевич, инженер-электроник отдела информационно технического обеспечения учебного процесса; e-mail: sdg.silka@gmail.com

Гуляев Олег Анатольевич, генеральный директор, e-mail: aerovoskhod@sovintel.ru

Information about the authors:

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

Dmitry G. Silka, electronic engineer of the Department of Information and Technical Support of the Educational process; e-mail: sdg.silka@gmail.com

Oleg A.Gulyaev, General Director, e-mail: aerovoskhod@sovintel.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2019.

Принята в печать 14.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10.2019.

Accepted for publication 14.11.2019.

Для цитирования: Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4): 134-142. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142

For citation: B.I. Shakhtarin, T.G. Aslanov, Tetakaev U.R. Determination of earthquake focus coordinates using the Cassini oval method with second- and fourth-order Hyperbola figures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 134-142. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИГУР ЧЕТВЕРТОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКА – ОВАЛА КАССИНИ И ГИПЕРБОЛЫ

Шахтарин Б.И.¹, Асланов Т.Г.², Тетакаев У.Р.²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
¹105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Россия

² Дагестанский государственный технический университет,
²367026, г. Махачкала, пр.И.Шамиля,70, Россия

Резюме: Цель. Целью исследования является определение зависимостей, получаемых при определении координат гипоцентра землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядков. **Метод.** Проводится сравнительный анализ определения координат очага землетрясения с использованием метода овала Кассини, с учетом ошибок в показаниях сейсмодатчиков и без них. **Результат.** Предложен новый метод определения координат гипоцентра землетрясения использующий при расчетах фигуры четвертого порядка – овал Кассини. Получен график распределения ошибок в определении координат очага землетрясения (с использованием овала Кассини) в зависимости от взаимного расположения двух сейсмодатчиков при различных значениях их ошибок в определении разностей времен пробега сейсмических волн. **Вывод.** Результаты расчета по предложенному авторами методу не зависят от знака ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн, и, следовательно, подходит для первоначального определения координат гипоцентра землетрясения, и сравнения его с результатами других методов для выявления знака ошибки.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмодатчик, сфера, гиперболоид, уравнение, метод эллипсоидов, овал Кассини, ошибка

DETERMINATION OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATES USING THE CASSINI OVAL METHOD WITH SECOND- AND FOURTH-ORDER HYPERBOLA FIGURES

B.I. Shakhtarin¹, T.G. Aslanov², Tetakaev U.R.²

¹*Bauman Moscow State Technical University,*

¹*5 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia,*

²*Daghestan State Technical University,*

²*70. I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia*

Abstract. Objectives. To study the dependencies obtained when determining the coordinates of an earthquake hypocentre using the figures of fourth and second orders. **Method.** A comparative analysis of determining the coordinates of the earthquake focus using the Cassini oval method, both taking errors in the readings of seismic sensors into account and ignoring them, is presented. **Result.** A new method is proposed for determining the coordinates of the earthquake hypocentre, which uses the fourth-order figure, the Cassini oval, in the calculations. A graph is obtained for the distribution of errors in determining the coordinates of the earthquake focus (using the Cassini oval) depending on the relative position of two seismic sensors with different values of their errors in determining the difference in travel times of seismic waves. **Conclusion.** Since the calculation results are independent of the error sign in determining the difference in the arrival times of seismic waves, the method is suitable for the initial determination of the coordinates of the earthquake hypocentre as well as for comparison with the results of other methods for identifying the error sign.

Keywords: earthquake, seismic sensor, sphere, hyperboloid, equation, ellipsoid method, Cassini oval, error

Введение. В настоящее время известны методы определения координат гипоцентра землетрясения использующие при расчетах фигуры второго порядка: сфера, эллипс и гипербола [1-4]. В методе гипербол, при расчетах, используются разности времен пробега одного типа сейсмической волны в двух направлениях, на два разнесенных сейсмодатчика, что приводит к значительным ошибкам по сравнению с методом сфер, где используются разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн к одному сейсмодатчику [5-15].

По методу эллипса, для определения координат очага землетрясения можно использовать как сумму двух расстояний от сейсмодатчиков до линии положения гипоцентра землетрясения (предварительно вычисленных методом сфер), так и с использованием сферы и разности времен пробега сейсмической волны до двух сейсмодатчиков. При этом оценить величину ошибки в определении разности времен пробега сейсмических волн не представляется возможным, т.к. количество составляющих ошибок в определении разности времен – три (на три разнесенных сейсмодатчика), а уравнений для определения координат – два [1-4]. Для оценки ошибок необходимо разработать метод определения координат гипоцентра землетрясения, не использующий в расчетах разности (сумму) расстояний от очага землетрясения до сейсмодатчиков, так как это может привести вырождению уравнений, по которым производится расчет ошибок. Указанного недостатка лишен метод, использующий в своей основе фигуру четвертого порядка – овал Кассини [16].

В работе приводятся математические зависимости, позволяющие построить распределение ошибок в определении гипоцентра землетрясения по методу овала Кассини.

Постановка задачи. Для оценки ошибок в определении координат очага землетрясения, в зависимости от взаимного расположения сейсмодатчиков, используются значения скоростей сейсмических волн, разности времен пробега сейсмических волн на сейсмодатчик и заданная величина ошибки в определении разности времен.

По данным с учетом ошибки и без нее определяются два гипоцентра и ошибка в определении координат гипоцентра. Проведен анализ влияния взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения в пространстве на точность определения координат очага с использованием фигуры четвертого порядка – овала Кассини.

Методы исследования. В работах [2-4] рассматриваются вопросы влияния пространственного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения на ошибки определения координат эпицентра и гипоцентра. Причем, в начале рассматриваются ошибки в определении гипоцентра в зависимости от перемещения одного из сейсмодатчиков на плоскости, проходящей через его начальное положение и неподвижные гипоцентр и другой сейсмодатчик, а после, и от результата пересечения фигур (сфер), соответствующих геометрическим местам положения гипоцентров землетрясения, определяемых по разностям времен пробега продольной и поперечной волн на сейсмостанции – окружности и третьего сейсмодатчика.

Геометрическим местом точек пересечения гиперболоида и овала Кассини, при условии размещения фокусов гиперболоида и овала Кассини на одной прямой является окружность.

Для нахождения координат очага землетрясения, необходимо использовать данные с третьего сейсмодатчика, который не должен находиться на одной прямой с первыми двумя. Если по третьему сейсмодатчику определить расстояние до очага землетрясения по разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн, то геометрическим местом положения очага землетрясения будет сфера. Точка пересечения этой сферы с линией пересечения гиперболоида и овала Кассини и является очагом землетрясения. Анализ ошибок, возникающих при пересечении окружности со сферой, рассмотрены в работе [2].

Пусть сейсмодатчики 1 и 2 (рис.1) расположены в точках S_1 и S_2 . Для удобства расчетов, расположим сейсмодатчик S_1 в начале координат, и примем его за опорный.

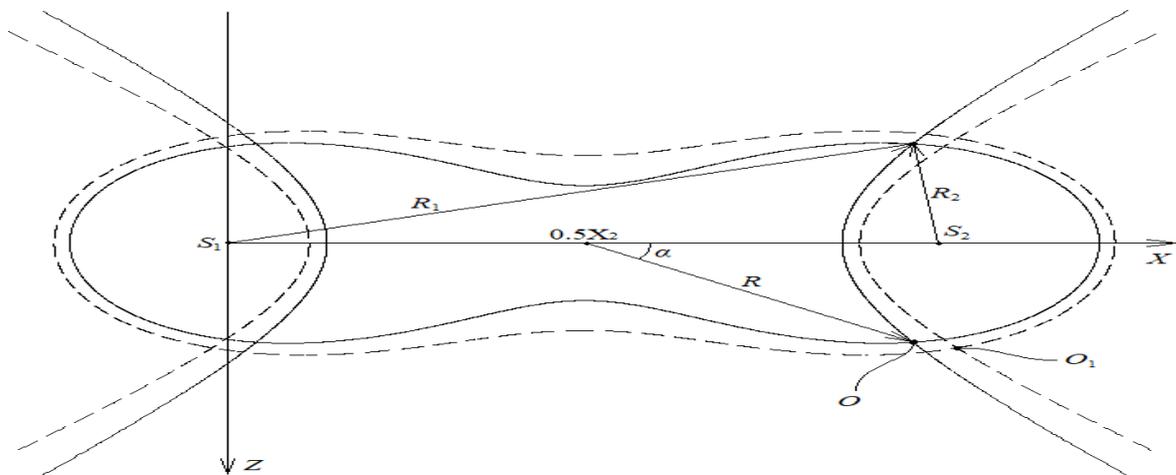


Рис.1. Геометрическое представление определения координат с использованием овала Кассини и гиперболы

Fig. 1. Geometric representation of coordinate determination using Cassini oval and hyperbola

На рис. 1 приведены геометрические соотношения, возникающие при определении координат очага землетрясения с использованием овала Кассини и гиперболы.

В отличие от других методов определения координат гипоцентра землетрясения, в предлагаемом методе используется полярная система координат с центром, расположенном не в точке нахождения опорного сейсмодатчика, а в середине отрезка между двумя сейсмодатчиками. На рис.1, сплошной линией изображены кривые, вычисленные без ошибок, а пунктирной линией с ошибкой в определении разности времен прихода сейсмических волн. Точке O соответствуют координаты гипоцентра землетрясения без ошибок, а точке O_1 при их наличии. Расстояния R_1 и R_2 определяют овал Кассини как квадрат постоянной величины их произведения, и гиперболы как двойная постоянная величина разности расстояний.

Расстояние от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения по разности времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам, может быть вычислено по уравнению гиперболы в полярных координатах [18]:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{X_2^2(t_r V_1)^2 - (t_r V_1)^4}{X_2^2 \cos^2(\alpha) - (t_r V_1)^2}}, \quad (1)$$

где: X_2 – координата второго сейсмодатчика;
 t_r – разность времен прихода продольной сейсмической волны к двум сейсмодатчикам;
 V_1 – скорость распространения продольной сейсмической волны;
 α – полярный угол определяющий через расстояние R множество точек возможного расположения очага землетрясения образующих кривые второго и четвертого порядка – гиперболу и овал Кассини.
 а также по овалу Кассини в полярных координатах:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{X_2^2 \cos(2\alpha) \pm \sqrt{X_2^4 \cos^2(2\alpha) + 16R_1^2 R_2^2 - X_2^4}}, \quad (2)$$

где: $R_1 = V_1 V_2 t_1 / (V_1 - V_2)$;
 $R_2 = V_1 V_2 t_2 / (V_1 - V_2)$;
 V_2 – скорость распространения поперечной сейсмической волны;
 t_1 – разность времен прихода поперечной и продольной сейсмических волн к опорному сейсмодатчику;
 t_2 – разность времен прихода поперечной и продольной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику.
 Для нахождения координат гипоцентра землетрясения приравняем выражения (1) и (2).
 Имеем:

$$\left(\frac{X_2^2(t_r V_1)^2 - (t_r V_1)^4 + (t_r V_1)^2 X_2^2 \cos 2\alpha - X_2^4 \cos^2 \alpha \cos 2\alpha}{(t_r V_1)^2 - X_2^2 \cos^2 \alpha} \right)^2 - X_2^4 \cos^2 2\alpha - 16R_1^2 R_2^2 + X_2^4 = 0. \quad (3)$$

После некоторых преобразований получим

$$a \cos^2 2\alpha + b \cos 2\alpha + c = 0, \quad (4)$$

где:

$$\begin{aligned} a &= 4(t_r V_1)^4 X_2^4 - 4(t_r V_1)^2 X_2^6 - 16R_1^2 R_2^2 X_2^4 + X_2^8; \\ b &= 12(t_r V_1)^4 X_2^4 - 8(t_r V_1)^6 X_2^2 + 64R_1^2 R_2^2 X_2^2 (t_r V_1)^2 - 8(t_r V_1)^2 X_2^6 - 32R_1^2 R_2^2 X_2^4 + 2X_2^8; \\ c &= 4(t_r V_1)^8 - 8(t_r V_1)^6 X_2^2 - 64R_1^2 R_2^2 (t_r V_1)^4 + 8(t_r V_1)^4 X_2^4 + 64R_1^2 R_2^2 X_2^2 (t_r V_1)^2 - 4(t_r V_1)^2 X_2^6 - 16R_1^2 R_2^2 X_2^4 - X_2^8. \end{aligned}$$

Тогда угол α может быть найден по выражению:

$$\alpha = \frac{\arccos\left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)}{2}.$$

После подстановки α в уравнение (1) и рассчитав расстояние до гипоцентра землетрясения можно вычислить глубину очага землетрясения и эпицентральное расстояние по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z &= R \sin \alpha ; \\ X &= R \cos \alpha . \end{aligned}$$

Для анализа зависимости ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения преднамеренно введем ошибки в определении разности времен пробега сейсмических волн Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 :

$$\begin{aligned} t'_1 &= t_1 + \Delta_1 ; \\ t'_2 &= t_2 + \Delta_2 ; \\ t'_r &= t_r + \Delta_3 . \end{aligned}$$

При этом, Δ_3 – ошибка в определении разности времен пробега сейсмической волны от очага землетрясения до разнесенных в пространстве сейсмодатчиков S_1 и S_2 , Δ_1 и Δ_2 – ошибка в определении разности времен пробега поперечной и продольной сейсмической волны до сейсмодатчика.

В результате внесения преднамеренных ошибок получим значение R' , соответствующий расстоянию от середины отрезка между двумя сейсмодатчиками до очага землетрясения с какой-то ошибкой, равной разности расстояний R и R' .

На рис.2 приведены зависимости ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения от взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения на плоскости, проходящей через два сейсмодатчика и гипоцентр землетрясения.

Рис.2, *а* и *б* соответствуют ошибкам, направленным в сторону увеличения расстояния от сейсмодатчиков до очага землетрясения.

Рис. 2, *в* и *г* соответствуют случаю, когда знаки ошибок измеренных разностей времен прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам противоположны разностям времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн к двум сейсмодатчикам.

Рис. 2, *д* и *е* соответствуют случаю, когда знаки ошибок измерений разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику противоположны разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн к опорному сейсмодатчику и разности времени прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам.

Рис. 2, *ж* и *з* соответствуют случаю, когда знаки ошибок измерений разности времен прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам и продольной и поперечной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику, противоположны разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн к опорному сейсмодатчику.

При моделировании, инструментальная ошибка измерения разностей времен пробега сейсмических волн к сейсмодатчикам, принята равной 0,5 с.

Кривым 1, 2 и 3 соответствуют удаления эпицентра землетрясения от опорного сейсмодатчика на расстояния 100, 200 и 300 км, соответственно, а глубина очага землетрясения принята равной 10 км.

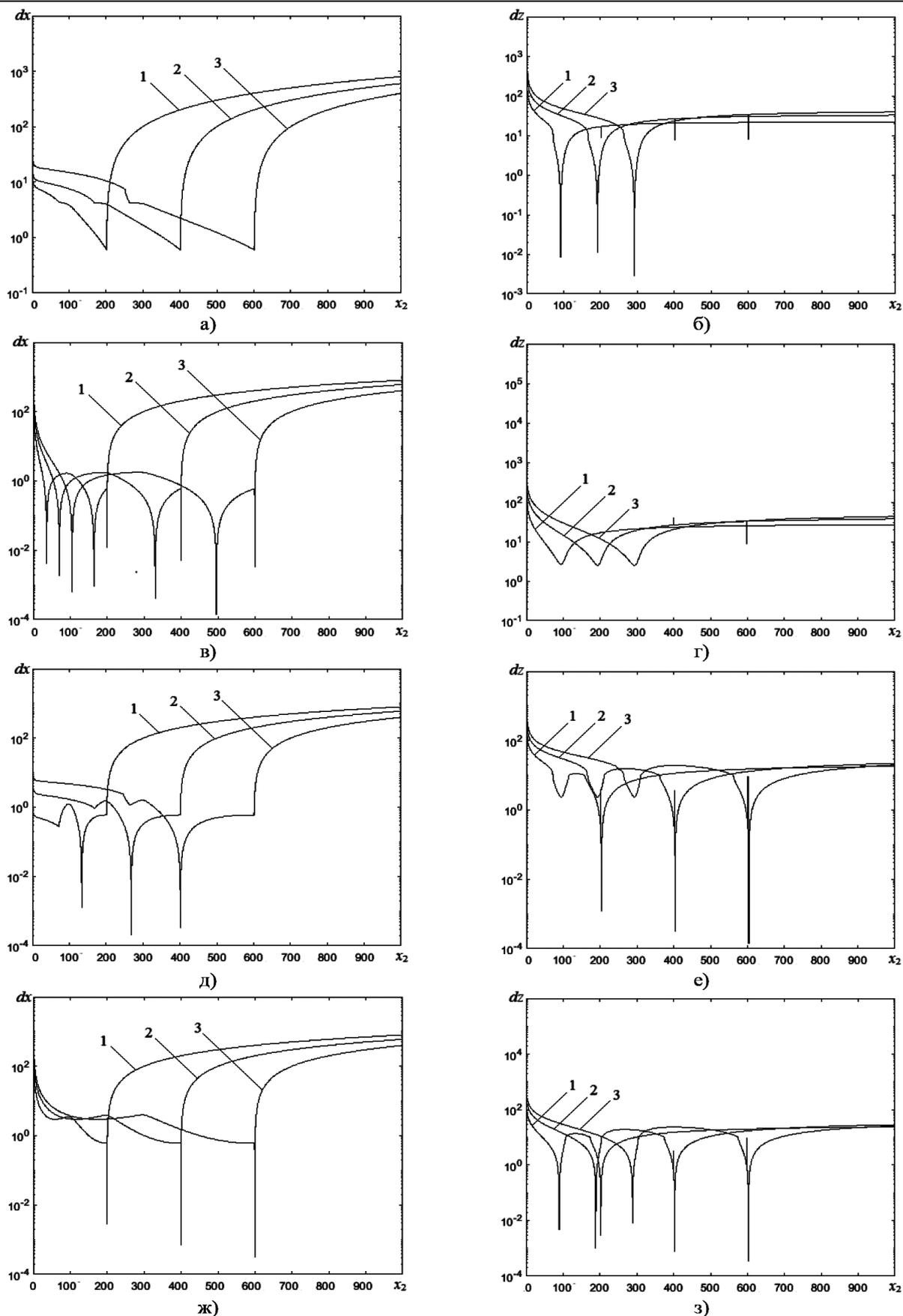


Рис. 2. Ошибки в определении координат очага землетрясения в плоскости, проходящей через два сейсмодатчика и гипоцентр землетрясения
 Fig. 2. Errors in determining the coordinates of the earthquake source in a plane passing through two seismic sensors and the earthquake hypocenter

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы предложен метод определения координат очага землетрясения комбинированным методом, в котором используются кривая четвертого порядка – овал Кассини и кривая второго порядка – гипербола. Получена зависимость ошибки определения глубины и координат эпицентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения сейсмодатчиков и гипоцентра.

В статье рассматривается пример, когда фигура второго порядка гипербола получена как разность времен прихода сейсмической волны к двум разнесенным в пространстве сейсмодатчикам, а овал Кассини как произведение расстояний от двух сейсмодатчиков до очага землетрясения.

В то же время, гиперболу можно определить как разность расстояний рассчитанных по методу сфер, а овал Кассини - как произведение расстояния от очага землетрясения до сейсмодатчика, на тоже расстояние с приращением расстояния, полученного от разности времен пробега сейсмической волны на разнесенные в пространстве сейсмодатчики умноженное на скорость сейсмической волны.

Применение предложенного метода позволяет определять координаты очага землетрясения при отсутствии данных об одном из типов волн (продольной или поперечной) на одном из сейсмодатчиков. Предложенный метод может быть использован для первоначального выбора сейсмодатчиков на местности для определения координат гипоцентра землетрясения.

Выводы. При расположении сейсмодатчиков как по одну сторону, так и по разные стороны от эпицентра землетрясения, предложенный метод позволяет определять координаты очага землетрясения с меньшими ошибками, по сравнению с известными методами, на больших расстояниях не зависимо от знака ошибки [1, 3].

Результаты расчета по предложенному методу не зависят от знака ошибки в определении разностей времен прихода сейсмических волн, следовательно, следовательно, результаты расчета могут быть использованы для первоначального определения координат гипоцентра землетрясения, и сравнения его с результатами других методов для выявления знака ошибки.

На рис. 2, из-за наличия ошибок в измерении времени прихода сейсмических волн, и в связи с близким расположением сейсмодатчиков, графики изменения ошибок стремятся к бесконечности из-за преобразования гиперболы в эллипс, в результате чего эллипс и овал Кассини, не пересекаются.

Предложенный метод применим также для определения координат объектов в навигационных системах, где для расчета координат объектов используются методы сфер или гиперболоидов.

Библиографический список:

1. Shearer P.M. Introduction to Seismology. Cambridge University Press; 2009. 412 p.
2. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Магомедов Х.Д. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (43), 2016 – Махачкала: ДГТУ, 2016. – С. 73-84.
3. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44(2): 118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
4. Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. №11, Том 72. 2018. – С 503-509.
5. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning/ S. D'Amico – InTech. Janeza Trdine, 2012. – 460 p.
6. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3
7. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.
8. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.
9. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.
10. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие / Т.Б. Яновская – Санкт-Петербург, 2008. - 222 с.

11. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография / О.В. Мкртычев — М.: МГСУ, 2010. — 152 с.
12. Шахриманьян М.А., Нигметов Г.М., Сосунов И.В. Математическое моделирование как способ поддержки принятия решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций // Каталог «Пожарная безопасность» - 2003. – С. 240-241.
13. Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров далеких землетрясений / Вулканология и сейсмология – 1994 – С. 68-79
14. Асланов Т.Г., Даниялов М.Г., Магомедов Х.Д., Асланов Г.К. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН, Материалы. Издательство ДНЦ РАН. Махачкала 2010. – С. 54-59.
15. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
16. Казаков А.Я., Жихарева А.А. Аналитическая геометрия [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Казаков А.Я. – Электронное учебное пособие для вузов, 2014. – 47 с. – Режим доступа: http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – ЭБС СПГУТД (Дата обращения: 20.08.2016)

References:

1. Shearer P.M. Introduction to Seismology. Cambridge University Press; 2009. 412 p.
2. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Magomedov Kh.D. Vliyanie prostranstvennogo raspolozheniya seismodatchikov na tochnost' opredeleniya gipotsentra zemletryaseniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;4(43):73-84. [Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Magomedov Kh.D. Influence of seismic sensor spatial configuration onto earthquake hypocenter definition accuracy. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;4(43):73-84. (in Russ.)]
3. Aslanov T.G. Definition of earthquake focus coordinates using a combined method. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(2):118-125. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
4. Shakhhtarina B.I., Aslanov G.K., Aslanov T.G. Determination of the earthquakes centre coordinates using second order figures: ellipse and hyperbola // Automation. Modern technologies. №11, T. 72. 2018. – P. 503-509.
5. D'Amico S. (Ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning. InTech; 2012. 460 p.
6. Robert Garotta. Poperechnye volny: ot registratsii do interpretatsii. Kratkiy kurs lektsiy dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya №3. 2000. [Robert Garotta. Transversal waves: from registration to interpretation. Short lecture course for Higher Education Institutions. Series №3. 2000. (in Russ.)]
7. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory. University of Utah; 2007. 154 p.
8. Kasahara K. Earthquake mechanics. Cambridge University Press; 1981. 272 p.
9. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media. Australian National University Press; 2009. 298 p.
10. Yanovskaya T.B. Osnovy seysmologii: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg; 2008. 222 s. [Yanovskaya T.B. Seismology fundamentals: a tutorial. Saint-Petersburg; 2008. 222 p. (in Russ.)]
11. Mkrtychev O.V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynykh vozdeystviyakh. M.: MGSU; 2010. 152 s. [Mkrtychev O.V. Safety of buildings and constructions during seismic and emergency impacts. Moscow: MGSU; 2010. 152 p. (in Russ.)]
12. Shakhriman'yan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoe modelirovanie kak sposob podderzhki prinyatiya resheniy v sluchae vznikoveniya chrezvychaynykh situatsiy. Katalog «Pozharnaya bezopasnost'»; 2003. S. 240-241. [Shakhriman'yan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a method of decision-making support in case of emergency situation arising. Catalogue —Fire safety]]; 2003. P. 240-241. (in Russ.)]
13. Burmin V.Yu. Novyy podkhod k opredeleniyu parametrov gipotsentrov dalekikh zemletryaseniya. Vulkanologiya i seysmologiya. 1994;1:68-79. [Burmin V.Yu. A new approach for the determination of remote earthquake hypocenter parameters. Vulcanology and seismology. 1994;1:68- 79. (in Russ.)]
14. Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniem skorostey seysmicheskikh voln. Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN, Materialy. Makhachkala: Izdatelstvo DNTs RAN; 2010. 54-59. [Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. About the method of seismic center determination with simultaneous definition of speeds of seismic waves. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Makhachkala: DSCRAS Publ.; 2010. 54-59. (In Russ.)]
15. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
16. Kazakov A.Ya., Zhikhareva A.A. Analiticheskaya geometriya [Elektronnyy resurs]: Elektronnoe uchebnoe posobie dlya vuzov; 2014. 47 s. Rezhim dostupa: http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – EBS SPGUTD (Data obrashcheniya: 20.08.2016). [Kazakov A.Ya., Zhikhareva A.A. Analytical geometry [Electronic resource]: Electronic tutorial for Higher Education Institutions; 2014. 47 p. Available at:

http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – EBS SPGUTD (Access date: 20.08.2016). (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Автономные информационные и управляющие системы»; e-mail: shakhtarin@mail.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: tabasik@gmail.com

Тетакаев Умар Резванович, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: umar_tetakaev@mail.ru

Information about the authors:

Boris I. Shakhtarin, Dr.Sci. (Technical), Prof., Department «Autonomous Information and Control Systems»; e-mail: shakhtarin@mail.ru

Tagirbek G.Aslanov, Cand. Sci. (Technical), Doctoral Cand., Head of Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: tabasik@gmail.com

Umar R.Tetakaev, Cand. Sci. (Technical), Senior Lecture, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: umar_tetakaev@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.10.2019.

Принята в печать 22.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.10.2019.

Accepted for publication 22.11.2019.

Для цитирования: Айдемиров К.Р., Агапов В.П. Исследование влияния трещин на несущую способность железобетонных плит с помощью вычислительного комплекса ПРИНС. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4):143-154. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-143-154

For citation: K.R. Aydemirov, V.P. Agapov. Study of the influence of cracks on the bearing capacity of reinforced concrete plates using the prins calculation complex. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4):143-154. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-143-154

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-143-154

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИНС

Айдемиров К.Р.¹, Агапов В.П.²

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

²Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет,

²1129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрена конечно-элементная методика определения несущей способности железобетонных плит с дефектами в виде трещин с целью определения остаточного запаса прочности. **Метод.** Методика основана на использовании алгоритмов расчета конструкций с учетом физической нелинейности, реализованных в программе ПРИНС. Эти алгоритмы предполагают использование одной и той же расчетной схемы в процессе решения задачи. Однако специфика поставленной задачи заключается в том, что расчетные схемы исходной конструкции и конструкции с трещинами различаются. **Результат.** С учетом этого обстоятельства алгоритмы нелинейного расчета конструкций по программе ПРИНС были дополнены опцией, позволяющей менять параметры расчетной схемы в процессе сквозного расчета. Для исследования несущей способности железобетонных плит используются многослойные конечные элементы, для каждого из которых задается определенный пакет материалов. Модернизация расчетной схемы в данном случае заключается в замене одного пакета материалов на другой. Входной файл программы ПРИНС дополняется описанием трещин с указанием мест их расположения и всех необходимых характеристик. Приводятся примеры определения несущей способности плиты с дефектами в виде трещин при различных граничных условиях. **Вывод.** Использование перестраиваемой расчетной схемы при сквозном расчете позволяет эффективно решать задачу по определению несущей способности железобетонных плит с дефектами в виде трещин. Это даст возможность эксплуатационным службам отслеживать изменение несущей способности зданий и сооружений, содержащих железобетонные плиты, при возникновении дефектов в виде трещин, определять работоспособность конструкций и принимать обоснованные решения в случае необходимости ремонта.

Ключевые слова: строительные сооружения; плиты; метод конечных элементов; нелинейность; несущая способность; программное обеспечение

BUILDING AND ARCHITECTURE

STUDY OF THE INFLUENCE OF CRACKS ON THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE PLATES USING THE PRINS CALCULATION COMPLEX

K.R. Aydemirov¹, V.P. Agapov²

¹*Daghestan State Technical University,*

¹*70 Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,*

²*National Research Moscow State University of Civil Engineering,*

²*26 Yaroslavl Highway, Moscow 129337, Russia*

Abstract. Objectives. *In order to determine a residual safety factor, a finite element method is considered for determining the bearing capacity of reinforced concrete plates having defects in the form of cracks. Method.* *The methodology is based on the use of structural calculation algorithms that take physical nonlinearity implemented in the PRINS programme into account. These algorithms assume the use of the same computational scheme in the process of solving the problem. However, the specificity of the task consists in considering differences between the calculation schemes of the initial structure and the structure having cracks. Result.* *With this in mind, the algorithms of nonlinear structural analysis according to the PRINS programme are supplemented with an option that allows the parameters of the design scheme to be changed in an end-to-end calculation process. Multilayer finite elements are used to study the load-bearing capacity of reinforced concrete plates, each having a specific material package. The modernisation of the design scheme in this case consists in replacing one package of materials with another. The input file of the PRINS programme is supplemented by a description of cracks with an indication of their location and all other relevant characteristics. Examples of problems arising when determining the bearing capacity of a plate with defects in the form of cracks under various boundary conditions are given. Conclusion.* *The problem of determining the bearing capacity of reinforced concrete plates with defects in the form of cracks can be effectively solved using a reconfigurable design scheme for end-to-end calculation. In the event of defects appearing in the form of cracks, this will enable operational services to monitor changes in the bearing capacity of buildings and structures containing reinforced concrete plates, as well as to determine the operability of structures and make substantiated decisions in case of repair.*

Keywords: *building structures, plates, finite element method, nonlinearity, load bearing capacity, software*

Введение. При образовании трещин в железобетонных конструкциях возникает вопрос о возможности дальнейшей эксплуатации этих конструкций, поэтому оценка влияния трещин на величину несущей способности сооружений имеет большое практическое значение. Понимание этого фактора привело к появлению большого количества работ как теоретического, так и экспериментального характера.

В большинстве теоретических работ рассматривается методика расчета железобетонных конструкций с учетом физической и конструктивной нелинейности, поскольку без учета этих двух факторов учесть влияние трещин на несущую способность расчетным способом невозможно. Трещины возникают в конструкции, когда напряжения в материале выходят за пределы упругости (физическая нелинейность), а после возникновения трещин меняется конструктивная схема сооружения (конструктивная нелинейность).

Расчет конструкций ведется методами строительной механики (в широком смысле этого слова), а так как обязательной частью такого расчета является использование физических уравнений для материала конструкции, то большинство авторов теоретических исследований основное внимание уделяют именно этому аспекту [1-7]. К сожалению, большая часть результатов упомянутых выше теоретических исследований представлена в виде, непригодном для непосредственного использования на практике, поскольку инженерам нужны не расчетные уравнения, а готовые для использования и хорошо документированные программы или, в край-

нем случае, рекомендации, основанные на расчетно-экспериментальных исследованиях.

Поэтому различными исследователями проводились экспериментальные исследования по влиянию трещин на несущую способность [8-14]. Исследовались, в основном, балки прямоугольного сечения. Трещины инициировались в разных местах по высоте поперечного сечения и по длине балки; исследовалось их влияние на несущую способность исследуемых объектов. Полученные результаты дают возможность прогнозировать изменения несущей способности при возникновении трещин для сооружений, содержащих балочные элементы, но не являются универсальными и пригодными для всех типов конструкций.

Постановка задачи. Разработка методик и составление на их основе компьютерных программ, позволяющие оценивать несущую способность железобетонных конструкций при возникновении трещин, являются актуальными задачами. Авторами данной статьи ранее была разработана и реализована в программном комплексе ПРИНС методика расчета одномерных и двумерных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности [15-18]. В данной статье эта методика развита применительно к расчету железобетонных плит с учетом одновременно как физической, так и конструктивной нелинейности.

Методы исследования. Расчет физически нелинейных конструкций ведется в программе ПРИНС шагово-итерационным способом с использованием уравнения:

$$\mathbf{K}_{NL}\Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{P}, \quad (1)$$

где \mathbf{K}_{NL} есть нелинейная матрица жесткости, связывающая приращения узловых сил и перемещений, $\Delta\mathbf{u}$ и $\Delta\mathbf{P}$ есть приращения узловых перемещений и узловых сил конечно-элементной модели, соответственно.

Матрица \mathbf{K}_{NL} представляется в виде:

$$\mathbf{K}_{NL} = \mathbf{K}_0 + \Delta\mathbf{K} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем:

$$(\mathbf{K}_0 + \Delta\mathbf{K})\Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{P}. \quad (3)$$

Уравнение (3) решается итерационным методом:

$$\mathbf{K}_0\Delta\mathbf{u}_i = \Delta\mathbf{P} - \Delta\mathbf{K}_{i-1}\Delta\mathbf{u}_{i-1} \quad (4)$$

где i – номер итерации.

По окончании итерационного процесса полные значения перемещений и напряжений в конце шага нагружения находятся по формулам:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}; \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_0 + \Delta\boldsymbol{\sigma}. \quad (5)$$

Приращения напряжений находятся по формуле:

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{ep}\Delta\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (6)$$

где \mathbf{C}_{ep} - матрица упруго-пластических характеристик материала [18].

При наличии пластических деформаций и трещин напряжения в элементах конструкции в конце каждого шага нагружения корректируются в соответствии с заданными диаграммами деформирования материалов. Это приводит к нарушению условий равновесия. В таких случаях осуществляется уравновешивание конструкции с использованием итерационной формулы:

$$\mathbf{K}_j^i \Delta \mathbf{u}_j^i = \mathbf{P}_j - \mathbf{F}_j^{i-1}, \quad (7)$$

где \mathbf{K} – матрица тангенциальной жесткости конструкции, $\Delta \mathbf{u}$ – вектор узловых перемещений, \mathbf{P} – вектор внешних узловых сил, \mathbf{F} – вектор узловых сил, статически эквивалентных внутренним напряжениям, j – номер шага, i – номер итерации равновесия.

В существующей версии программы ПРИНС расчеты по формулам (1-7) осуществлялись с сохранением расчетной схемы. Для решения задачи, поставленной в настоящей статье, реализованный ранее алгоритм был модернизирован в соответствии с блок-схемой, показанной на рис.1.

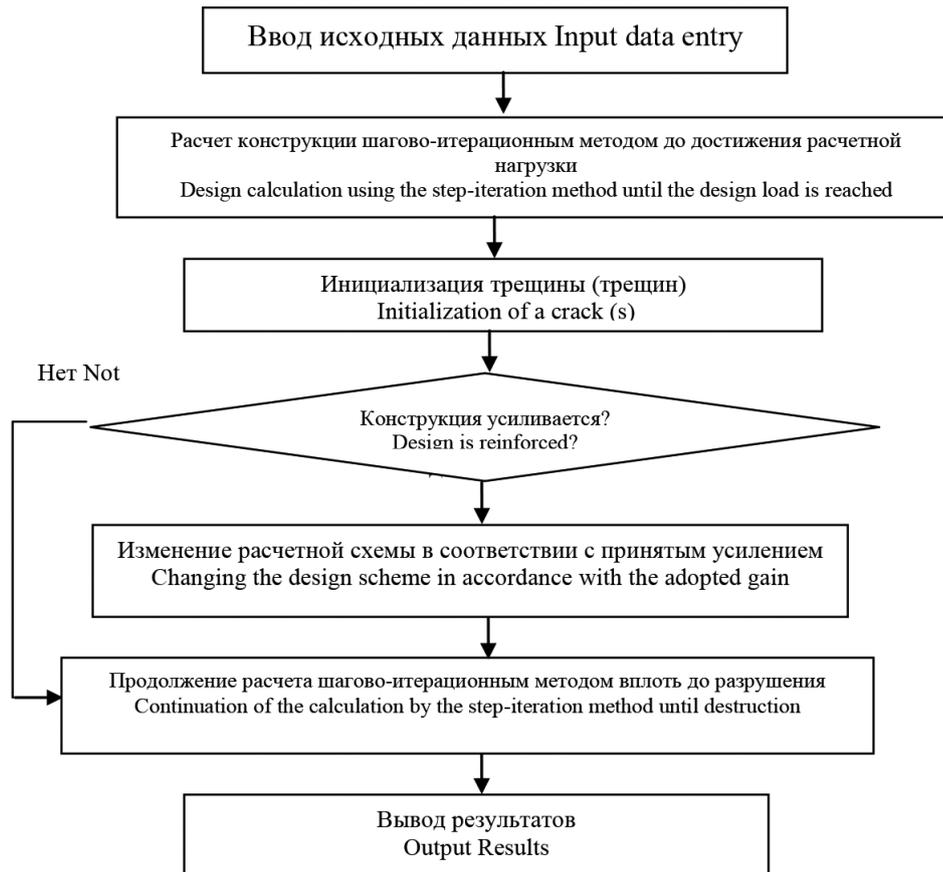


Рис.1. Блок схема алгоритма расчета конструкций с учетом физической и конструктивной нелинейности

Fig. 1. Block diagram of the structural analysis algorithm taking into account physical and structural nonlinearity

Трещины инициализируются в программе ПРИНС заданием соответствующих характеристик напряженно-деформированного состояния слоев бетона, содержащих трещины, а расчетная схема изменяется заменой начального пакета материалов модернизированным пакетом. Для выполнения расчетов в соответствии с алгоритмом рис.1 пришлось ввести дополнения, как в программу подготовки исходных данных, так и в расчетную программу.

Дополнительные данные, необходимые для расчета, приведены в табл.1 и 2..

Таблица 1. Управляющая строка (Формат I5)

Table 1. Control string (I5 format)

Позиция Position	Переменная Variable	Содержание Contents
1-5	NofCracks	Число иницируемых трещин The number of initiated cracks

Таблица 2. Строки с описанием свойств трещин (Формат 4I5,2F10.0)
Table 2. Lines describing the properties of cracks (Format 4I5,2F10.0)

Позиция Position	Переменная Variable	Содержание Contents
1-5	NOFSTEPIN	Номер шага нагружения, на котором инициируется трещина The number of loading steps at which the crack is initiated
6-10	NOFMODIN	Номер группы элементов, для которой вводится трещина The number of the group of elements for which the crack is introduced
11-15	NOFELEMIN	Номер элемента в группе Group Number
16-20	NOFSURF	Код поверхности, на которой возникает трещина Crack surface code =0 – нижняя поверхность bottom surface =1 верхняя поверхность top surface
21-30	CRACKDEPTH	Глубина трещины Crack depth
31-40	CRACKDIR	Направление нормали к трещине по отношению к местной оси X элемента The direction of the normal to the crack with respect to the local X axis of the element

Примечание: Требуется столько строк данного формата, сколько инициируется трещин

Note: As many lines of a given format are required as many cracks are initiated.

Обсуждение результатов. Для иллюстрации возможностей усовершенствованного алгоритма расчета по программе ПРИНС было произведено исследование влияния трещин в квадратной железобетонной плите на ее несущую способность при различных граничных условиях.

Плита рассчитывалась при следующих исходных данных: размер плиты 8x8 м, толщина плиты 30 см; бетон класса В30, нормативное сопротивление сжатию 22 МПа, растяжению – 1,75 МПа, модуль упругости $E=3,25 \times 10^7$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,2$; арматура класса А500, нормативное сопротивление 500 МПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$; армирование произведено на нагрузку $q=23,55$ кПа, верхнее армирование - стержни диаметром 8 мм при шаге арматурной сетки 200 мм, нижнее армирование - стержни диаметром 12 мм при шаге арматурной сетки 200 мм.

Исследуем плиту при шарнирном опирании по четырем сторонам. Номинальная нагрузка в данном расчете принималась равной 20 кПа. Множитель нагружения по шагам принимался переменным. Нагрузка увеличивалась вплоть до разрушения.

На рис.2 представлена кривая нагрузка-прогиб для плиты, не имеющей начальных несовершенств. Предельная нагрузка для плиты, согласно графику рис.2 и принятой базовой нагрузке, составила 73 кПа.

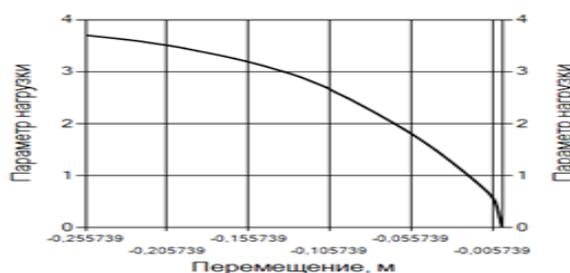


Рис.2. Кривая нагрузка-прогиб для квадратной шарнирно-опертой плиты
Fig. 2. Load-deflection curve for a square articulated plate

Первые трещины в плите, показанные на рис.3., были зафиксированы при нагрузке 8кПа. Направления трещин (от центра плиты вдоль диагоналей к углам) соответствует результатам многолетних наблюдений за характером разрушений прямоугольных плит (см., например [19]). Это подтверждает правильность предложенной методики расчета.

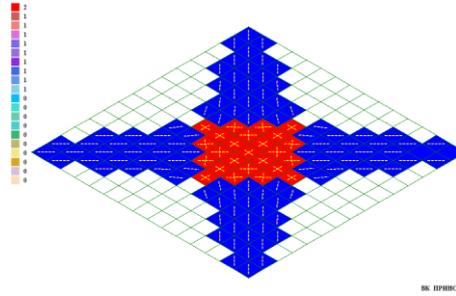


Рис.3. Первые трещины в плите при нагрузке 8 кПа
Fig. 3. The first cracks in the slab at a load of 8 kPa

Достоверность полученных результатов можно оценить также по максимальным значениям изгибающих моментов в центре плиты. Теоретическое значение максимальных изгибающих моментов в шарнирно-опертой плите при равномерно-распределенной нагрузке находится по формуле[20]:

$$M_{x, \max} = M_{y, \max} = 0,0479qa^2$$

При принятых размерах плиты и нагрузке $q = 20$ кПа эти значения составляют 61,3 кН. Поля изгибающих моментов, найденных при этой нагрузке при проведении нелинейного расчета, показаны на рис. 4 и 5. Расхождение с теоретическим значением составляет менее 1 %. Однако следует иметь ввиду, что теоретические значения приведены в литературе при коэффициенте Пуассона, равном 0,3. В проведенном расчете коэффициент Пуассона был равен 0,2.

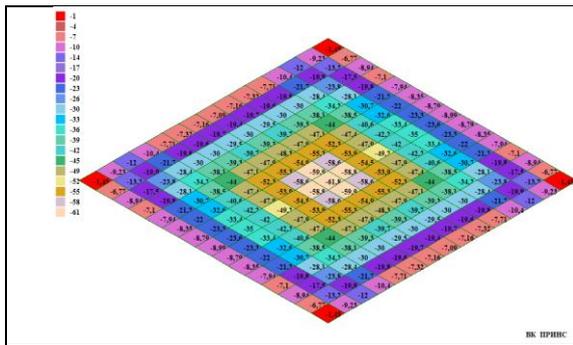


Рис.4. Изгибающие моменты Mxx при нагрузке 20 кПа
Fig. 4. Bending moments MXX at a load of 20 kPa

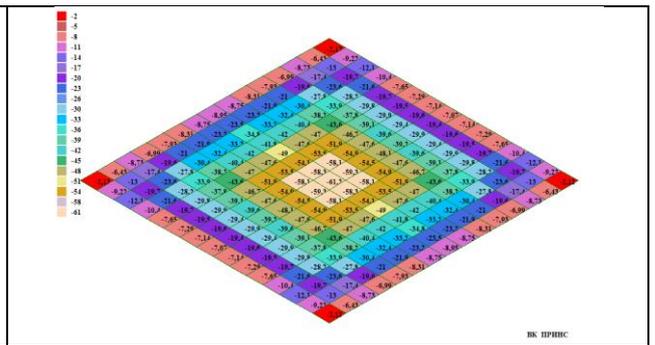


Рис.5. Изгибающие моменты Myy при нагрузке 20 кПа
Fig. 5. Bending moments MYU at a load of 20 kPa

Предположим, что в эксплуатационном режиме, т.е. при нагрузке $q=24,5$ кПа, в плите появились трещины, показанные на рис. 6. Параметры трещин приведены в табл.3

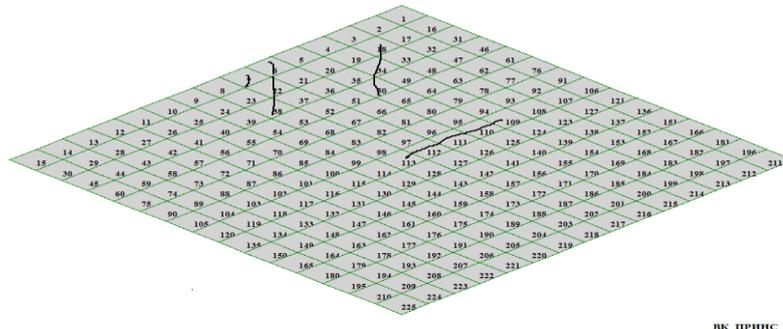


Рис.6. Дефекты в виде трещин в шарнирно-опертой плите
Fig. 6. Defects in the form of cracks in an articulated plate

Таблица 3. Дефекты в виде трещин в шарнирно-опертой плите
Table 3. Defects in the form of cracks in a pivotally supported plate

Номер шага нагружения Loading step number	Номер группы элементов Element group number	Номер элемента в группе Element number in the group	Код поверхности Surface code	Глубина трещины, см Crack depth, cm.	Угол наклона нормали к трещине The angle of inclination of the normal to the crack
14	6	5	0	20	-45
14	1	7	0	20	-45
14	1	22	0	20	-45
14	1	23	0	20	-45
14	1	38	0	20	-45
14	1	18	0	20	-45
14	1	34	0	20	-45
14	1	50	0	22	-45
14	1	109	0	22	90
14	1	110	0	22	90
14	1	111	0	22	90
14	1	112	0	22	90
14	1	113	0	22	90

Несущая способность плиты при возникновении дефектов в виде указанных выше трещин уменьшилась, как показали проведенные расчеты, до значения 57,8 кПа (рис.7).

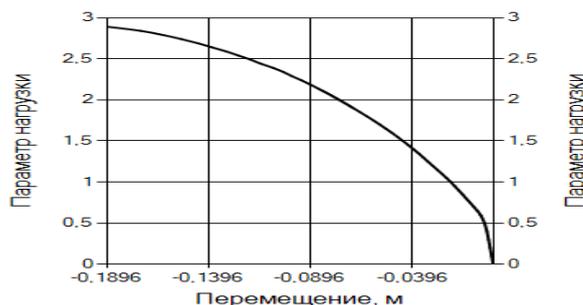


Рис.7. Кривая нагрузка-прогиб при возникновении дефектов в виде трещин
Fig. 7. Curve load-deflection when defects occur in the form of cracks

Аналогичные расчеты были проведены для плиты, защемленной по четырем сторонам, и плиты, защемленной по трем сторонам и имеющий один свободный край. Базовая нагрузка в этих расчетах принималась равной 10 кПа.

На рис.8 приведена кривая нагрузка прогиб для плиты, защемленной по четырем сторонам. Из рис.8 видно, что разрушающая нагрузка для плиты равна 188 кПа. Первые трещины на верхней поверхности появились при нагрузке 12 кПа, а на нижней – при нагрузке 19 кПа.

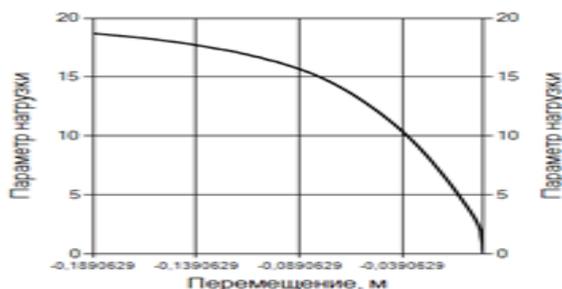


Рис.8.Кривая нагрузка-прогиб для квадратной защемленной плиты
Fig. 8 Curve load-deflection for a square pinched plate

Предположим, что при эксплуатационной нагрузке на нижней поверхности плиты возникли дефекты в виде трещин, показанных на рис.8. Расчет плиты по методике, описанной выше, показал, что несущая способность при этом падает до значения, равного 156 кПа, т.е. на 17% (рис.9).

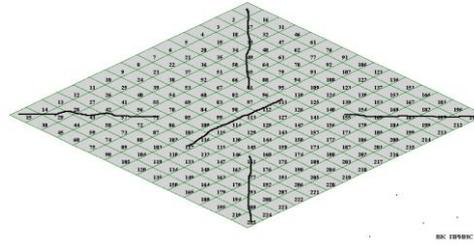


Рис.9 (а) Иницированные трещины
 Fig. 9 (a) Initiated cracks

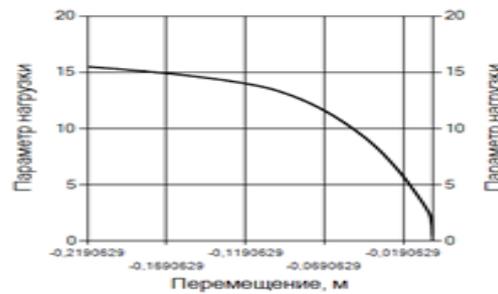


Рис.9.(б) Кривая нагрузка-прогиб при инициализации трещин, показанных на рис. 9 (а)
 Fig.9.(b) Curve load-deflection during initialization, cracks shown in Fig. 9 (a)

Изменим условия опирания плиты, защебив три края и оставив один край свободным, как показано на рис.10.

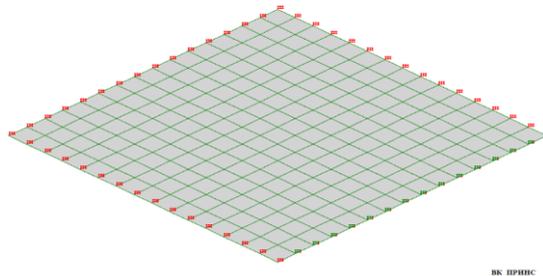


Рис.10. Расчетная схема и условия опирания плиты
 Fig. 10. The design scheme and conditions of support plate

Начальные трещины на нижней поверхности в данном случае появляются при нагрузке 8 кПа и имеют характер, показанный на рис.11.

Трещины на нижней и верхней поверхностях при нагрузке 24 кПа показаны на рис.12 и 13.

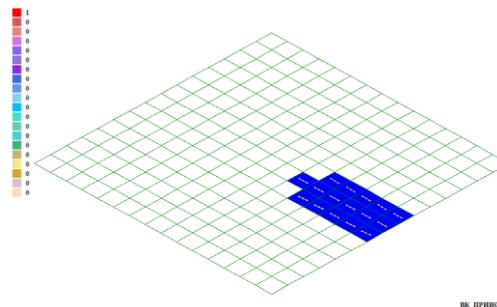


Рис.11. Начальные трещины на нижней поверхности при нагрузке 8 кПа
 Fig.11. Initial cracks on the lower surface at a load of 8 kPa

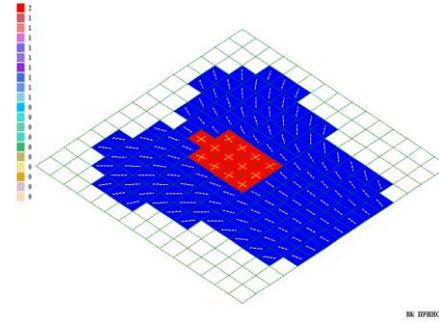


Рис.12. Трещины на нижней поверхности при нагрузке 24 кПа
Fig. 12. Cracks on the lower surface at a load of 24 kPa

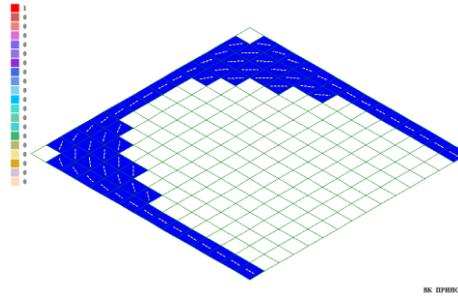


Рис.13. Трещины на верхней поверхности при нагрузке 24 кПа
Fig. 13. Cracks on the upper surface at a load of 24 kPa

Несущая способность плиты без начальных трещин составила 46 кПа (рис.14; базовая нагрузка составляла 20 кПа).

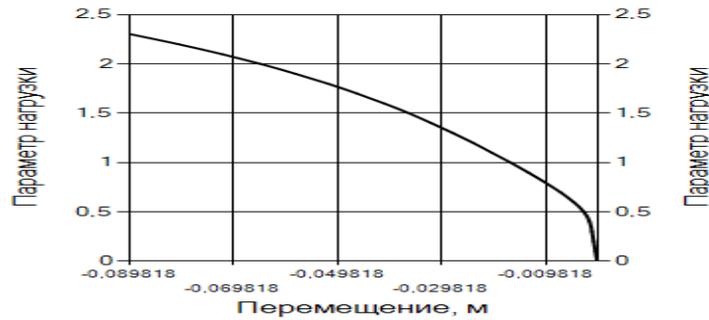


Рис.14. Кривая нагрузка-прогиб для исходной конструкции
Fig. 14. Load-deflection curve for the original structure

Рассмотрим изменение несущей способности плиты при возникновении дефектов в виде трещин. Иницируем трещины, как показано на рис.15.

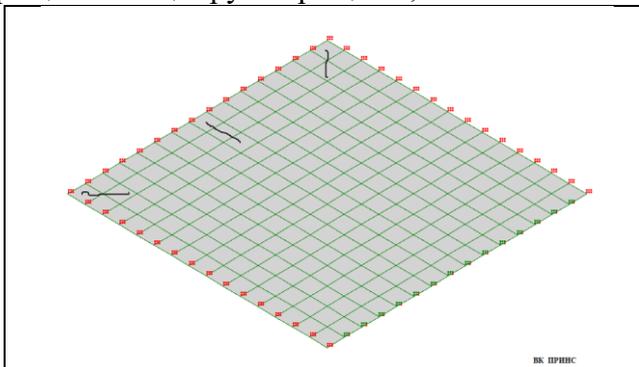


Рис.15. Дефекты в виде трещин в шарнирно-опертой плите (вариант 1)
Fig. 15. Defects in the form of cracks in the articulated plate (option 1)

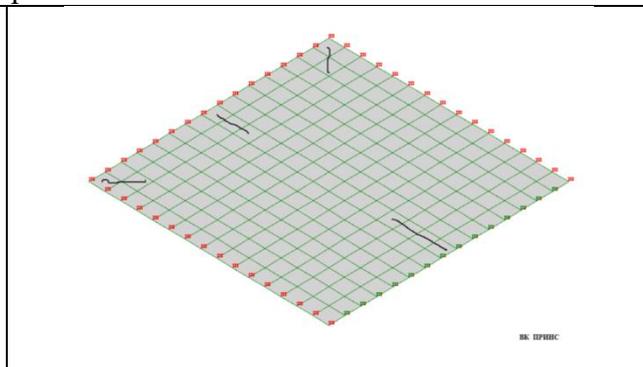


Рис.16. Дефекты в виде трещин в шарнирно-опертой плите (вариант 2)
Fig.16. Defects in the form of cracks in the articulated plate (option 2)

Как показал расчет по программе ПРИНС, трещины, приведенные на рис.15, практически не повлияли на несущую способность плиты. При возникновении же дефектов, показанных на рис.16, с параметрами, перечисленными в табл.4, несущая способность уменьшилась существенно и составила 28 кПа (рис.17).

Таблица 4. Характеристики инициированных трещин
Table 4. Characteristics of initiated cracks

Номер шага нагружения Loading step number	Номер группы элементов Element group number	Номер элемента в группе Element number in the group	Код поверхности Surface code	Глубина трещины, см Crack depth, cm.	Угол наклона нормали к трещине The angle of inclination of the normal to the crack
13	1	1	0	20	-45
13	1	17	0	20	-45
13	1	15	0	20	45
13	1	29	0	20	45
13	1	38	0	20	90
13	1	18	0	20	90
13	1	34	0	20	90
13	1	173	0	22	0
13	1	188	0	22	0
14	1	203	0	22	0



Рис.17. Кривая нагрузка-прогиб при инициализации трещин, показанных на рис.16.

Fig. 17. The load-deflection curve during initialization of the cracks shown in Fig. 16.

Вывод. Предложенный в данной статье и реализованный в программе ПРИНС алгоритм позволяет рассчитывать железобетонные плиты с учетом реальных свойств материалов вплоть до разрушения, как при идеальном их исполнении, так и при наличии дефектов в виде трещин.

Применение программы ПРИНС на практике позволит эксплуатационным службам отслеживать изменение несущей способности зданий и сооружений, содержащих железобетонные плиты, при возникновении дефектов в виде трещин, определять работоспособность конструкций и принимать обоснованные решения в случае необходимости ремонта.

Библиографический список:

1. Кумпяк О. Г., Кокорин Д. Н. Физические уравнения железобетона с трещинами для динамического расчета конструкций // Вестник ТГАСУ, № 4, 2015. С. 101-111.
2. Колчунов В. И., Колчунов Вл. И., Федорова Н. В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 54-60.
3. Демьянов А. И., Колчунов Вл. И., Яковенко И. А. К задаче динамического нагружения арматуры при мгновенном образовании пространственной трещины в железобетонной конструкции при кручении с изгибом // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 9. С. 18-24.
4. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Петров А. Н., Палювина С. Н. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. 156 с.
5. Трекин Н. Н., Кодыш Э. Н., Трекин Д. Н. Расчет по образованию нормальных трещин на основе деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 74-78.

6. Демьянов А. И., Алькади С. А. Экспериментально-теоретические исследования статико-динамического деформирования пространственной железобетонной рамы со сложнапряженными ригелями сплошного и составного сечения // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 68-75.
7. Vecchio, F., and Collins, M. (1986) "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear" *ACI Journal*, 83(22), pp. 219–231.
8. Omar, W., (1998) "The Shear Assessment of Concrete Beams with A Honeycombed Zone Present In The High Shear Region," Ph.D. Thesis, faculty of Engineering, University of Birmingham, 309 p.
9. Omar, W., and Clark, L.A., (2001) 'Shear Capacity of Honeycombed Reinforced Concrete Beams', *The Structural Engineer, Journal of the Institution of Structural Engineers, UK*, Vol. 79, No. 15, pp. 17-22.
10. Xie, F., (2014) "The Effect of localized low concrete strength on flexural strength of RC beams," MS Thesis, Civil Engineering Department, Syracuse University, 336 p.
11. Abdel-Rohman, M., (2005) "Effectiveness of Patch Repair in Reinforced Concrete Beams with Exposed Honeycombs," *Kuwait Journal of Science and Engineering*, Vol. 32, Issue 2, pp. 187-208.
12. Shihada, S., and Oida, Y., (2013) "Repair of Honey-Combed RC Beams Using Cementitious Materials," *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, Volume 1, Issue 1, pp. 1-5.
13. Al Moukdad, M.M., (2018) "Effect of Construction Void Defects on Flexural and Axial Load Capacity of Reinforced Concrete Members," MS Thesis, Civil Engineering Department, American University of Sharjah, May, 155 p.
14. Elrakib, T.M., and Arafa, A.I., (2012) "Experimental evaluation of the common defects in the execution of reinforced concrete beams under flexural loading," *HBRC Journal*, Vol. 8, Issue 1, p. 47–57.
15. Агапов В.П., Айдемиров К.Р. Расчет железобетонных ферм методом конечных элементов с учетом физической нелинейности. Часть 1// Научное обозрение, 2016, № 2, с.31-34.
16. Агапов В.П., Айдемиров К.Р. Расчет железобетонных ферм методом конечных элементов с учетом физической нелинейности. Часть 2// Научное обозрение, 2016, № 3, с.22-27.
17. Агапов В.П., Айдемиров К.Р. Исследование несущей способности железобетонных плит с трещинами после их усиления композитными канями методом конечных элементов с помощью вычислительного комплекса ПРИНС// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2018; 45(4):142-152. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-142-152.
18. Агапов В.П., Ковригин И.И., Малахова А.Н., Савостьянов В.Н. Физически нелинейные процессы в строительных конструкциях. - ФГБОУ ВПО «МГСУ», Москва, 2013. 128 с.
19. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах Том 1. Изд-во Машиностроение, М., 1968.- 831 с.

References:

1. Kumpyak O. G., Kokorin D. N. Fizicheskiye uravneniya zhelezobetona s treshchinami dlya dinamicheskogo rascheta konstruktсий // *Vestnik TGASU*, № 4, 2015. S. 101-111. [Kumpyak O. G., Kokorin D. N. Physical equations of reinforced concrete with cracks for dynamic structural analysis // *Vestnik TGASU*, No. 4, 2015. pp. 101-111. (In Russ)]
2. Kolchunov V. I., Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Deformatsionnyye modeli zhelezobetona pri oso-bykh vozdeystviyakh// *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. № 8. S. 54-60. [Kolchunov V. I., Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Deformation models of reinforced concrete under special influences // *Industrial and Civil Engineering*. 2018. No. 8. pp. 54-60. (In Russ)]
3. Dem'yanov A. I., Kolchunov V. I., Yakovenko I. A. K zadache dinamicheskogodogruzheniya armatury pri mgnovennom obrazovanii prostranstvennoy treshchiny v zhelezobetonnoy konstruktсии pri kruchenii s izgibom // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. № 9. S. 18-24. [Dem'yanov A. I., Kolchunov V. I., Yakovenko I. A. To the problem of dynamic loading of reinforcement during instant formation of a spatial crack in a reinforced concrete structure during torsion with bending // *Industrial and Civil Engineering*. 2017. No. 9. pp. 18-24. (In Russ)]
4. Karpenko N. I., Karpenko S. N., Petrov A. N., Palyuvina S. N. Model' deformirovaniya zhelezobetona v prirashcheniyakh i raschet balok-stenok i izgibayemykh plit s treshchinami. Petrozavodsk : Izd-vo PetrGU, 2013. 156 s. [Karpenko N. I., Karpenko S. N., Petrov A. N., Palyuvina S. N. The model of reinforced concrete deformation in increments and the calculation of beam-walls and bending plates with cracks. Petrozavodsk: Publishing House of PetrSU, 2013. 156 p. (In Russ)]
5. Trekin N. N., Kodysh E. N., Trekin D. N. Raschet po obrazovaniyu normal'nykh treshchin na osnove deformatsionnoy modeli // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. № 7. S. 74-78. [Trekin N. N., Kodysh E. N., Trekin D. N. Calculation of the formation of normal cracks based on the deformation model // *Industrial and Civil Engineering*. 2016. No. 7. pp. 74-78. (In Russ)]
6. Dem'yanov A. I., Al'kadi S. A. Eksperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya statiko-dinamicheskogo deformirovaniya prostranstvennoy zhelezobetonnoy ramy so slozhnonapryazhennymi rigelyami sploshnogo i sostavnogo secheniya // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. № 6. S. 68-75. [Dem'yanov A. I., Al'kadi S. A. Experimental and theoretical studies of the static-dynamic deformation of a spatial reinforced concrete frame with

- complex tensioned crossbars of continuous and composite sections // *Industrial and Civil Engineering*. 2018. No. 6. pp. 68-75. (In Russ)]
7. Vecchio, F., and Collins, M. (1986) "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear" *ACI Journal*, 83(22), pp. 219–231.
 8. Omar, W., (1998) "The Shear Assessment of Concrete Beams with A Honeycombed Zone Present In The High Shear Region," Ph.D. Thesis, faculty of Engineering, University of Birmingham, 309 p.
 9. Omar, W., and Clark, L.A., (2001) 'Shear Capacity of Honeycombed Reinforced Concrete Beams', *The Structural Engineer, Journal of the Institution of Structural Engineers, UK, Vol. 79, No. 15, pp. 17-22.*
 10. Xie, F., (2014) "The Effect of localized low concrete strength on flexural strength of RC beams," MS Thesis, Civil Engineering Department, Syracuse University, 336 p.
 11. Abdel-Rohman, M., (2005) "Effectiveness of Patch Repair in Reinforced Concrete Beams with Exposed Honeycombs," *Kuwait Journal of Science and Engineering*, Vol. 32, Issue 2, pp. 187-208.
 12. Shihada, S., and Oida, Y., (2013) "Repair of Honey-Combed RC Beams Using Cementitious Materials," *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, Volume 1, Issue 1, pp. 1-5.
 13. Al Moukdad, M.M., (2018) "Effect of Construction Void Defects on Flexural and Axial Load Capacity of Reinforced Concrete Members," MS Thesis, Civil Engineering Department, American University of Sharjah, May, 155 p.
 14. Elrakib, T.M., and Arafa, A.I., (2012) "Experimental evaluation of the common defects in the execution of reinforced concrete beams under flexural loading," *HBRC Journal*, Vol. 8, Issue 1, p. 47–57.
 15. Agapov V.P., Aydemirov K.R. Raschet zhelezobetonnykh ferm metodom konechnykh elementov s uchedom fizicheskoy nelineynosti. Chast' 1// *Nauchnoye obozreniye*, 2016, № 2, s.31-34. [Agapov V.P., Aidemirov K.R. Calculation of reinforced concrete trusses using the finite element method taking into account physical nonlinearity. Part 1 // *Scientific Review*, 2016, No. 2, p.31-34. (In Russ)]
 16. Agapov V.P., Aydemirov K.R. Raschet zhelezobetonnykh ferm metodom konechnykh elementov s uchedom fizicheskoy nelineynosti. Chast' 2// *Nauchnoye obozreniye*, 2016, № 3, s.22-27. [Agapov V.P., Aidemirov K.R. Calculation of reinforced concrete trusses using the finite element method taking into account physical nonlinearity. Part 2 // *Scientific Review*, 2016, No. 3, pp. 22-27. (In Russ)]
 17. Agapov V.P., Aydemirov K.R. Issledovaniye nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh plit s treshchinami posle ikhusileniya kompozitnymi kanyami metodom konechnykh elementov s pomoshch'yu vychislitel'nogokompleksa PRINS// *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*, 2018; 45(4):142-152. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-142-152. [Agapov V.P., Aidemirov K.R. Investigation of the bearing capacity of reinforced concrete slabs with cracks after their reinforcement with composite canals by the finite element method using the PRINS computational complex // *Herald of the Daghestan State Technical University. Engineering*, 2018; 45 (4): 142-152. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2018-45-4-142-152. (In Russ)]
 18. Agapov V.P., Kovrigin I.I., Malakhova A.N., Savost'yanov V.N. Fizicheski nelineynyye protsessy v stroitel'nykh konstruktsiyakh. - FGBOU VPO «MGSU», Moskva, 2013. 128 s. [Agapov V.P., Kovrigin I.I., Malakhova A.N., Savostyanov V.N. Physically nonlinear processes in building structures. - FSBEI HPE "MGSU", Moscow, 2013.128 s. (In Russ)]
 19. Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. Spravochnik v trekh tomakh Tom 1. Izd-vo Mashinostroyeniye, M., 1968.- 831 s. [Strength, stability, fluctuations. The reference book in three volumes Volume 1. Publishing house Engineering, M., 1968 831 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Айдемиров Курбан Рабаданович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: kyrayd@mail.ru

Агапов Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и математики; e-mail: agapovpb@mail.ru

Information about the authors:

Kurban R. Aidemirov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Resistance of Materials, Theoretical and Structural Mechanics; e-mail: kyrayd@mail.ru

Vladimir P. Agapov, Dr. Sci., (Technical), Prof., Department of Applied Mechanics and Mathematics; e-mail: agapovpb@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.10.2019.

Принята в печать 21.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.10.2019.

Accepted for publication 21.11.2019.

Для цитирования: Буланин В.А. Учет энергии на источнике теплоснабжения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4):155-166. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-155-166

For citation: V.A. Bulanin. Method for measuring energy in heat supply sources. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4):155-166. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-155-166

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-155-166

УЧЕТ ЭНЕРГИИ НА ИСТОЧНИКЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Буланин В.А.

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

Резюме Цель. Целью исследования являлось определение фактического расхода газообразного рабочего тела по перепаду давления в сужающем устройстве при изменяющихся его параметрах (скорость, давление, температура, состав газа). **Метод.** Поскольку пикнометрический метод определения плотности при его высокой точности более прост, чем калориметрический метод определения теплоты сгорания, значение последней можно проверять, используя предложенную в статье зависимость. В случае расхождения вычисленного значения теплоты сгорания и полученного экспериментально более чем на 0,5%, определение теплоты сгорания и плотности следует повторить. Зависимость между плотностью и теплотой сгорания газа подлежит проверке и уточнению, если используется газ других месторождений. Во всех случаях следует пользоваться пробоотборником для накопления усредненной пробы газа за соответствующий период времени. Методическая погрешность вычисления количества газообразного рабочего тела может быть устранена или уменьшена при использовании ЭВМ в составе автоматизированной системы управления предприятием теплоснабжения. **Результат.** Доказано, что теплота сгорания энергетических топлив нелинейно зависит от содержания в них водорода и углерода; разработана формула, описывающая эту зависимость; при исследовании энергетических характеристик топлив установлена ранее неизвестная закономерность: углеводороды этилен, бензол и аннелированные углеводороды (нафталин, антрацен, нафтацен и т.д.) образуют гомологический ряд $C_nH_{(n+6)/2}$ с гомологической разностью C_4H_2 , в то время как все другие ряды углеводородов имеют гомологическую разность CH_2 . **Вывод.** Наибольшие трудности представляет учет (измерение) количества энергии, содержащейся в используемых на ТЭС топливе, преимущественно природного газа, и теплоносителя, поскольку отсутствуют соответствующие технические средства для непосредственного (прямого) измерения количества того или иного вида энергии. Разработанные теоретические положения, вносят определенный вклад в развитие научных основ тепло- и газоснабжения, повышают точность и снижают трудоемкость расчета технико-экономических показателей ТЭС и котельных.

Ключевые слова: учет энергии, расход топлива, теплота сгорания, теплоснабжение, энергетический баланс, источник теплоснабжения

BUILDING AND ARCHITECTURE

METHOD FOR MEASURING ENERGY IN HEAT SUPPLY SOURCES

V.A. Bulanin

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

Abstract. Objectives. This study was aimed at determining the actual flow rate of a gaseous working fluid by the pressure drop in the constriction device with its changing parameters (speed, pressure, temperature, gas composition). **Method.** Since the pycnometric method provides high accuracy in determining the density and is simpler than the calorimetric method for determining the calorific value, the value of the latter can be checked using the dependence proposed in the article. In the event of a discrepancy between the calculated value of the calorific value and the experimentally obtained value of more than 0.5%, the determination of the calorific value and the density should be repeated. The relationship between the density and calorific value of a gas is subject to verification and refinement when gas from other fields is used. In all cases, a sampler should be used to accumulate an average gas sample over an appropriate period of time. The methodological error in calculating the amount of gaseous working fluid can be eliminated or reduced by using a computer as part of an automated heat supply enterprise management system. **Results.** It was established that the calorific value of energy fuels non-linearly depends on the hydrogen and carbon contained therein; a formula has been developed to describe this relationship. When studying the energy characteristics of fuels, a previously unknown regularity was established: hydrocarbons ethylene, benzene and annelated hydrocarbons (naphthalene, anthracene, naphthacene, etc.) form the homologous series $C_nH_{(n+6)/2}$ with the homological difference C_4H_2 , while all other series of hydrocarbons have a homological difference CH_2 . **Conclusion.** The greatest difficulties consist in accounting (measuring) the amount of energy contained in the fuel used at TPPs, mainly natural gas, and the coolant, since there are no appropriate technical means for direct measuring the amount of a particular type of energy. The developed theoretical provisions make a certain contribution to the development of the scientific foundations of heat and gas supply, increase accuracy and reduce the complexity of calculating the technical and economic indicators of thermal power plants and boiler houses.

Keywords: energy measuring, fuel consumption, calorific value, heat supply, energy balance, heat supply source

Введение. В необходимости учета энергии на источнике теплоснабжения основными аргументами являются расход топлива, воды и водяного пара, удельная теплота сгорания топлива, энтальпия воды и водяного пара, которые в свою очередь являются функциями других аргументов: перепад давления в сужающем устройстве расходомера, давление и температура измеряемой среды и т.д., предусмотренными действующими нормативными документами [1-5]. Однако эти документы отражают не все особенности учета, встречающиеся на практике.

В статье подробно изложены методы учета этих особенностей и рекомендации по уменьшению погрешности измерений. Проработаны также вопросы достоверного учета удельной теплоты сгорания природного газа, а также важные аспекты определения энтальпии воды и водяного пара.

Постановка задачи. Определение действительного расхода газообразного рабочего тела по перепаду давления в сужающем устройстве при изменяющихся его параметрах (скорость, давление, температура, состав газа) представляет собой трудную научно-техническую задачу. Пересчет показаний дифманометра-расходомера осуществляют, как правило, по среднеарифме-

тическим значениям параметров, вычисленным за сутки, в связи с чем, в измерение расхода и количества рабочего тела вносится дополнительная методическая погрешность, часто превышающая основную погрешность расходомера.

На рис. 1 показано влияние одного лишь фактора (расширение измеряемой среды при прохождении через сужающее устройство) на показания расходомера, где K_ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды. Методическая погрешность вычисления количества газообразного рабочего тела может быть устранена или уменьшена при использовании ЭВМ в составе АСУ ТП.

В этом случае пересчет показаний расходомера может быть реализован по уравнению:

$$Q_{нд} = Q_n K_\varepsilon K_{P,T} K_{\rho_n}$$

Поправочные коэффициенты:

$$K_\varepsilon = f(\Delta P/P), \quad K_{P,T} = f(P, T, K) \quad \text{и} \quad K_{\rho_n} = (\rho_n, \rho_{нд}),$$

учитывающие отклонение параметров расходомера от принятых в расчете его сужающего устройства, могут быть представлены как функции измеряемых параметров:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon} = a_1 + a_2 \frac{\Delta P}{P_u + P_{атм}} = a_1 + a_3 \frac{Q^2}{P_u + P_{атм}} ;$$

$$K_{P,T} = \sqrt{\frac{P_0 T K}{P T_0 K_0}} = [b_1 + (b_2 + b_3 t) P] \sqrt{\frac{P_u + P_{атм}}{273,15 + t}} ; \quad K_{\rho_n} = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{нд}}} = \frac{c}{\sqrt{\rho_{нд}}} .$$

Здесь $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c$ - константы, которые необходимо определять индивидуально для каждого расходомера. Остальные обозначения соответствуют Правилам [5].

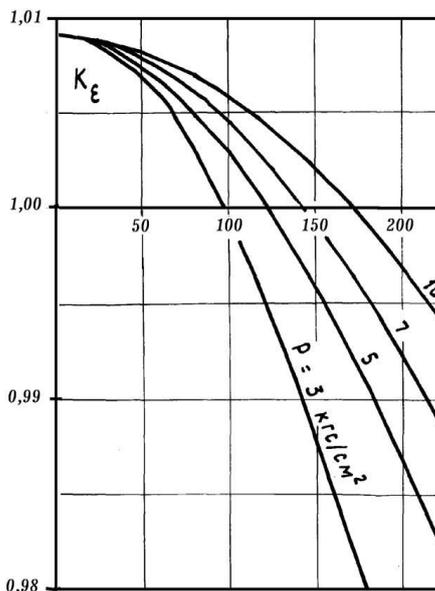


Рис. 1. Зависимость поправочного множителя на расширение измеряемой среды от давления

Fig. 1. Dependence of the correction factor for the expansion of the measured medium on the pressure

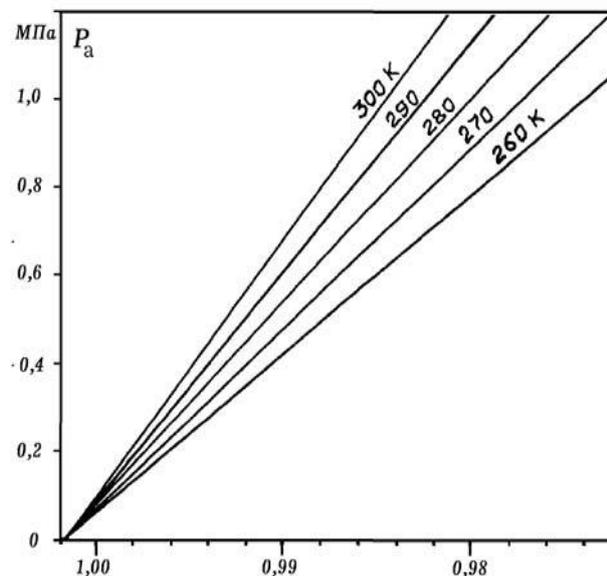


Рис. 2. Коэффициент сжимаемости метана
 Fig. 2. The compressibility factor of methane

Для облегчения решения поставленной задачи автором разработаны графики коэффициента сжимаемости метана (рис. 2), поправочного множителя на расширение измеряемой среды для стандартной диафрагмы (рис. 3) и стандартного сопла (рис. 4).

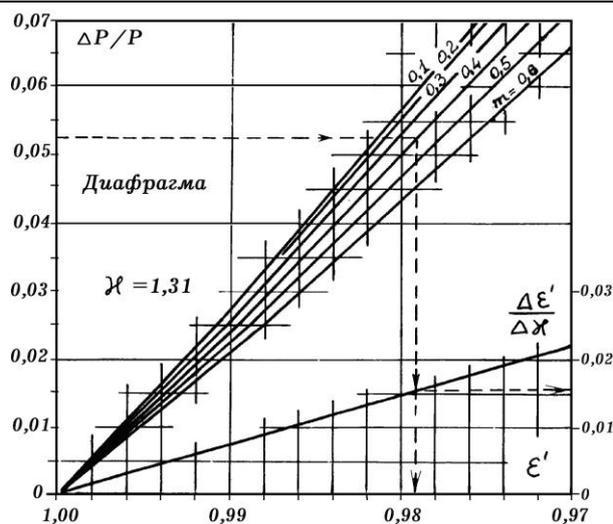


Рис. 3. Поправочный множитель на расширение измеряемой среды для стандартной диафрагмы
 Fig. 3. Correction factor for the expansion of the measured medium for the standard diaphragm

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\lambda} (\lambda - 1,31)$$

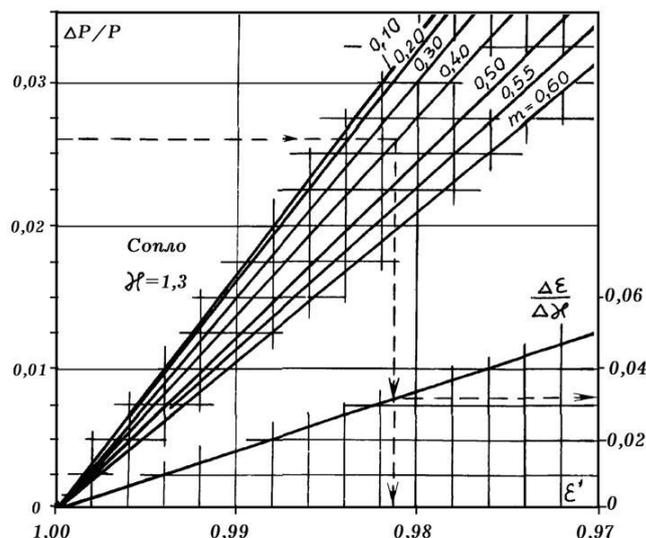


Рис. 4. Поправочный множитель на расширение измеряемой среды для стандартного сопла
 Fig. 4. Correction factor for the expansion of the measured medium for a standard nozzle

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\lambda} (\lambda - 1,30)$$

Пересчет показаний дифманометра-расходомера необходимо производить непрерывно, либо каждый раз при изменении хотя бы одного из измеряемых параметров. Количество рабочего тела следует вычислять путем интегрирования действительных, пересчитанных на фактические условия измерения, параметров за весь период интегрирования: час, смена, сутки и т.д.

Методы исследования. Контроль достоверности определения теплоты сгорания природного газа. Основную долю в топливном балансе электростанций составляет природный газ. Изменение состава газа, наряду с другими факторами, затрудняет точный учет его расхода.

Для измерения расхода и количества потребляемого газа в натуральном и условном исчислении необходимо определять такие основные его характеристики, как плотность и удельная теплота сгорания.

Применяемые в настоящее время методы (пикнометрический для определения плотности и калориметрический для определения удельной теплоты сгорания природного газа) имеют погрешность, обычно не превышающую 0,3%.

Однако в случае несоблюдения методик выполнения измерений, например, неодновременный отбор «параллельных» проб газа, неисправности применяемых приспособлений, ошибки при вычислениях и т.д., погрешность может быть значительно выше. Контроль достоверности полученных значений плотности и теплоты сгорания газа обычно не производят из-за отсутствия соответствующей методики.

Покажем, например, что если вычисленная удельная теплота сгорания газа оказалась выше фактической на 1%, то вычисленный удельный расход условного топлива также завышен на 1% или на 3,7 г/(кВт.ч) при удельном расходе топлива 370 г/(кВт.ч). А при занижении плотности газа против фактической на 1% удельный расход топлива будет завышенным на 0,5% или на 1,85 г/(кВт.ч) против действительного его значения.

Автором были проанализированы значения плотности и удельной теплоты сгорания природного газа, подаваемого в г.Ташкент за десятилетний период (рис. 5, зона 3). Теплота сгорания и плотность газа приведены к стандартным условиям: 20°C и 0,101325 МПа [5].

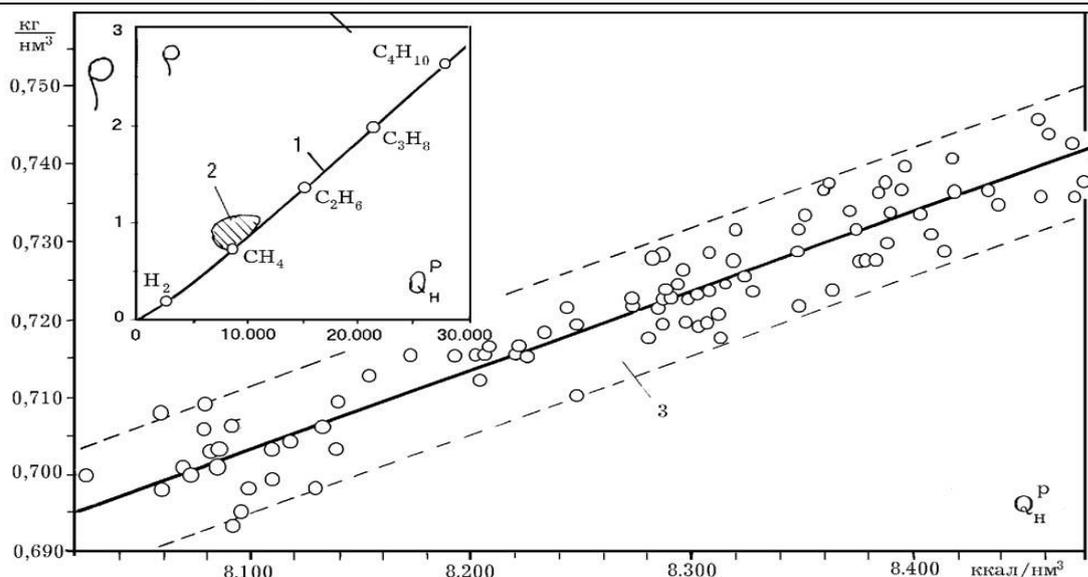


Рис. 5. Зависимость теплоты сгорания природного газа от его плотности
Fig. 5. Dependence of the heat of combustion of natural gas on its density

На рис. 5 показаны: 1 - углеводороды метанового ряда; 2 - зона, охватывающая природные газы месторождений СНГ, которые в той или иной мере забалластированы негорючими газами.

Природный газ, например, поступающий в г.Ташкент и на близ расположенные ТЭС, характеризуется зависимостью: $Q_H^p = 41,00\rho + 5,15$,

где: Q_H^p - низшая теплота сгорания газа, МДж/м³;

ρ - плотность газа, кг/м³.

Пунктирными линиями ограничена зона 3, в которой значения удельной теплоты сгорания этого газа отличаются от вычисленных по уравнению не более чем на 1%; 75% значений имеют разброс менее 0,5%.

Поскольку пикнометрический метод определения плотности при его высокой точности более прост, чем калориметрический метод определения теплоты сгорания, значение последней можно проверять, используя предложенную зависимость.

В случае расхождения вычисленного значения теплоты сгорания и полученного экспериментально более чем на 0,5%, определение теплоты сгорания и плотности следует повторить. Зависимость между плотностью и теплотой сгорания газа подлежит проверке и уточнению, если используется газ других месторождений. Во всех случаях следует пользоваться пробоотборником для накопления усредненной пробы газа за соответствующий период времени.

О достоверности информации по теплофизическим свойствам влажного пара. Основным рабочим телом последних ступеней паровых турбин ТЭС является влажный водяной пар. Это обстоятельство подчеркивает необходимость иметь достоверные данные по свойствам влажного пара, из-за отсутствия которых свойства влажного пара принято определять расчетным путем по известным свойствам пара и воды на границе насыщения, используя следующие соотношения:

$$i_x = (1-x)i' + i''x ; s_x = (1-x)s' + s''x ; v_x = (1-x)v' + v''x ,$$

где: x - степень сухости влажного пара, т.е. содержания в нем сухого насыщенного пара в долях от общего его количества; i', s', v' - соответственно энтальпия, энтропия и удельный объем кипящей воды; i'', s'', v'' - энтальпия, энтропия и удельный объем сухого насыщенного пара; i_x, s_x, v_x - энтальпия, энтропия и удельный объем влажного пара.

Фактически же эти соотношения описывают свойства не влажного пара, а системы «жидкость-пар» с границей раздела между ними. В реальных условиях работы паровой турбины влажный пар представляет собой смесь сухого насыщенного пара и находящихся в его объеме капелек воды, то есть своего рода туман. Если сравнивать влажный пар и двухфазную систему «жидкость-пар» (с одинаковой степенью сухости пара x), то влажный пар в принципе имеет более высокую энтальпию и энтропию, чем система «жидкость-пар». Отдавая теплоту в окружающую среду, влажный пар превращается в систему «жидкость-пар», приобретая присущие ей свойства.

С уменьшением сухости пара увеличивается отклонение свойств влажного пара от тех свойств, которые принято в настоящее время считать действительными, вследствие чего увеличивается погрешность выполняемых конструктивных и технико-экономических расчетов, которая в конечном итоге приводит к перерасходу энергоресурсов.

Обсуждение результатов. Представляется целесообразным проведение научно-исследовательских работ по непосредственному изучению свойств влажного пара в реальном цикле и разработке методов и средств их контроля.

В этом плане нами получена $P-V-T$ зависимость в координатах $x-y$, в которой $x = v$; $y = T/T_{\text{вл}} - 0,1754(P - P_{\text{вл}})v$,

где: P - давление, бар; T - температура, К.

Эта зависимость интересна тем, что все без исключения изобары (воды и пара) пересекаются в двух точках:

$$x_1 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}; y_1 = 0,00...0,35; x_2 = 0,003147 \text{ м}^3/\text{кг}; y_2 = 1,000.$$

По мнению автора, аналитическое изучение свойств воды и водяного пара в указанных координатах позволит выявить функциональную зависимость $y = f(x)$, то есть построить достаточно простое уравнение состояния реальной системы жидкость-пар.

Учет энтальпии воды и водяного пара на ТЭС. Как было показано выше, повышение точности энергетического баланса может быть достигнуто при использовании ЭВМ. Но для нее требуется соответствующее математическое обеспечение.

Относительно простые уравнения состояния воды и водяного пара представлены в [6-15]. Но и они достаточно сложны для использования на мини- и микроЭВМ, которыми оснащаются ТЭС для АСУ ТП энергоблоков. В связи с этим нами составлены более удобные и простые для программирования на ЭВМ аналитические выражения для косвенного измерения энтальпии, полученные путем аппроксимации таблично заданной (по Вукаловичу, 1969) зависимости энтальпии воды и водяного пара i , ккал/кг, от давления P , кгс/см², и температуры t , °С, охватывающие практически весь диапазон параметров, имеющий место на ТЭС.

Вода. Диапазон параметров: температура 130...250°С, давление 30...300 кгс/см².

Уравнение энтальпии: $i = a_1 + a_2 P$,

где: $a_1 = 9,84 + 0,85222t + 0,58056 \cdot 10^{-3} t^2$;

$a_2 = 0,1011 \cdot 10^{-1} + 0,12963 \cdot 10^{-3} t - 0,64815 \cdot 10^{-6} t^2$.

В указанном диапазоне параметров погрешность аппроксимации не превышает 0,09%.

Водяной пар:

1. Диапазон параметров: температура 200...400°С; давление 1...90 кгс/см².

Уравнение энтальпии: $i = b_0 + b_1 P + b_2 P^2$,

где: $b_0 = 597,92 + 0,43453t + 0,714 \cdot 10^{-4} t^2$;

$b_1 = -2,4211 + 0,930132 \cdot 10^{-2} t - 0,1028376 \cdot 10^{-4} t^2$;

$b_2 = -0,1800434 + 0,1438705 \cdot 10^{-2} t - 0,388097 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,351208 \cdot 10^{-8} t^3$.

2. Диапазон параметров: температура 400 ... 570°С; давление 1...250 кгс/см².

Уравнение энтальпии: $i = c_0 + c_1 P + c_2 P^2$,

$$\begin{aligned} \text{где: } c_0 &= 598,94 + 0,4262t + 0,85348 \cdot 10^{-4} t^2 ; \\ c_1 &= -0,88113 + 0,18212 \cdot 10^{-2} t - 0,11141 \cdot 10^{-5} t^2 ; \\ c_2 &= -0,8582 \cdot 10^{-2} + 0,301627 \cdot 10^{-4} t - 0,26818 \cdot 10^{-7} t^2 . \end{aligned}$$

В указанных диапазонах изменения параметров водяного пара погрешность аппроксимации составляет $< 0,05\%$.

Для расчетных (номинальных) параметров турбоагрегатов погрешность вычисления энтальпии воды и водяного пара по предложенным уравнениям на два порядка ниже погрешности контрольно-измерительных приборов, измеряющих давление и температуру пара и воды.

Зависимость теплоты сгорания топлива от соотношения водорода и углерода

Для вычисления располагаемой (подведенной) теплоты энергоустановки кроме количества расходуемого топлива необходимо определять и удельную теплоту его сгорания. О методах подсчета теплоты сгорания топлива достаточно подробно изложено в [16]:

- метод калориметрического определения теплоты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива, основанный на сжигании пробы топлива в среде кислорода и поглощении выделившейся теплоты водой в калориметре. Этот метод является основным и наиболее точным для вычисления теплоты сгорания топлива на тепловых электростанциях, но является весьма трудоемким;

- подсчет теплоты сгорания газообразного топлива по компонентному составу его горючих веществ;

- подсчет теплоты сгорания твердого топлива по данным технического анализа (выход кокса, выход летучих веществ, теплота сгорания летучих веществ);

- определение теплоты сгорания твердого и жидкого топлива по его элементному составу (формулы П.Л.Дюлонга, Д.И.Менделеева, Общества германских инженеров и др.).

Необходимо отметить, что удельная теплота сгорания топлива - это количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы количества топлива при постоянном давлении и охлаждении продуктов сгорания до исходной температуры топлива и окислителя. Такое условие необходимо соблюдать и при вычислении к.п.д. котельного агрегата, поскольку он свидетельствует о степени эффективности использования вычисленной указанным методом теплоты сгорания топлива.

Согласно правилу Вельтера-Бертье теплота сгорания всех сухих топлив с одним молем кислорода одинакова.

Вычисление и сравнение теплоты сгорания энергетических топлив производят, например, по элементному составу, используя формулу Д.И.Менделеева:

$$Q_n^p = 81C + 300H - 26(O - S),$$

где: Q_n^p - высшая теплота сгорания топлива, ккал/кг;

C, H, O, S - содержание в топливе элементов соответственно углерода, водорода, кислорода и серы, %.

Заметим, что формула Д.И.Менделеева, как и многих других исследователей, имеет линейную зависимость теплоты сгорания топлива от содержания каждого из элементов в нем.

Большое количество формул, различающихся в основном только входящими в них константами, свидетельствует о недостаточной их достоверности. Проанализируем этот вопрос подробнее.

Построим (рис. 6) графическую зависимость удельной теплоты сгорания углеводородов от соотношения в них водорода и углерода.

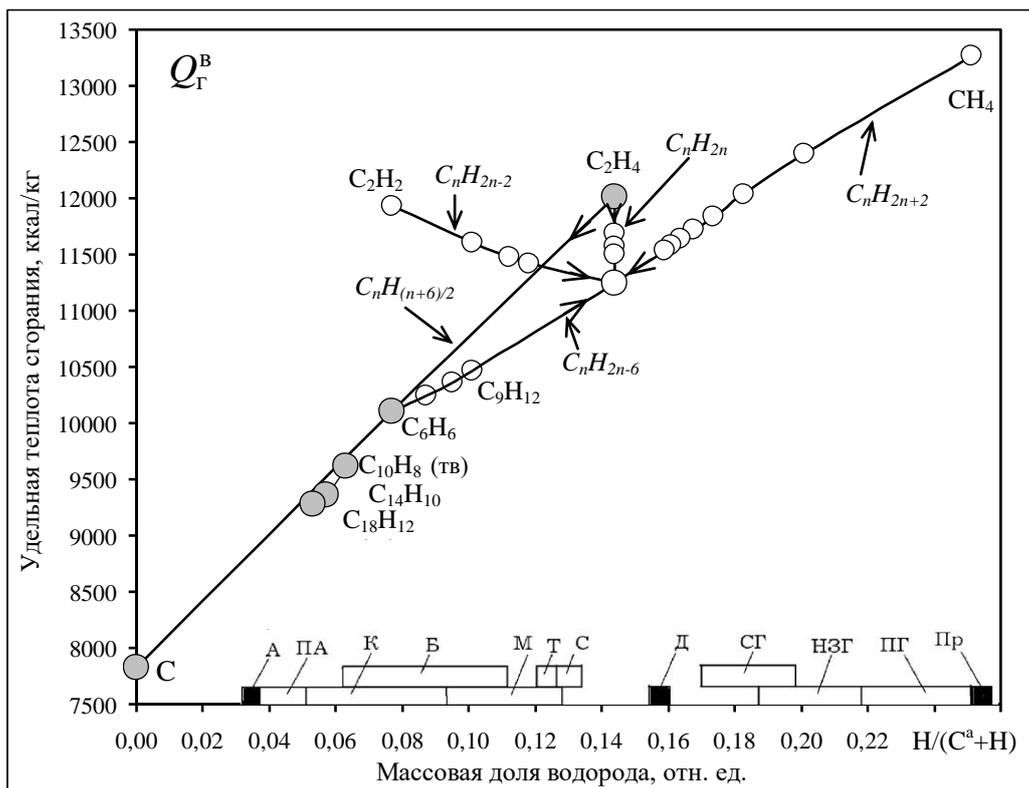


Рис. 6. Зависимость удельной теплоты сгорания углеводородов от соотношения в них водорода и углерода.

Fig. 6. The dependence of the specific heat of combustion of hydrocarbons on the ratio of hydrogen and carbon in them.

Чтобы не загромождать рис.6, на нем представлены только часть первоначальных углеводорода каждого гомологического ряда (обозначены только первые члены этих рядов), а также этилен C_2H_4 , бензол C_6H_6 , нафталин $C_{10}H_8$, антрацен $C_{14}H_{10}$, тетрацен $C_{18}H_{12}$ и углерод C , составляющие гомологический ряд $C_nH_{(n+6)/2}$ с гомологической разностью C_4H_2 . Все гомологические ряды обозначены линиями. Кроме того внизу графика показаны углеродсодержащие виды топлива с соответствующими массовыми долями водорода в них: А - антрацит; ПА - полуантрацит, К - каменный уголь; Б - бурый уголь; М - мазут, Т - торф, С - сланцы; Д - дрова, СГ - сжиженные газы; НЗГ - нефтезаводские газы; ПГ - попутные газы; Пр - природные газы.

Сделаем допущение, что содержащийся в сухом углеводородном топливе кислород связан полностью с соответствующим количеством углерода в виде nCO_x , в котором соотношение масс $CO_3 : CO_2 = 1 : 4$, а $x = 2,2$.

В этом случае доля «пассивного» углерода, связанного с кислородом, равна $C^n = 0,341O$ (не явно выраженное аналогичное значение связанного углерода в формуле Д.И.Менделеева $C^n = \frac{26}{81}O = 0,321O$, что соответствует отношению масс $CO_3 : CO_2 = 1 : 2$).

Назовем «активным» несвязанный углерод $C^a = C - 0,341O$, участвующий в процессе горения с выделением теплоты.

Энергетическое топливо представляет собой сложный состав различных углеводородов и их гомологов, которые, как правило, находятся в твердом и жидком состоянии, а для природных газов и в газообразном состоянии, в основном метан.

Поэтому удельную теплоту сгорания энергетического топлива можно описать плавной кривой второго порядка, соединяющей значения теплоты сгорания углерода (графит, 32,77 МДж/кг), с одной стороны, и метана (55,50 МДж/кг), с другой:

$$Q_{уд.мс}^e = 3,77 + 121,28C^aH / (C^a + H)^2, \quad (1)$$

где: $Q_{уд.мс}^s$ - удельная высшая теплота сгорания активной углеводородной массы топлива, МДж/кг;

C, O, H - содержание углерода, кислорода, водорода в долях исследуемой массы топлива.

Умножив выражение (1) на количество углеводородной горючей массы $C^a + H = C - 0,341O + H$ и прибавив к нему теплоту сгорания серы, получим выражение удельной теплоты сгорания единицы массы исследуемого топлива в мегаджоулях на килограмм:

$$Q_{уд.мс}^s = 32,77(C^a + H) + 121,28 \frac{C^a \cdot H}{C^a + H} + 11S, \quad (2)$$

где: S - содержание серы в долях исследуемой массы топлива.

Проверим достоверность этой формулы на примере дров и антрацита.

Подставив в формулу (1) данные состава дров (51,0С; 6,1Н; 42,3О; 0,6N) с высшей теплотой сгорания этой массы (4850 ккал/кг или 20,35 МДж/кг), определенной в калориметре, получим точно такое же значение удельной высшей теплоты сгорания, МДж/кг:

$$Q_{уд.мс}^s = 32,77(0,3655 + 0,061) + 121,28 \frac{0,3655 \cdot 0,061}{0,3655 + 0,061} = 20,35,$$

где: $C^a = C - 0,341O = 0,51 - 0,341 \cdot 0,423 = 0,3655$.

Аналогично найдем и значение высшей теплоты сгорания горючей $Q = 8100$ ккал/кг массы антрацита следующего состава (в процентах):

93,5С; 2,0Н; 1,4О; 2,3S; 0,8 N /

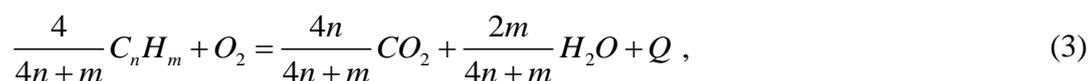
По формуле (2) получим 33,8 МДж/кг или 8060 ккал/кг; здесь имеем разницу -0,5%. По формуле же Д.И.Менделеева теплота сгорания антрацита указанного состава равна 8193 ккал/кг, в этом случае имеем разницу +1,1%.

Более высокую погрешность (2,4%) формула Д.И.Менделеева имеет по теплоте сгорания метана, содержание которого в природном газе достигает 95% и выше.

Таким образом, формула (2) с высокой точностью воспроизводит значение теплоты сгорания энергетического топлива, начиная с антрацита и кончая природным газом, поэтому целесообразно практическое ее использование.

В данных исследованиях автором установлена также ранее неизвестная закономерность, заключающаяся в том, что углеводороды этилен C_2H_4 , бензол C_6H_6 и аннелированные углеводороды нафталин $C_{10}H_8$, антрацен $C_{14}H_{10}$, нафтацен $C_{18}H_{12}$ и т.д. образуют гомологический ряд $C_nH_{(n+6)/2}$ с гомологической разностью C_4H_2 , в то время как все другие ряды углеводородов имеют гомологическую разность CH_2 .

Далее, для проверки достоверности правила Вельтера-Бертье, используем уравнение химической реакции горения углеводородов с кислородом:



Обозначив относительную массу водорода, содержащегося в углеводороде, $\bar{h} = \frac{H}{C+H} = \frac{\frac{m}{n}}{12 + \frac{m}{n}}$, найдем отношение $\frac{m}{n} = \frac{12\bar{h}}{1-\bar{h}}$, которое используем при выводе выражений:

- массы углеводорода, вступающей в реакцию горения, в килограммах на киломоль кислорода:

$$M = \frac{4(12n+m)}{4n+m} = \frac{12}{1+2\bar{h}} = \frac{12(C+H)}{C+3H}; \quad (4)$$

- количества воды (в тех же единицах измерения):

$$W = \frac{18 \cdot 2m}{4n + m} = \frac{36\bar{H}}{1 + 2\bar{H}} = \frac{36H}{C + 3H}. \quad (5)$$

Из полученных выражений (1) и (4) найдем формулу теплоты сгорания топлива с 1 киломолем кислорода:

$$q_{mc}^e = Q_{yd.mc}^e \cdot M = \left[32,77 + 121,28 \frac{C^a \cdot H}{(C^a + H)^2} \right] \frac{12(C^a + H)}{C^a + 3H}, \quad (6)$$

где: q_{mc}^e - высшая теплота сгорания энергетического топлива, вступившего в реакцию горения с 1 киломолем кислорода, МДж/кмоль O_2 ; $C^a = C - 0,341O$.

Низшую теплоту сгорания сухого энергетического топлива с 1 киломолем кислорода можно вычислять с учетом выражения (1.5) по следующей формуле:

$$q_{mc}^n = q_{mc}^e - 2,5W = q_{mc}^e - \frac{90H}{C + 3H}, \quad (7)$$

где: q_{mc}^n - низшая теплота сгорания энергетического топлива, МДж/кмоль O_2 ;
2,5 - теплота парообразования воды при парциальном давлении водяного пара в продуктах сгорания, МДж/кг.

Вычисленные по формулам (6) и (7) и представленные на рис. 3 значения теплоты сгорания топлива с одним киломолем кислорода показывают, что *правило Вельтера-Бертье имеет существенную погрешность* - теплота сгорания различных топлив отличается от среднего ее значения на $\Delta q_{mc}^n = 10\%$ и $\Delta q_{mc}^e = 5\%$.

Поскольку значение высшей теплоты сгорания топлива с одним киломолем кислорода не зависит от значений его влажности и зольности, представляется целесообразным считать этот факт важнейшей характеристикой энергетических топлив.

Вывод. Разработаны теоретические положения, вносящие определенный вклад в развитие теплоэнергетической науки и повышающие точность и снижающие трудоемкость расчета технико-экономических показателей ТЭС и котельных, а именно:

- впервые доказано, что теплота сгорания энергетических топлив нелинейно зависит от содержания в них водорода и углерода; разработана формула, описывающая эту зависимость;
- при исследовании энергетических характеристик топлив установлена ранее неизвестная закономерность: углеводороды этилен, бензол и аннелированные углеводороды (нафталин, антрацен, нафтацен и т.д.) образуют гомологический ряд $C_n H_{(n+6)/2}$ с гомологической разностью $C_4 H_2$, в то время как все другие ряды углеводородов имеют гомологическую разность $C H_2$.

Библиографический список:

1. Правила учета газа (утв. Приказом Минэнерго России от 30.12.2013 № 961 (ред. от 26.12.2014)).
2. Правила учета электрической энергии (утв. Минтопэнерго РФ 19.09.1996, Минстроем РФ 26.09.1996).
3. Правила коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя (утв. Пост. Правит. РФ от 18.11.2013 № 1034 (ред. от 13.02.2019)).
4. Правила организации коммерческого учета воды (утв. Пост. Правит. РФ от 04.09.2013 № 776 (ред. от 29.06.2017)).
5. ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
6. Апатовский Л.Е., Крылова Л.Д., Смирнова Г.Б. Выбор рациональных схем включения калориферных установок в тепловую схему блока. - Энергомашиностроение, 1975, № 6, с.12-15.
7. Баринберг Г.Д., Бененсон Е.И. Влияние параметров свежего пара, промежуточного перегрева и единичной мощности на экономичность теплофикационных турбин. - В сб.: Опыт создания турбин и дизелей. Свердловск, Ср.-Уральск. кн. изд-во, 1969. с. 97-102.

8. Белинский С.Я., Липов Ю.М. Энергетические установки электростанций. Учебник для вузов. - М.: Энергия, 1974. 304 с.
9. Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины. - М.: Энергия, 1976. 264 с.
10. Борисов Е.И., Корытников В.П. Роль теплофикации в энергетике и народном хозяйстве СССР. - В кн.: Теплофикация СССР. - М.: Энергия, 1977, с. 7-24.
11. Буланин В.А. Некоторые вопросы анализа энергобаланса ТЭС// В кн.: Проблемы общей энергетики и топливно-энергетического комплекса. Труды Энергосет'проекта, выпуск 12. - М.: 1979, с. 10-20.
12. Райс (J.G.Rice). Термодинамическая оценка циклов совместной выработки тепла и электроэнергии в газотурбинных установках. Часть 1 - Расчет по методу теплового баланса (Тр. амер. общ. инженеров-механиков. Энергетические машины и установки, 1987, №1. с.1-10.
13. Буланин В.А. Алгоритм оценки влияния отбора тепла от турбоагрегата на его экономичность. - Респ. н.т.к. по электроавтоматизации и автоматическому управлению и регулированию производственных процессов (тезисы докладов), Ташкент, 1975.
14. Буланин В.А. К вопросу определения к.п.д. котлоагрегата и удельного расхода тепла на турбоагрегат. - В респ. н.т.к. энергетиков (тезисы докладов), Ташкент, 1976.
15. Буланин В.А. К вопросу оценки достоверности технико-экономических показателей ТЭС. - У респ. н.т.к. энергетиков (тезисы докладов), Ташкент, 1976.
16. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.

References:

1. Pravila ucheta gaza (utv. Prikazom Minenergo Rossii ot 30.12.2013 № 961 (red. ot 26.12.2014)). [Gas accounting rules (approved by Order of the Ministry of Energy of Russia dated December 30, 2013 No. 961 (as amended on December 26, 2014) (In Russ)]
2. Pravila ucheta elektricheskoy energii (utv. Mintopenergo RF 19.09.1996, Minstroyem RF 26.09.1996). [Rules for accounting for electric energy (approved by the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation on September 19, 1996, and the Ministry of Construction of the Russian Federation on September 26, 1996). (In Russ)]
3. Pravila kommercheskogo ucheta teplovoy energii, teplonositelya (utv. Post. Pravit. RF ot 18.11.2013 № 1034 (red. ot 13.02.2019)). [Rules for the commercial accounting of thermal energy, coolant (approved. Post. Government of the Russian Federation of 11.11.2013 No. 1034 (as amended of 13.02.2019)). (In Russ)]
4. Pravila organizatsii kommercheskogo ucheta vody (utv. Post. Pravit. RF ot 04.09.2013 № 776 (red. ot 29.06.2017)). [Rules for the organization of commercial water metering (approved. Post. Government of the Russian Federation of 04.09.2013 No. 776 (as amended on 06/29/2017)). (In Russ)]
5. GOST 8.586.1-2005. Izmereniye raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhu-yu-shchikh ustroystv. Chast' 1. Printsip metoda izmereniy i obshchiye trebovaniya. [GOST 8.586.1-2005. Measurement of the flow rate and amount of liquids and gases using standard constricting devices. Part 1. The principle of the measurement method and general requirements. (In Russ)]
6. Apatovskiy L.Ye., Krylova L.D., Smirnova G.B. Vybora ratsional'nykh skhem vklyucheniya kalorifernykh ustanovok v teplovuyu skhemu bloka. - Energomashinostroyeniye, 1975, № 6, s.12-15. [Apatovsky L.E., Krylova L.D., Smirnova G.B. The choice of rational schemes for incorporating air heaters into the thermal circuit of the unit. - Power engineering, 1975, No. 6, pp.12-15. (In Russ)]
7. Barinberg G.D., Benenson Ye.I. Vliyaniye parametrov svezhego para, promezhutochnogo peregreva i yedinichnoy moshchnosti na ekonomichnost' teplofikatsionnykh turbin. - V sb.: Opyt sozdaniya turbin i dizeley. Sverdlovsk, Sr.-Ural'sk. kn. izd-vo, 1969. s. 97-102. [Barinberg G.D., Benenson E.I. Influence of parameters of fresh steam, intermediate overheating and unit power on the efficiency of cogeneration turbines. - In Sat: Experience in creating turbines and diesel engines. Sverdlovsk, Sr.-Uralsk. Prince Publishing House, 1969. p. 97-102. (In Russ)]
8. Belinskiy S.YA., Lipov YU.M. Energeticheskiye ustanovki elektrostantsiy. Uchebnik dlya vuzov. - M.: Energiya, 1974. 304 s. [Belinsky S.Ya., Lipov Yu.M. Power plants of power plants. Textbook for high schools. - M.: Energy, 1974. 304 p. (In Russ)]
9. Benenson Ye.I., Ioffe L.S. Teplofikatsionnyye parovyye turbiny. - M.: Energiya, 1976. 264 s. [Benenson E.I., Ioffe L.S. Heating steam turbines. - M.: Energy, 1976.264 p. (In Russ)]
10. Borisov Ye.I., Korytnikov V.P. Rol' teplofikatsii v energetike i narodnom khozyaystve SSSR. - V kn.: Teplofikatsiya SSSR. - M.: Energiya, 1977, s. 7-24. [Borisov E.I., Korytnikov V.P. The role of heating in the energy sector and national economy of the USSR. - In the book: Heating of the USSR. M.: Energy, 1977, p. 7-24. (In Russ)]
11. Bulanin V.A. Nekotoryye voprosy analiza energobalansa TES// V kn.: Problemy obshchey energetiki i toplivno-energeticheskogo kompleksa. Trudy Energoset'proyekt, vypusk 12. - M.: 1979, s. 10-20. [Bulanin V.A. Some issues of analysis of the energy balance of thermal power plants // In the book: Problems of general energy and the fuel and energy complex. Proceedings of the Energy Network project, issue 12. M.: 1979, p. 10-20. (In Russ)]
12. Rice (J.G. Rice). Thermodynamic assessment of the cycles of joint heat and power generation in gas turbine plants. Part 1 - Calculation by the method of heat balance (Tr. Amer. General. Mechanical Engineers. Power Machines and Installations, 1987, No. 1. pp.1-10.

13. Bulanin V.A. Algoritm otsenki vliyaniya otbora tepla ot turboagregata na yego ekonomichnost'. - Resp. n.t.k. po elektroavtomatizatsii i avtomaticheskomu upravleniyu i regulirovaniyu proizvodstvennykh pro-tsessov (tezisy dokladov), Tashkent, 1975 [Bulanin V.A. Algorithm for assessing the influence of heat removal from a turbine unit on its efficiency. - Rep. nt on electroautomatization and automatic control and regulation of production processes (abstracts), Tashkent, 1975. (In Russ)]

14. Bulanin V.A. K voprosu opredeleniya k.p.d. kotloagregata i udel'nogo raskhoda tepla na turboagregat. - V resp. n.t.k. energetikov (tezisy dokladov), Tashkent, 1976. [Bulanin V.A. On the issue of determining the efficiency boiler unit and specific heat consumption for a turbine unit. - V rep. nt.k. power engineers (abstracts), Tashkent, 1976. (In Russ)]

15. Bulanin V.A. K voprosu otsenki dostovernosti tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley TES. - U resp. n.t.k energetikov (tezisy dokladov), Tashkent, 1976. [Bulanin V.A. On the issue of assessing the reliability of technical and economic indicators of thermal power plants. - At rep. ntk of power engineers (theses of reports), Tashkent, 1976. (In Russ)]

16. Ravich M.B. Effektivnost' ispol'zovaniya topliva. M.: Nauka, 1977. 344 s. [Ravich M.B. Fuel efficiency. M. : Nauka, 1977.344 p. (In Russ)]

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.11.2019.

Принята в печать 28.11.2019.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 01.11.2019.

Accepted for publication 28.11.2019.

Для цитирования: Моргун Л.В., Богатина А.Ю., Моргун В.Н. Материалы и современные конструктивные решения для строительных сооружений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (4):167-175 DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-167-175

For citation: L.V. Morgun, A.Yu. Bogatina, V.N. Morgun. Materials and modern structural solutions for building structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 167-175. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-167-175

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 666.973.6:691.147

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-167-175

МАТЕРИАЛЫ И СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Моргун Л.В., Богатина А.Ю., Моргун В.Н.

Донской государственный технический университет,
344000, пл. Гагарина, 1, Ростов- на- Дону, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является доказательство принципиального отличия фибропенобетона от традиционно используемых стеновых материалов по величине прочности на растяжение при изгибе. **Метод.** Выполнен анализ эффективности применения фибропенобетонных теплоизоляционного и конструкционного назначения в строительстве по показателям механических и физических свойств, морозостойкости. **Результат.** Приведены характеристики о важнейших строительно-эксплуатационных свойствах фибропенобетонных теплоизоляционного и конструкционного назначения. Обоснована возможность расширения номенклатуры изделий заводского изготовления в связи с уровнем показателей прочности фибропенобетона на растяжение при изгибе. Представлен опыт практического применения оригинальных изделий из фибропенобетона при возведении жилых и общественных зданий в Ростове-на-Дону. **Вывод.** Показано, что применение фибропенобетона при санации существующей застройки с целью повышения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций может обеспечивать их высокую пожарную безопасность при соблюдении требуемых нормами санитарно-гигиенических условий. Фибропенобетон теплоизоляционного и конструкционного назначения являясь газонаполненным бетоном неавтоклавного твердения позволяет предлагать строительному комплексу РФ новые конструктивные решения, применение которых на практике способствует: расширению номенклатуры изделий заводского изготовления; снижению энергопотребления в строительном комплексе; способствует многообразию архитектурного облика зданий.

Ключевые слова: фибропенобетон, прочность на растяжение при изгибе, блоки, галтели, перемычки, карнизы

BUILDING AND ARCHITECTURE

MATERIALS AND MODERN STRUCTURAL SOLUTIONS FOR BUILDING STRUCTURES

L.V.Morgun, A.Yu.Bogatina, V.N.Morgun
Don State Technical University,
1 Gagarina pl., Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract Objectives. *The aim of the work is to demonstrate the fundamental difference between fibre-reinforced foam concrete and traditionally-used wall materials in terms of tensile strength.*
Method. *An analysis of the effectiveness of heat-insulating and structural fibre-reinforced concrete in terms of their mechanical and physical properties, including frost resistance, is carried out.*
Results. *The characteristics of the most important operational properties of fibre-reinforced foam concrete for insulating and structural purposes are given. The possibility of expanding the range of prefabricated products in connection with the level of tensile strength of fibre-reinforced foam concrete under bending is substantiated. Empirical data concerning the practical use of original products from fibre-reinforced foam concrete in the construction of residential and public buildings in Rostov-on-Don is presented.*
Conclusion. *It is shown that, in order to increase the heat transfer resistance of building envelopes, the use of fibre-reinforced foam concrete in the rehabilitation of existing buildings can ensure their high fire safety subject to the required sanitary and hygienic conditions. Fibre-reinforced foam concrete, being a gas-filled concrete of non-autoclave hardening, allows new design solutions to be offered for heat-insulating and structural purposes in the construction complex of the Russian Federation, which practical application expands the range of factory-made products, reduces energy consumption and contributes to the diversity of the architectural appearance of buildings.*
Keywords: *fibre-reinforced foam concrete, tensile strength in bending, blocks, angle fillets, lintels, cornices*

Введение. Стратегические цели социально-экономического развития страны могут быть достигнуты только при успешном решении задач, стоящих перед комплексом стройиндустрии. Строить желательно из материалов, которые позволяют надежно и эффективно достигать требуемых показателей эксплуатационных свойств возводимых объектов.

Анализ публикаций посвященных этой проблеме [1-3] показывает, что специалисты, принимающие ответственные решения, влияющие на эффективность развития строительного комплекса в течение многих лет, не всегда учитывают те многочисленные факторы, которые при эксплуатации строительных объектов вместо ожидаемой пользы приносят вред [4-7].

Полагаем, что достижение амбициозных целей в строительстве зависит от эффективности применения результатов исследовательской деятельности отечественной и зарубежной науки. В качестве примера можно привести Строительный комплекс ЮФО. В настоящее время им успешно используются результаты научно-исследовательских работ, способствующие снижению материал- и энергоёмкости в строительстве [8,9].

Постановка задачи. В нашем регионе свою производственную деятельность, на основе разработок ученых Донского государственного технического университета осуществляет ряд малых предприятий стройиндустрии, которые предлагают строителям материалы и изделия со свойствами, соответствующими запросам XXI века.

Свойства фибропенобетона - неавтоклавного газонаполненного бетона, предназначенного для устройства теплоизоляции и стен зданий, приведены в табл.1.

Таблица 1. Свойства фибропенобетона
Table 1. Properties of fiber concrete

Плотность кг/м ³ Density kg / m ³	Прочность, МПа Strength, MPa		Паропроницаемость, мг/м ² ·ч Vapor permeability, mg / m ² · h	Морозостойкость, циклы Frost resistance cycles	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W / (m · °C)			Индекс звукоизоляции, дБ при толщине 100/300 мм Soundproofing Index, dB with a thickness of 100/300 mm
	сжатие compression	растяжение при изгибе bending tensile			сухого dry	А	Б	
300	0,5...0,75	0,1...0,3	0,23	не норм	0,069	0,09	0,11	29/34
400	0,75...2,0	0,3...1,0	0,21	50	0,078	0,10	0,13	32/40
500	1,5...3,5	0,75...2,5	0,18	75	0,088	0,13	0,16	35/44
600	2,0...5,0	1,0...3,5	0,15	100	0,113	0,17	0,21	37/46
700	3,5...6,0	2,0...4,5	0,13	100	0,142	0,21	0,24	39/48
800	5,0...7,5	2,5...5,0	0,10	125	0,171	0,24	0,27	40/51
900	6,0...10,0	3,0...5,0	0,09	150	0,198	0,28	0,30	43/54

Методы исследования. Для анализа эффективности применения стеновых материалов важно учитывать, что по данным [10] плотность кладки из эффективного кирпича составляет 1500...1800 кг/м³ при теплопроводности 0,61...0,64 Вт/м·К, паропроницаемости 0,11...0,12 мг/м²·ч, морозостойкости не более F50 и прочности на растяжение при изгибе не более 3 МПа.

Принципиальное отличие фибропенобетона от традиционно используемых стеновых материалов, состоит в величине прочности на растяжение при изгибе.

Для большинства каменных материалов, применяемых в строительстве, этот показатель составляет 5...15% от прочности на сжатие. Исключение составляет асбестоцемент, у которого прочность на растяжение при изгибе достигает 50...120% от прочности на сжатие [11]. Более 100 лет известно, что изделия из асбестоцемента отличаются высокой долговечностью и низкой материалоемкостью.

У фибропенобетона прочность на растяжение при изгибе составляет 50...80% от прочности на сжатие, поэтому строительные конструкции из него так же обладают улучшенными технико-экономическими свойствами и большей долговечностью, чем те, которые не имеют в своём составе волокон. Кроме того, свойства фибропенобетонных смесей позволяют изготавливать из них изделия сложной формы. На рис.1 отражены конструктивные особенности фибропенобетонных блоков, форма которых оказалась важной для производительности труда при кладке стен. По данным ООО «Вант» и «Генстрой», которые применяли сплошные фибропенобетонные блоки плотностью 500 кг/м³ для утепления стен производительность труда только при выполнении кладочных работ, за счёт пазошпоночной конструкции и точных размеров, возросла в 2...2,5 раза. Поскольку технологические допуски при изготовлении изделий из фибропенобетона составляют ±1 мм, то стены из них не нуждаются в оштукатуривании.

Исключение штукатурных, из обязательного набора строительных работ, имеет следующие преимущества (рис. 2.):

- снижается материалоемкость стеновых конструкций;
- строители перестают зависеть от части «мокрых процессов» на объекте;
- улучшается сопротивление ограждений теплопередаче;
- понижается уровень квалификационных требований к рабочим;
- повышается производительность труда.

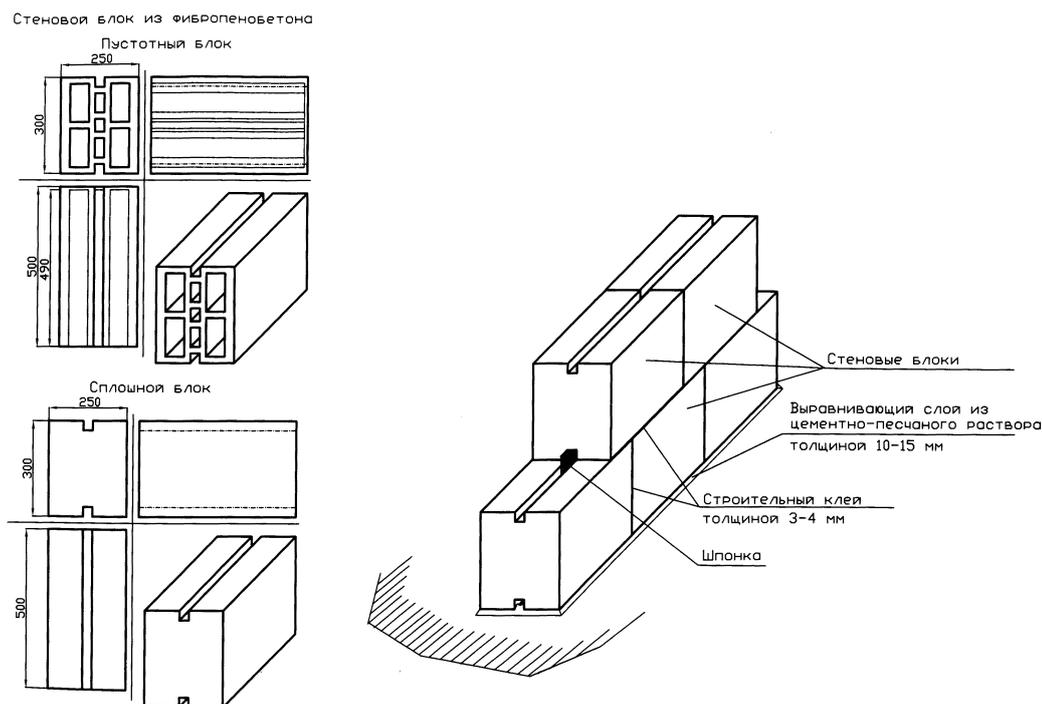


Рис. 1. Конструктивные особенности блоков из фибропенобетона
Fig. 1. Design features of blocks made of fiber-reinforced concrete



Рис. 2. Вид кладки из фибропенобетонных блоков до начала отделочных работ
Fig. 2. Type of masonry from fiber-reinforced concrete blocks before the start of finishing work

За счет достаточной прочности материала на изгиб и растяжение стены из фибропенобетонных изделий позволяют строителям сохранять традиционную технологию крепления труб и радиаторов отопления. В случае применения других видов газонаполненных бетонов (пенно- или газо-), из-за их недостаточной прочности при растяжении, необходимо инженерное оборудование крепить к перекрытиям, что создает дополнительные сложности при устройстве и эксплуатации чистого пола.

Кладку стен из фибропенобетонных блоков целесообразно осуществлять не на растворе, а на клеях из сухих смесей. Применение сухих смесей в технологии строительного производства позволяет выполнять кладочные работы при температуре от $+40^{\circ}\text{C}$ до -16°C , то есть фактически исключить понятие «сезонности». Кроме того, тонкие слои клеев обеспечивают проектное сопротивление теплопередаче, которое невозможно сохранить при кладке блоков на цементно-песчаном растворе.

Достигнутые на практике показатели прочности фибропенобетона на растяжение при изгибе обеспечили возможность расширения номенклатуры изделий из газонаполненных бетонов. Впервые в строительной практике РФ для обеспечения нормируемых показателей сопротивления теплопередаче и снижения трудоемкости работ на площадке стало возможным применение галтелей (рис. 3).



Рис. 3. Крепление фибропенобетонных галтелей к перекрытиям, выходящим на фасад зданий

Fig. 3. Fastening of fiber-reinforced concrete fillets to ceilings facing the building facade

Галтели изготавливаются из бетона плотностью $0,5 \text{ т/м}^3$ и устанавливаются в местах сопряжения железобетона с оконными и дверными проемами для исключения появления конденсата внутри отапливаемых помещений.

Из фибропенобетона плотностью $700 \dots 800 \text{ кг/м}^3$, армированного металлическими каркасами стройиндустрия Ростова-на-Дону изготавливает перемычки, эксплуатационные свойства которых не уступают равновеликим, изготавливаемым из бетона слитной структуры класса В20 [12]. Такие перемычки предназначены для применения в стенах с величиной перекрываемого пролета до 3 м и нагрузкой до 1000 кг/пог.м .

Обсуждение результатов. Практика применения фибропенобетона строительными организациями показывает, что грамотное использование научных достижений позволяет эффективно расходовать материальные ресурсы, снижать материал- и трудоёмкость в строительстве. Из опыта фирмы «МИС» следует, что замена керамзитобетонной теплоизоляции, между подземным гаражом и жилыми помещениями, на фибропенобетонную плотностью 700 кг/м^3 позволило снизить постоянную нагрузку на перекрытие с 200 до 126 кг/м^2 , т.е. на 37%.

Сегодня важно учитывать, что XX век многократно умножил количество и интенсивность агрессивных факторов, воздействующих на психику человека и сооружения [13,14]. Только концентрация углекислоты в атмосфере возросла более чем на 20%. Поэтому к числу важнейших приоритетов архитектурно-строительного проектирования XXI века относят требования к комплексному повышению качества строительства и его архитектурно-художественной выразительности.

Скорость развития современной урбанизации предопределяет преимущественное возведение каркасных зданий [15,16]. Основная профессиональная деятельность конструкторов и архитекторов направлена на улучшение герметичности строительных конструкций, совершенствование вентиляции, тепло- и звукоизоляции, повышение огнестойкости и защиту от солнечной радиации [17]. Идут активные поиски функционального совершенствования архитектурного облика зданий с целью обеспечения высокого уровня комфортности, безопасности и энергосбережения. Одним из примеров приближения к решению этой проблемы может быть опыт архитекторов и строителей, который приобретен в ходе строительства офисного здания «Купеческий двор», расположенного в историческом центре Ростова-на-Дону. В ходе возведения этого здания была выпущена крупная партия фибропеножелезобетонных изделий сложной геометрической формы, предназначенных для сборки карнизов (рис. 4 а и б). Изделия способны эксплуатироваться без специальной защиты от атмосферных воздействий.



а) фибропеножелезобетонные карнизы заводского изготовления

a) prefabricated fiber-reinforced concrete cornices

б) монтаж карнизных блоков на объекте «Купеческий двор»

b) installation of cornice blocks at the "Merchant yard"

Рис. 4. Фибропеножелезобетонные изделия сложной геометрической формы, предназначенные для сборки карнизов

Fig. 4. Fiber-reinforced concrete products of complex geometric shape, intended for the assembly of cornices

Одной из самых важных и сложных современных градостроительных проблем является необходимость повышения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий, построенных в XX веке [18,19]. Важно с минимальными материальными затратами не только повышать их теплозащиту, но и улучшать архитектурный облик кварталов массовой жилищной застройки.

Все виды санации зданий должны обеспечивать понижение уровня энергопотребления и обеспечивать безопасность эксплуатации. В настоящее время самое широкое распространение получили следующие способы утепления фасадов: вентилируемые или навесные; многослойные «мокрые» штукатурные. Обе системы способствуют понижению уровня энергопотребления, улучшают шумоизоляцию и разнообразят архитектурный облик зданий. Однако, с точки зрения практиков [20-22] они не свободны от недостатков.

Вентилируемые фасады дороги, имеют многочисленные ограничения по видам крепежных материалов и элементов подконструкций, не всегда безопасны в пожарном отношении. Как правило, импортного производства. Штукатурные фасадные системы дешевле навесных, однако, наличие «мокрых процессов» создаёт ряд неудобств, связанных с сезонностью работ и применением ручного труда.

Использование фибропенобетона для изготовления изделий утепления фасадов способно существенно снизить стоимость фасадных систем при одновременном улучшении эксплуатационных и эстетических показателей. Универсальные формообразующие свойства, высокая прочность при растяжении и изгибе в сочетании с низкой плотностью позволяют изготавливать из фибропенобетона плитные изделия для утепления фасадов: рядовые карнизные угловые и т.п. Все изделия могут иметь в горизонтальном сечении П-образную или плоскую форму и крепиться к наружным стенам зданий анкерными устройствами.

Повышение герметичности утепляемых конструкций, при сохранении требуемого уровня паропроницаемости, возможно путём применения цементных клеев, наносимых на поверхность примыкания плит утепления в местах их контакта со стенами.

Регулируемые параметры плитных изделий в сочетании с высокой морозостойкостью фибропенобетона позволяют прогнозировать, что такие изделия могут быть привлекательными практически во всех температурных и климатических зонах России.

Фасадные системы из фибропенобетона пригодны и для строительства новых зданий со сложным архитектурным обликом. Фактура их поверхности может иметь любую сложность: от орнаментальной до имитации каменной кладки.

Утепление фасадов зданий фибропенобетонными плитными изделиями позволяет на практике достигать следующих преимуществ:

- использовать недефицитное и экологически чистое сырьё;

- при транспортировании и монтаже исключить потери из-за трещин;
- монтировать в любое время года в связи с отсутствием «мокрых процессов»;
- сочетать в себе теплоизолирующие и отделочные функции;
- исключать потребность в усилении несущих конструкций существующих зданий, в грузоподъемном и транспортном оборудовании;
- обладать многообразием по форме и цветовой гамме;
- безопасность в пожарном и медико-биологическом отношениях;
- обладает морозостойкостью, шумоизоляционными и теплоизоляционными свойствами;
- обеспечивают повышение индустриализации строительно-монтажных работ и снижение материалоёмкости при одновременном улучшении эксплуатационных характеристик строительных объектов.

Вывод. Считаю важным подчеркнуть, что фибропенобетон теплоизоляционного и конструкционного назначения, являясь газонаполненным бетоном неавтоклавного твердения, позволяет предлагать строительному комплексу РФ новые конструктивные решения, применение которых на практике способствует:

- расширению номенклатуры изделий заводского изготовления;
- снижению энергопотребления в строительном комплексе;
- обеспечению нормированных санитарно-гигиенических условий внутри помещений;
- способствовать многообразию архитектурного облика зданий.

Библиографический список:

1. Корниенко С.В. Проблемы теплозащиты наружных стен современных зданий // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013 Вып. 1(25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1\(25\)_1.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1(25)_1.pdf)
2. Алехин С.В., Новиков А.В. Типология дефектов систем теплоизоляции «мокрого» типа // Фасадные системы, №7 (37), 2004. – С.38-40.
3. Голованова Л.А., Блюм Е.Д. Энергоэффективные строительные конструкции и технологии // «Ученые заметки ТОГУ» Т. 5, № 4, 2014. – С. 71-77.
4. Гнездилова О.А., Хрюкин Ю.А. Современные энергосберегающие материалы и технологии в ограждающих конструкциях. Ч.1. Стены и фасады. Иркутск: ИрГУПС, 2017 - 81 с.
5. Гагарин В. Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009 № 5 С. 297-305.
6. Альбинская Ю.С., Усачев С.М., Ресснер Ф., Рудаков О.Б. Направление создания микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом / Научный вестник. Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. Выпуск № 2 (7), 2013 г. – 21-27 с.
7. Деревянных А. О., Зимич В. В. Применение экологически чистых материалов и энергосберегающих технологий в строительстве домов // Архитектура, строительство и дизайн, №3, 2015. – С. 30-36.
8. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю., Ревакин А.А. Вклад фибры в эксплуатационную надежность бетонов // Сб.тр. «Дефекты зданий и сооружений, усиление строительных конструкций», СПб, ВИТУ, 2017. – С.257-281.
9. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Конструкционные фибропенобетоны со стеклопластиковой стрежневой арматурой в транспортном строительстве // Вестник РГУПС, Ростов-на-Дону, 2016, № 4 (64). – С. 92-98.
10. Леденев В.И., Матвеева И.В. Физико-технические основы эксплуатации основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий: учеб. пособие / Тамбов : Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2005. - 160 с.
11. Малоедов С.Д., Выгузов В.Н. Вентилируемые фасады – эффективное решение проблемы энергосбережения // Строительные материалы, №5, 2001. – С. 24.
12. Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Теплоэффективные переемы для гражданских зданий // Сб.тр. «Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения», 8-акад. чтения РААСН, Самара, 2004. С.337-339.
13. Дружилов С.А. Психологические факторы здоровья человека и детерминанты его негативных психических состояний в труде // Международный журнал экспериментального образования, №10, 2013. – С.250-253.
14. Советова О. С. Основы социальной психологии инноваций. СПб.: Изд. дом Санкт-Петербургского государственного университета, 2010. - 152 с.
15. Региональные различия в заболеваемости шизофренией в Дании (резюме) // Обзор современной психиатрии. Вып. 9 2001 // <http://www.psychosor.org>. Рецензируемая статья: Schelin E.M., Munk J. Orgensen P., Olesen A.V., Gerlach J. Regional differences in schizophrenia in Denmark // Asta psychiatrica scandinavica, 2000 № 101 // <http://onlinelibrary.wiley.com>.
16. Михеев А.А., Шутникова Е.А. Социальные проблемы урбанизации и сити-менеджмент на этапе постмодерна // Государственное управление: Проблемы и перспективы. Право и управление. XXI век. №2(35), 2015. – С.73-78.
17. Осипов А.И., Ефименко Э.Р. Техническая эксплуатация зданий и сооружений : электронное учеб. пособие. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015 – 154 с.

18. Соха В.Г., Меньлюк А.И., Бабий И.Н., Борисов А.А., Волканов В.К. Влияние сроков эксплуатации систем теплоизоляции с отделкой штукатурками на когезионную прочность утеплителя // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник №95. – С.34-38.
19. Петров К.С., Вонгай А.О., Саковская К.А. Повышение тепловой защиты зданий различных назначений в условиях городской застройки // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015). <http://naukovedenie.ru/PDF/109TVN315.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/109TVN315.
20. Цыкановский Е. Ю., Гагарин В. Г., Грановский А. В., Павлова М. О., Кучеренко В.А. Вентилируемые фасады. [Электронный ресурс]. (дата обращения: 09.05.2019).
21. Калинин А.Ю. Основные проблемы контроля качества, связанные с выполнением фасадных отделочных работ // Строительные материалы, № 7, 2003. - С. 19-21.
22. Хасанов И.Р., Молчадский И.С., Гольцов К.Н., Пестрицкий А.В. Пожарная опасность навесных фасадных систем // Пожарная безопасность. №5, 2006. – С. 36-47.

References:

1. Korniyenko S.V. Problemy teplozashchity naruzhnykh sten sovremennykh zdaniy// Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politicheskaya. 2013 Vyp. 1(25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1\(25\)_1.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1(25)_1.pdf) Korniyenko S.V. Problems of thermal protection of the outer walls of modern buildings // Internet bulletin of VolgGASU. Ser.: Political. 2013 vol. 1 (25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1\(25\)_1.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Kornienko-2013_1(25)_1.pdf) (In Russ)]
2. Alekhin S.V., Novikov A.V. Tipologiya defektov sistem teploizolyatsii «mokrogo» tipa.//Fasadnyye sistemy, №7 (37), 2004. – S.38-40. [Alekhin S.V., Novikov A.V. A typology of defects in wet-type thermal insulation systems. // Facade systems, No. 7 (37), 2004. - P.38-40. (In Russ)]
3. Golovanova L.A., Blyum Ye.D. Energoeffektivnyye stroitel'nyye konstruksii i tekhnologii//«Uchenyye zametki TOGU» T. 5, № 4, 2014. – S. 71-77. [Golovanova L.A., Blum E.D. Energy-efficient building constructions and technologies // “Scientific notes of PNU” T. 5, No. 4, 2014. pp. 71-77. (In Russ)]
4. Gnezdilova O.A., Khryukin YU.A. Sovremennyye energosberegayushchiye materialy i tekhnologii v ograzhdayushchikh konstruksiyakh. CH.1.Steny i fasady. Irkutsk: IrGUPS, 2017 - 81 s. [Gnezdilova OA, Khryukin Yu.A. Modern energy-saving materials and technologies in building envelopes. Part 1. Walls and facades. Irkutsk: IrGUPS, 2017. 81 p. (In Russ)]
5. Gagarin V. G. Teplofizicheskiye problemy sovremennykh stenovykh ograzhdayushchikh konstruksiy mno-goetazhnykh zdaniy// Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2009 № 5 S. 297-305. [Gagarin V. G. Thermophysical problems of modern wall enclosing structures of multi-storey buildings // Academia. Architecture and construction. 2009 No. 5 pp. 297-305. (In Russ)]
6. Al'binskaya YU.S., Usachev S.M., Ressler F., Rudakov O.B. Napravleniye sozdaniya mikrokapuliro-vannykh teploakkumuliruyushchikh materialov s fazovym perekhodom / Nauchnyy vestnik. Voronezhskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. Seriya: Fiziko-khimicheskiye problemy i vysokiye tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya. Vypusk № 2 (7), 2013 g. – 21-27 s. [Albinskaya Yu.S., Usachev S.M., Ressler F., Rudakov O.B. The direction of creation of microencapsulated heat-storage materials with a phase transition / Scientific Herald. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. Issue No. 2 (7), 2013 pp. 21-27 (In Russ)]
7. Derevyannykh A. O., Zimich V. V. Primeneniye ekologicheskikh chistykh materialov i energosberegayushchikh tekhnologiy v stroitel'stve domov// Arkhitektura, stroitel'stvo i dizayn, №3, 2015. – S. 30-36. [Derevyannykh A. O., Zimich V. V. The use of environmentally friendly materials and energy-saving technologies in the construction of houses // Architecture, Construction and Design, No. 3, 2015. - P. 30-36.
8. Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.YU., Revyakin A.A. Vklad fibry v ekspluatatsionnyuyu nadezh-nost' betonov// Sb.tr. «Defekty zdaniy i sooruzheniy, usileniye stroitel'nykh konstruksiy», SPb, VITU, 2017. – S.257-281. [Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.Yu., Revyakin A.A. Fiber contribution to the operational reliability of concrete // Sb.tr. “Defects of buildings and structures, strengthening of building structures”, St. Petersburg, VITU, 2017. pp.257-281. (In Russ)]
9. Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.YU. Konstruksionnyye fibropenobetonny so stekloplastiko-voy strezhnevoy armaturoy v transportnom stroitel'stve// Vestnik RGUPS, Rostov-na-Donu, 2016, № 4 (64). – S. 92-98. [Morgun V.N., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Structural fiber-reinforced concrete with fiberglass rod reinforcement in transport construction // Vestnik RGUPS, Rostov-on-Don, 2016, No. 4 (64). pp. 92-98. (In Russ)]
10. Ledenev V.I., Matveyeva I.V. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy ekspluatatsii naruzhnykh kirpichnykh sten grazhdanskikh zdaniy: ucheb. posobiye / Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2005. - 160 s. [Ledenev V.I., Matveeva I.V. Physico-technical fundamentals of the operation of the outer brick walls of civil buildings: textbook. allowance / Tambov: Publishing house of Tamb. state those. University, 2005. 160 p. (In Russ)]
11. Maloyedov S.D., Vygruzov V.N. Ventiliruyemye fasady – effektivnoye resheniye problemy energo-sberezheniya// Stroitel'nyye materialy, №5, 2001. – S. 24. [Maloedov S.D., Vygruzov V.N. Ventilated facades - an effective solution to the problem of energy conservation // Building materials, No. 5, 2001. pp 24. (In Russ)]
12. Morgun L.V., Bogatina A.YU. Teploeffektivnyye peremychki dlya grazhdanskikh zdaniy //Sb.tr. «So-vremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya», 8-akad. chteniya RAASN, Samara, 2004. S.337-339. [Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Heat-efficient lintels for civil buildings // Sb.tr. "The current state and prospects of development of building materials science", 8-acad. Reading RAASN, Samara, 2004. S.337-339.
13. Druzhilov S.A.Psikholicheskiye faktory zdorov'ya cheloveka i determinatny yego negativnykh psi-khicheskikh sostoyaniy v trude //Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya, №10, 2013. – S.250-253. [Druzhilov S.A. Psychological factors of human health and the determinant of its negative mental states in labor // International Journal of Experimental Education, No. 10, 2013. pp.250-253. (In Russ)]
14. Sovetova O. S. Osnovy sotsial'noy psikhologii innovatsiy. SPb.: Izd. dom Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2010. - 152 s. [Sovetova O.S. Fundamentals of the social psychology of innovation. SPb.: Publ. House of St. Petersburg State University, 2010. 152 p. (In Russ)]
15. Regional'nyye razlichiya v zabolevayemosti shizofreniyey v Danii (rezyume) // Obzor sovremennoy psixiatrii. Vyp. 9 2001 // <http://www.psychosor.org>. Retsenziruyemaya stat'ya: Schelin E.M., Munk J. Or-gensen P., Olesen A.V., Gerlach J. Regional differences in schizophrenia in Denmark // Asta psychiatrica scandinavica, 2000 № 101// <http://onlinelibrary.wiley.com>. [Regional differ-

- ences in the incidence of schizophrenia in Denmark (summary) // Review of modern psychiatry. Vol. 9 2001 // <http://www.psychos.org>. Reviewed article: Schelin E.M., Munk J. Orgensen P., Olesen A.V., Gerlach J. Regional differences in schizophrenia in Denmark // *Asta psychiatrica scandinavica*, 2000 No. 101 // <http://onlinelibrary.wiley.com>. (In Russ)]
16. Mikheyev A.A., Shutnikova Ye.A. Sotsial'nyye problemy urbanizatsii i siti-menedzhment na etape postmoderna // Gosudarstvennoye upravleniye: Problemy i perspektivy. Pravo i upravleniye. KHKH1 vek. №2(35), 2015. – S.73-78. [Mikheev A.A., Shutnikova Ye.A. Social problems of urbanization and city management at the postmodern stage // *Public Administration: Problems and Prospects. Law and Management. XXI century. No. 2 (35), 2015. pp.73-78. (In Russ)]*
17. Osipov A.I., Yefimenko E.R. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zdaniy i sooruzheniy : elektronnoye ucheb. posobiye. – Tol'yatti : Izd-vo TGU, 2015 – 154 с. [Osipov A.I., Efimenko E.R. Technical operation of buildings and structures: electronic textbook. allowance. - Tolyatti: Publishing house of TSU, 2015 154 p. (In Russ)]
18. Sokha V.G., Menelyuk A.I., Babiy I.N., Borisov A.A., Volkanov V.K. Vliyaniye srokov ekspluatatsii sistem teploizolyatsii s otdelkoy shtukaturkami na kogeziionnyuy prochnost' uteplitelya // Kommu-nal'noye khozyaystvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskii sbornik №95. – S.34-38. [Soha V.G., Meneiluk A.I., Babiy I.N., Borisov A.A., Volkanov V.K. The influence of the operating life of thermal insulation systems with stucco finishing on the cohesive strength of the insulation // *Utilities of cities. Scientific and technical collection No. 95. pp. 34-38. (In Russ)]*
19. Petrov K.S., Vongay A.O., Sakovskaya K.A. Povysheniye teplovoyy zashchity zdaniy razlichnykh naznache-niy v usloviyakh gorodskoy zastroyki // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIYE» Tom 7, №2 (2015). [http:// naukovedenie.ru/PDF/109TVN315.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/109TVN315.pdf) (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. YAz. rus., angl. DOI: 10.15862/109TVN315. [Petrov K.S., Wongai A.O., Sakovskaya K.A. Improving the thermal protection of buildings of various purposes in urban development // Internet journal "SCIENCE" Volume 7, No. 2 (2015). [http:// naukovedenie.ru/PDF/109TVN315.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/109TVN315.pdf) (free access). Zag from the screen. Yaz. Russian, English DOI: 10.15862 / 109TVN315. (In Russ)]
20. Tsykanovskiy Ye. YU., Gagarin V. G., Granovskiy A. V., Pavlova M. O., Kucherenko V.A. Ventiliruyemyye fasady. [Elektronnyy resurs]. (data obrashcheniya: 09.05.2019). [Tsykanovsky E. Yu., Gagarin V. G., Granovsky A. V., Pavlova M. O., Kucherenko V. A. Ventilated facades. [Electronic resource]. (Date of treatment: 05/09/2019) (In Russ)]
21. Kalinin A.YU. Osnovnyye problemy kontrolya kachestva, svyazannyye s vypolneniyem fasadnykh otde-lochnykh rabot // Stroitel'nyye materialy, № 7, 2003. - S. 19-21. [Kalinin A.Yu. The main problems of quality control associated with the implementation of facade finishing work // *Building Materials*, No. 7, 2003. pp. 19-21. (In Russ)]
22. [Khasanov I.R., Molchadskiy I.S., Goltsov K.N., Pestritskiy A.V. Pozharnaya opasnost' navesnykh fa-sadnykh sistem // Pozharnaya bezopasnost'. №5, 2006. – S. 36-47.
Khasanov I.R., Molchadsky I.S., Goltsov K.N., Pestritsky A.V. Fire danger of hinged garden systems // *Fire safety*. No. 5, 2006. pp. 36-47. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Моргун Любовь Васильевна, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов; e-mail: konst-lvm@yandex.ru

Богатина Алла Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра изыскания, проектирование и строительство железных дорог; e-mail: ips@rgups.ru

Моргун Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерно-строительных дисциплин; e-mail: vmorgun@sfedu.ru

Information about the authors.

Lyubov V. Morgun, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department Building Materials. e-mail: konst-lvm@yandex.ru

Alla Yu. Bogatina, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Survey, Design and Construction of Railways; e-mail: ips@rgups.ru

Vladimir N. Morgun, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Engineering and Construction Disciplines; e-mail: vmorgun@sfedu.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2019.

Принята в печать 19.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10.2019.

Accepted for publication 19.11.2019.

Для цитирования: Муртазалиев Г.М., Батдалов М.М., Акаев А.И., Булгаков А.И., Пайзулаев М.М. Расчет и конструирование ячеистых несущих слоев покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4):176-185. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-176-185

For citation: G.M. Murtazaliev, M.M. Batdalov, A.I. Akayev, A.I. Bulgakov, M.M. Payzulaev. Calculation and design of cellular carrying layers of airfield runway pavements. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4):176-185. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-176-185

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624. 016.5

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-176-185

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТЫХ НЕСУЩИХ СЛОЕВ ПОКРЫТИЙ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ПОЛОС АЭРОДРОМОВ

Муртазалиев Г.М.¹, Батдалов М.М.¹, Акаев А.И.², Булгаков А.И.¹, Пайзулаев М.М.¹

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

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства,
²367008, г. Махачкала, ул. Д. Атаева, 5, Россия

Резюме. Цель. Необходимость обеспечения надежного функционирования дорогостоящих аэродромных сооружений ставит большие задачи перед изыскателями, проектировщиками, строителями и эксплуатационниками этих сооружений. Целью исследования является предложенная авторами модель технологического решения несущего слоя искусственных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов (ИВППА) в виде сотовой структуры из заклпнутых стальных листов заполненной бетоном и методика оценки прочности и определения жесткостных параметров его заполнителя. **Метод.** Предложена методика оценки предельной прочности и определения реальных жесткостных параметров несущих слоев ИВППА при конструктивном решении вопроса о работе бетона в стесненных условиях («эффект обоймы») от воздействия многократно-повторных эксплуатационных самолетных нагрузок. Она базируется на основных положениях деформационной теории железобетона, разработанной Бондаренко В.М. и развитых применительно к объемно напряженному состоянию железобетонных конструкций в работах Г.А. Гениева, К.Л. Сурова и Н.И., Римшина В.И. **Результат.** Получена аналитическая зависимость для установления дискретного значения, обобщенного (интегрального) параметра деформации материала несущего слоя, т.е. уравнение механического состояния сталежелезобетона в условиях сложного напряженного состояния и многократно-повторном приложении эксплуатационной самолетной нагрузки, в произвольной напряженной точке ИВППА, с учетом влияния изменения прочности, армирования, температурно-влажностных и реологических факторов. **Вывод.** Внедрение в проектные решения несущих слоев ИВППА новых технологических принципов армирования и укладки бетона, позволяет в значительной степени повысить их несущую способность и жесткость за счет перераспределения энергии воздействия и эффективного использования свойств материалов конструкций при загрузении.

Ключевые слова: жесткие покрытия искусственных взлетно-посадочных полос аэродромов (ИВППА), несущий слой ИВППА, структура, эксплуатационные воздействия, расчетная модель, предельные состояния ИВППА, расчет прочности и жесткости, объемно напряженное состояние, критерий прочности, интенсивность предельных напряжений, обобщенный жесткостной параметр деформации, мгновенный модуль деформации, деформации ползучести

BUILDING AND ARCHITECTURE

CALCULATION AND DESIGN OF CELLULAR CARRYING LAYERS OF AIRFIELD
RUNWAY PAVEMENTS

G.M. Murtazaliev¹, M.M. Batdalov¹, A.I. Akayev², A.I. Bulgakov¹, M.M. Payzulaev¹

¹Daghestan State Technical University,

¹70 Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Daghestan State University of National Economy,

²5 D. Ataeva St., Mahachkala 367008, Russia

Abstract. Objectives. The need to ensure the reliable functioning of expensive airfield structures poses great challenges for surveyors, designers, builders and operators of these structures. These tasks are complicated by the continuous development of aircraft, an increase in the intensity of their movement, an increase in mass, take-off and landing characteristics of aircraft and the degree of operational impact of aircraft on airfield structures. The aim of the study is the technological solution model proposed by the authors for the carrier layer of artificial runway pavement in the form of a honeycomb structure of closed steel sheets filled with concrete along with a method for assessing the strength and determining the rigidity of its aggregate. **Method.** A method is proposed for assessing the ultimate strength and determining the real stiffness parameters of structural layers of a runway with a constructive solution to the question of concrete work in cramped conditions ("cage effect") from the impact of manifold repeated operational aircraft loads. This method is based on the fundamental principles of the deformation theory of reinforced concrete, developed by V.M. Bondarenko and elaborated in relation to the volumetric stress state of reinforced concrete structures in the works by G.A. Geniev, K.L. Surov and V.I. Rimshin. **Result.** An analytical dependency is obtained for establishing a discrete value, a generalised (integral) parameter of the material deformation of the carrier layer, i.e. the equation of the mechanical state of steel-reinforced concrete in a complex stress state, as well as the repeated application of an operational aircraft load at an arbitrary stress point of the artificial runway pavement taking into account the influence of changes in strength, reinforcement, temperature, humidity and rheological factors. **Conclusion.** The introduction of new technological principles for reinforcing and concrete laying into the design solutions of the bearing layers of artificial runway pavement allows their bearing capacity and rigidity to be significantly increased due to the redistribution of impact energy and the efficient use of the properties of structural materials during loading.

Keywords: artificial runway pavement, bearing layer, structure, operational impacts, calculation model, strength and stiffness calculation, volumetric stress state, strength criterion, intensity of ultimate stresses, generalised stiffness strain parameter, instantaneous deformation modulus, creep strain

Введение. Результаты проведенных ранее авторами исследований поведения несущих слоев многослойных искусственных покрытий взлётно-посадочных полос аэродромов (ИВП-ПА) под воздействием эксплуатационных нагрузок воздушных судов (нагрузка от пневмоколес шасси самолета) показали, что увеличение несущей способности и долговечности ИВП-ПА без дополнительного увеличения расхода цемента или применении цементов высоких марок, а также без увеличения процента армирования является актуальной проблемой.

Традиционные конструктивные решения покрытий [1] в виде многослойных плит характеризуются способностью работать на изгиб (рис. 1). ИВП-ПА воспринимают растягивающие и сжимающие усилия и распределяют их на большие площади грунтовых оснований. При этом зона вовлечения в работу материала конструкции от слоя к слою выглядит в виде пирамиды с наклоном образующих в пределах 30-50°.

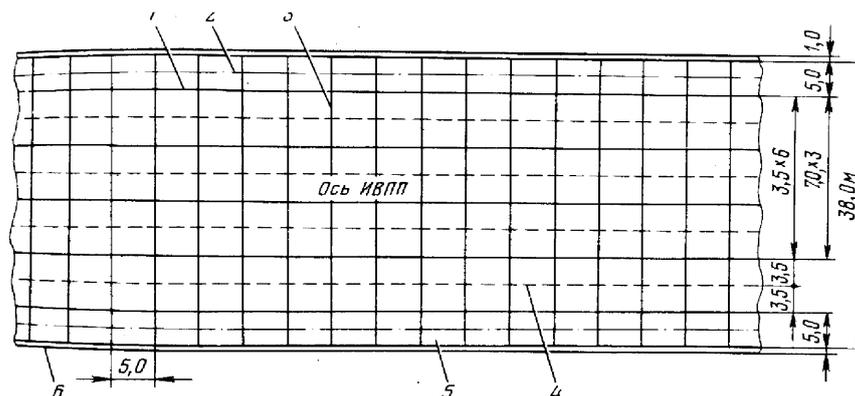


Рис.1. Схема расположения стандартных прямоугольных плит на бетонном покрытии ИВППА:

1-продольный шов; 2-ось лотка; 3 - поперечные швы сжатия; 4 - продольные ложные швы; 5-плита лоткового ряда; 6 – отмостка

Fig. 1. The layout of standard rectangular slabs on the concrete runway IVPPA:

1-longitudinal seam; 2-axis tray; 3 - transverse compression joints; 4 - longitudinal false seams; 5-plate of a tray row; 6 - blind area

Существенным недостатком работы таких конструкций под нагрузкой является низкая прочность бетона на растяжение и малая растяжимость до разрыва. Деформация удлинения бетона к моменту разрушения от разрыва составляют около 0,15 мм/м. При таких деформациях удлинении напряжения в арматуре достигают около 30 МПа.

Поэтому задолго до полного исчерпания несущей способности арматуры, по истечении сравнительно малого времени эксплуатации (менее 10 лет), в растянутой зоне покрытия ИВППА поверхностный слой бетона покрыт сеткой трещин.

При взлете и посадке различных типов самолетов пылевые частицы отшелушившегося слоя, попадая в двигатели, приводят к коррозионным разрушениям лопаток турбин, механическим повреждениям отдельных несущих и управляемых узлов самолетов, которые могут привести к их авариям с человеческими жертвами.

Одновременно высокотемпературные потоки от сопел двигателей, особенно при взлете, в течение малого времени создают градиенты температуры на поверхности бетона, а после взлета происходит обратный процесс, интенсивно разрушая тончайшие слои бетона. Кроме того, выхлопные газы содержат химические добавки, создающие агрессивную среду, отрицательно влияющую на бетон.

Циклическое действие температуры и многократно-повторное статическое и динамическое действие колес воздушных судов приводит к сложному напряженному состоянию верхнего (несущего) слоя полосы. Уменьшение защитного слоя, потеря сцепления бетона с арматурой снижает эффективность работы многокомпонентного покрытия аэродромов, как цельного железобетонного массива.

Конструирование верхнего слоя в виде тонких плит не позволяет значительно повышать жесткость нижних слоев, так как, как следствие, уменьшение прогибов верхних слоев может привести к появлению предельных для бетона растягивающих напряжений в верхних гранях конструкции.

Исследования показали, что ударная нагрузка при посадках самолета по сравнению со статической менее опасна, так как из-за кратковременного действия ее в конкретном расчетном месте в плите покрытия не успевают в полной мере развиться деформации из-за вязкопластических свойств, присущих как бетону, так и большинству видов естественных грунтовых оснований. Динамическое воздействие от ударов о неровности покрытия колес движущегося самолета учитывают введением в расчет коэффициента динамичности. При расчетах толщины жестких аэродромных покрытий исходят из решений строительной механики для плит, лежащих на упругих основаниях. Определение внутренних усилий в плитах сводится к тому, что находят

функцию эпюр реактивного отпора (реакцию) основания от заданной нагрузки. При этом обычно принимают, что осадка поверхности основания в точности совпадает с прогибами плиты под нагрузкой.

Постановка задачи. Основной целью исследований являлась повышение несущей способности, жесткости и долговечности железобетонных несущих слоев многослойных искусственных покрытий взлётно-посадочных полос аэродромов (ИВППА) внедрением в проектные решения новых технологических принципов армирования и укладки бетона, позволяющих в значительной степени перераспределять энергию воздействия и эффективнее использовать свойства материалов конструкций при загрузении.

Задачей исследований являлось нахождение пути управления процессом деформирования покрытия ИВППА при сложных условиях загрузки так, чтобы деформировались не отдельные участки несущего слоя, а происходило бы перераспределение усилий, указанных выше, на большую площадь покрытия, с более нагруженных участков на менее нагруженные.

Весьма перспективным способом решения данной проблемы является представление несущих слоев ИВПП в виде структуры из дискретных, замкнутых изолированных элементов (рис. 2).

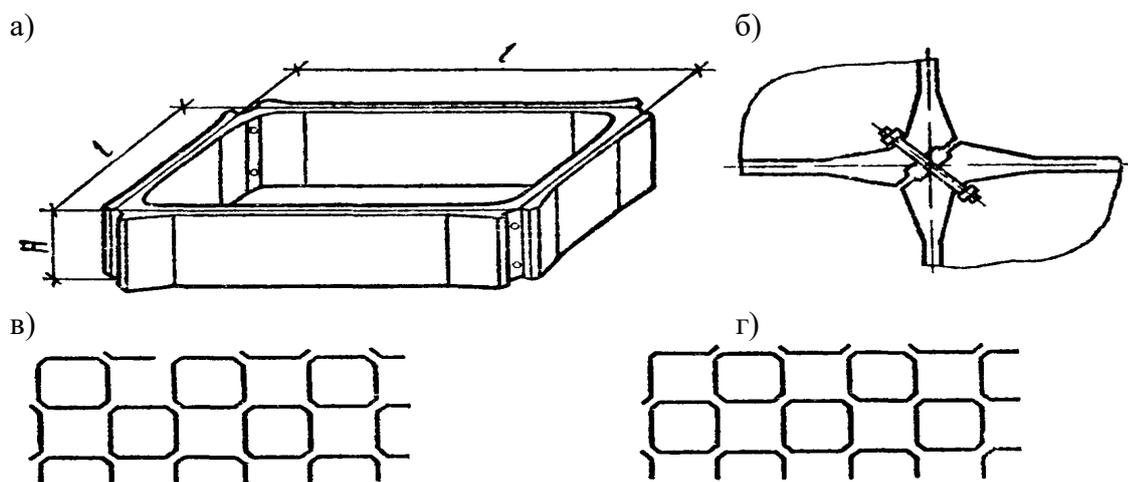


Рис. 2. Сборный стальной армирующий каркас бетонного покрытия ИВППА:
а) - сборный объемный элемент; б) - стык элементов; в), г) – раскладка элементов в четном и нечетном рядах

Fig. 2. Precast steel reinforcing frame concrete cover IVPPA:
а) - prefabricated volumetric element; б) - a junction of elements; в), г) - layout of elements in even and odd rows

При этом, за счет оптимизации размеров структуры и характеристик материалов можно создать условия, при которых материал заполнителя, находящийся в стесненных условиях (эффект обоймы), при воздействии нагрузок от самолетов будет работать не как изгибаемый элемент, а находиться в условиях всестороннего сжатия [2÷6]. Это позволит значительно повысить жесткость и прочность основного материала искусственных покрытий – бетона или железобетона, снизить прогибы не только верхних несущих слоев, но и всего покрытия в целом [2÷11].

Авторами предлагаются варианты расчета подобных конструкций, работающих под нагрузкой в условиях объемного напряженного состояния и на этой основе, создать технологические принципы конструирования несущих слоев ИВППА из бетона с сотовым сборно-металлическим заполнителем.

Методы исследования. За основу методики оценки предельной прочности и определения реальных жесткостных параметров несущих слоев ИВППА при конструктивном решении вопроса о работе бетона в условиях трехосного напряженного состояния при многократно-повторном статическом воздействии эксплуатационных самолетных нагрузок приняты иссле-

дования [6]. Она базируется на основных положениях деформационной теории железобетона, разработанных авторами [2,3] развитых применительно к объемно напряженному состоянию массивных железобетонных конструкций в работах Г.А. Гениева, К.Л. Сухова и Н.И., Римшина В.И. [4÷6], а также на положениях, принятых в работах [7÷18].

Отметим основные предпосылки и допущения, принятые при построении феноменологических зависимостей для определения прочности и жесткости бетона СЖБК:

- материал среды предполагается сплошным нелинейно деформируемым, изотропным;
- предполагается простое нагружение материала;
- предполагается, что прочность бетона в каждой точке является переменной величиной и определяется исключительно характером и величиной напряженного состояния в последней, т.е. геометрически интерпретируется, как некоторая поверхность тела вращения в системе координат главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$;
- началу координат соответствует ненапряженное состояние бетона, при котором $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$;
- напряженные состояния, характеризующиеся точками внутри этой поверхности, не вызывают разрушения материала;
- принимается положение теории малых упругопластических деформаций Безухова Н.И. и Ильюшина А.А., согласно которому, независимо от типа напряженного состояния для каждого материала имеется вполне определенная зависимость между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций, которая для случая простого нагружения может быть заменена диаграммой « $\sigma - \varepsilon$ » для случая одноосного растяжения;
- физические соотношения для жесткостных характеристик, связывающие инварианты напряженного и деформированного состояния, справедливы именно на участках всех траекторий простого нагружения от начала координат до точки пересечения траекторий предельной поверхности.

Обсуждение результатов. Предельно допустимые напряжения для объемно напряженного бетона с общетеоретических позиций [4] (в смысле интенсивности предельных напряжений) вычисляются для каждой напряженной точки согласно [5], как функции от главных напряжений по зависимости:

$$|\sigma_i|_{1,2} = kR_{bn}[(\xi + \mu)(\pm\alpha + \beta) \pm ((\xi + \mu)^2(\pm1 + \alpha + \beta)^2 - \xi\mu(\pm1 + \alpha^2 + \beta^2 - \alpha - \beta - \alpha\beta))^{0.5}]/2(\pm1 + \alpha^2 + \beta^2 - \alpha - \beta - \alpha\beta) \quad (1)$$

где $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : \alpha : \beta$ (с учетом знаков главных напряжений и, что $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$); $\xi = 1.1$ – эмпирический коэффициент; $\mu = 0.2$ – коэффициент Пуассона бетона; k – коэффициент, учитывающий сужение предельной поверхности прочности при интенсивном объемном деформировании. В практических расчетах [5÷7] предлагают определять k по следующей формуле:

$$k = 2^{-0.5}((1 - |\alpha|)^2 + (1 - |\beta|)^2 + (|\alpha| - |\beta|)^2)^{0.5} \quad (2)$$

где $|\alpha| = \sigma_2/\sigma_1$, $|\beta| = \sigma_3/\sigma_1$.

Критерий хорошо согласуется с результатами исследований О.Я. Берга, М.И. Браиловского, Г.А. Гениева, Н.И. Карпенко, В.И. Римшина, Г.Г. Соломенцева, К.Л. Сухова и пригоден для всех восьми октантов области прочности. Начальные значения главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ предполагаются заранее вычисленными из решения инвариантного кубического уравнения:

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (3)$$

где I_1, I_2, I_3 – инвариантные соотношения теории упругости.

Влияние армирования на тензор напряжений бетона учитывается путем проецирования заданных безразмерных параметров армирования μ_x, μ_y, μ_z по направлению координатных осей на направления главных напряжений. В соответствии с правилами тензорного исчисления

$$\mu_k = \mu_x l_k(l_k + 2m_k) + \mu_y m_k(m_k + 2n_k) + \mu_z n_k(n_k + 2l_k) \quad (4)$$

Значения направляющих косинусов для главных площадок l_k, m_k, n_k ($k = 1, 2$ и 3) определяются на основании известных соотношений механики деформируемого твердого тела, как параметры, зависящие от тензора напряжений

$$m_k = \frac{1}{(1 + \alpha_k^2 + \beta_k^2)^{0.5}}; \quad n_k = -\beta_k m_k; \quad l_k = \alpha_k m_k,$$

$$\text{где } \beta_k = \frac{(\sigma_x - \sigma_k)(\sigma_y - \sigma_k) - \tau_{xy}^2}{(\sigma_x - \sigma_k)\tau_{zy} - \tau_{xy}\tau_{zx}}; \quad \alpha_k = \frac{\beta_k \tau_{zx} - \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_k}; \quad k = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Здесь σ_k – одно из главных напряжений (σ_1, σ_2 или σ_3), а $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ – компоненты тензора напряжений.

Распределение напряжений между бетоном и арматурой по направлению действия главных напряжений согласно [5, 6] следует учитывать введением интегрального коэффициента ψ_{sk}

$$\sigma_{bk} = \sigma_k (1 - \psi_{sk}) \quad \text{и} \quad \sigma_{sk} = \sigma_k \psi_{sk} / \mu_k, \quad (6)$$

При этом коэффициенты ψ_{sk} определяют по единой формуле как до, так и после образования трещин

$$\psi_{sk} = 1 - \alpha (1 + n_k^* \mu_k), \quad (7)$$

где $n_k^* = E_{sk} / E_{bk}^*$ – отношение секущих модулей деформации стали и бетона.

При отсутствии трещин значение параметра α выражается:

$$\alpha = (1 + n_k^* \mu_k)^{-2} < 1, \quad (8)$$

а при наличии таковых $\alpha = R_{bt,ser}^3 / \sigma_k^3 < 1$ (9)

При реализации итерационно-циклического метода «мгновенно-упругих» решений для 1 – го цикла вычислений по формулам (3) – (7) следует корректировать напряжения в бетоне для всех 3 – х главных направлений, а затем переходить к следующему шагу, т.е. скорректировать критерий прочности по формуле (3), значения направляющих косинусов для главных площадок по (5) и коэффициенты распределения напряжений по (7)

Формула для установления дискретного значения, обобщенного (интегрального) параметра деформации материала несущего слоя, т.е. уравнение механического состояния бетона в условиях сложного напряженного состояния и многократно-повторном приложении эксплуатационной нагрузки принимаем в виде предложенным автором [5]

$$E_b^*(t, t_0, \sigma_i, |\sigma_i|, \mu_k) = \{\delta_y(t, t_0) + \frac{S_m^0(\sigma_i, |\sigma_i|, t_0)}{E_m^0(t)} +$$

$$+ 1/\sigma_i^{(m)} \sum_{n=1}^m [\sigma_i^{(n-1)} S_n^0(\xi_{n-1}) - \sigma_i^{(n)} S_n^0(\xi_n)] C^*(t_m, t_{n-1})\}^{-1} \quad (10)$$

где $\delta_y(t, t_0) = \varepsilon_{tw}(t, t_0) / \sigma_i$ – единичные деформации (температурно-влажностные) несилового происхождения (нормируемые величины); $\xi_n = \sigma_i^{(n)} / |\sigma_i|$ – уровень напряжения в n – ом нагружении; $\sigma_i^{(n)}$ – интенсивность напряжений, определяемая по известным формулам теории упругости; $|\sigma_i|$ – интенсивность предельных напряжений, определяемая по формуле (1).

Влияние силовых функций и нелинейности диаграммы «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» на жесткостной параметр учитывается выражениями: α_m^*

$$S_m^0(\sigma_i, |\sigma_i|, t_0) = \beta_0 \{1 + \eta_m^* [\sigma_i(t_0) / |\sigma_i|(t_0)]\}$$

$$S_n^0(\sigma_i, |\sigma_i|, t_0) = 1 + \eta_n^* [\sigma_i(t_0) / |\sigma_i|(t_0)] \quad (11)$$

где S_n^0 и S_m^0 – соответственно мгновенные и запаздывающие деформации; $\eta_m^*, \eta_n^*, \alpha_m^*, \alpha_n^*$ – феноменологические коэффициенты, зависящие от класса бетона; t_0 – фиксированный момент времени наблюдения; $\beta_0 = |\sigma_i| / R_{bn}(\tau) \geq 1$ (если $|\sigma_i| < R_{bn}(\tau)$, то $\beta_0 = 1$).

Звездочки у параметров нелинейности в выражениях (11), а также в остальных зависимостях означают, что соответствующие величины берутся не для натуральных, а для условных классов бетона, соответствующих вычисленному критерию прочности.

Выражения для мгновенного модуля деформации $E_M^0(t)$ и деформации ползучести $C^*(t, t_0)$, входящих в (10), определяются применительно к объемному напряженному состоянию, как и для одноосного, но с корректировкой входящих в них реологических коэффициентов γ, γ_1 и α . На основании исследований [2, 5] соотношение протекания частных деформаций при одноосном и трехосном напряженных состояниях материала описываются зависимостями: $\gamma^* = \nu\gamma; \gamma_1^* = \nu\gamma_1; \alpha^* = \nu\alpha$, где γ^*, γ_1^* и α^* - параметры нелинейности трехосного напряженного состояния, входящие в выражения:

$$\begin{aligned} E_M^0(t) &= E_M^0(\infty) (1 - \beta \cdot \exp(-\alpha^* t)); \\ C^*(t, t_0) &= 1/E_b^*(t_0) - 1/E_b^*(t) + C^*(\infty, t_0) \cdot \Omega(t_0) \cdot f(t, t_0); \\ C^*(\infty, t_0) &= C^N(\infty, t_0) \cdot \xi_{2c} \cdot \xi_{3c}; \\ \Omega(t_0) &= c + d \cdot \exp(-\gamma^* t_0); \\ f(t, t_0) &= 1 - k \cdot \exp(-\gamma_1^* (t - t_0)). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь ν – коэффициент, определяемый по формуле (2), основанной на полной математической аналогии выражений для интенсивности напряжений, величины и скорости деформаций.

Величины, входящие в зависимости (12) принимаются в зависимости от класса бетона, модуля открытой поверхности и влажности среды. Эти коэффициенты характеризуют скорости протекания частных деформаций и входят в качестве сомножителей в показатели степеней экспоненциальных функций, влияющих на значения величин $E_M^0(t)$ и $C^*(t, t_0)$.

Ввиду высокой ответственности конструкции ИВПП, предполагается использование листовой и арматурной стали с малыми деформациями ползучести. Тогда для функций нелинейности деформаций арматурной стали на основании [2] можно воспользоваться выражением:

$$E_{sk} = E_s^0 (1 + \nu_{ks} \eta_s^{\alpha_{ks}})^{-1}, \quad (13)$$

где $\eta_s = \sigma_s/R_{sk}$ не должна превышать 0,83 для преднапрягаемой арматуры класса А – VI; R_{sk} – расчетный предел сопротивления листовой или арматурной стали. Параметры нелинейности ν_{ks} и α_{ks} зависят от класса стали.

Для определения интегрального параметра деформации с учетом армирования можно использовать зависимость [5]

$$E_{bs}^* = E_b^*(\tau) (1 + \mu_i n_i) \text{ и } \mu_i n_i = 3^{-0.5} [\sum_{k=1}^3 (\mu_k n_k)^2]^{0.5}, \quad (14)$$

где $n_k = E_{sk}/E_b^*(\tau)$; E_{sk} – модуль деформации арматурной стали по направлению главных напряжений ($k = 1, 2, 3$); $E_b^*(\tau)$ – устанавливаемый по (10) интегральный модуль деформации бетона.

Вывод. Рассмотренные выше соотношения дают возможность определять с достаточной достоверностью дискретные значения обобщенного параметра деформации E_{bs}^* для сталежелезобетона при объемном напряженном состоянии, в произвольной напряженной точке ИВПП при действии эксплуатационных многократно-повторных статических нагрузок с учетом влияния изменения прочности, армирования, температурно-влажностных и реологических факторов.

Проведенные промежуточные численные эксперименты с использованием предложенной методики определения E_{bs}^* показывают, что внедрение в проектные решения несущих слоев ИВППА новых технологических принципов армирования и укладки бетона, позволяет в значительной степени повысить их несущую способность и жесткость за счет перераспределения энергии воздействия и эффективного использования свойств материалов конструкций при нагружении.

Необходимыми исходными данными для промежуточных вычислений являются значения компонент тензора напряжений. Эти компоненты, в свою очередь, зависят от обобщенного параметра деформации и частных производных последнего. Соответственно обе группы данных последовательно уточняются, в процессе реализации итерационно-циклического метода расчета.

Отдельной и актуальной проблемой является выбор оптимальных размеров и структуры (геометрии) армирующего стального каркаса, что безусловно, влияет на повышение параметров напряженно-деформированного состояния покрытия ИВППА.

Представляет интерес и подбор состава исходного материала для заполнителя ячеек, в решении которого огромное значение имеют как численные, так и опытные эксперименты.

Библиографический список:

1. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог /Г.И. Глушков, В.Ф. Бабков, В.Е. Тригоны и др. М.: Транспорт, 1987. — 255 с.
2. Бондаренко В.М., Шагин А.Л. Расчет эффективных многокомпонентных конструкций. - М.: Стройиздат, 1987. – 175 с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. 413 с.
4. Гениев Г.А., Кисюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
5. Сувор К.Л. Теория деформирования железобетона при сложных напряженных состояниях. Докт. дисс. – М.: 1984. – 288 с.
6. Сувор К.Л., Акаев А.И., Римшин В.И. К вопросу о расчете прочности и жесткости сталебетонных станин с учетом физической нелинейности // Бетон и железобетон. – 1996. № 1. с. 24 - 28.
7. Акаев А.И., Булгаков А.И. К вопросу о расчете прочности по нормальным сечениям аварийных изгибаемых элементов, усиленных обоями // Новое в расчетах и проектировании строительных конструкций: Материалы региональной научно-практической конференции, 29-30 октября 2009 г. / Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2010. с. 50-60.
8. Амрахов З.Г, Батдалов М.М., Акаев А.И., Алиев М.Н. Исследование трехслойных плит, соединенных различными связями, на вибрационные воздействия // Новое в расчетах и проектировании строительных конструкций: Материалы региональной научно-практической конференции, 29-30 октября 2009 г. / Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2010. с. 137-140.
9. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М. Методы теории катастроф в механике конструкций // Теория сооружений: достижения и проблемы: сб. статей по материалам II всероссийской научно-практической конференции, 27-28 ноября 2015 г. Махачкала / Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2015. с. 5-14.
10. Акаев А. И., Пайзулаев М. М. Использование функции напряжений плоской задачи теории упругости для оценки напряженного состояния многокомпонентных балок // Теория сооружений: достижения и проблемы: сб. статей по материалам II всероссийской научно-практической конференции, 27-28 ноября 2015 г. Махачкала / Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2015. с. 134-138.
11. Акаев А.И., Пайзулаев М.М. Расчет прочности по первой группе предельных состояний изгибаемых элементов, усиленных стальными обоями // Журнал «Научное обозрение». – Москва, 2015. №9. с. 112-115.
12. Красникова Н.М., Морозов И.М., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Оптимизация состава цементнобетона для аэродромных покрытий // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2. С. 166-172.
13. Якупов М.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетнопосадочных полос аэродромов // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 257-261.
14. Овчинников И.Г., Попов А.Н., Масалькин А.Н. Напряженно-деформированное состояние сборных аэродромных покрытий, усиленных асфальтобетоном в модельном представлении // Интернет-журнал науковедение. 2016. № 1 (32). С. 28.
15. Складов А.Н. Анализ характера силовой нагрузки воздушных судов при совершении взлетнопосадочных операций и его учет при эксплуатации аэродромных покрытий // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 2 (8). С. 104-108.
16. Villarreal J., Hossain M. Condition Evaluation of General Aviation Airport Runway Pavements. Airfield and highway pavements 2015: innovative and costeffective pavements for a sustainable future. 2015. No. 2. Pp. 572-580.
17. Ziari H.A., Hayati P.A., Sobhani J.B. Air-Entrained Air Field Self-Consolidating Concrete Pavements: Strength and Durability. International Journal of Civil Engineering. 2017. No. 15(1). Pp. 21-33.
18. Sushovan D., Padade A.H., Chaudhury N.N., Mandal J.N. Design Charts for Flexible Airfield Pavement Based on Analytical Study. Transportation Research Procedia. 2016. No. 17. Pp. 155–163.

References:

1. Zhestkiye pokrytiya aerodromov i avtomobil'nykh dorog /G.I. Glushkov, V.F. Babkov, V.Ye. Trigoni i dr. M.: Transport, 1987. — 255 s. [Hard cover airfields and roads / G.I. Glushkov, V.F. Babkov, V.E. Trigoni et al. M. : Transport, 1987 . 255 p. (In Russ)]

2. Bondarenko V.M., Shagin A.L. Raschet effektivnykh mnogokomponentnykh konstruksiy. - M.: Stroyizdat, 1987. – 175 s. [Bondarenko V.M., Shagin A.L. Calculation of effective multicomponent structures. - M.: Stroyizdat, 1987. 175 p. (In Russ)]
3. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona. – M.: Stroyizdat, 1996. 413 s. [Karpenko N.I. General models of mechanics of reinforced concrete. - M.: Stroyizdat, 1996.413 p. (In Russ)]
4. Geniyev G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona. – M.: Stroyizdat, 1974. – 316 s. [Genius G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete. - M.: Stroyizdat, 1974. 316 p. (In Russ)]
5. Surov K.L. Teoriya deformirovaniya zhelezobetona pri slozhnykh napryazhennykh sostoyaniyakh. Dokt. diss. – M.: 1984. – 288 s [Surov K.L. The theory of reinforced concrete deformation under complex stress conditions. Doct. diss. - M.: 1984. 288 p. (In Russ)]
6. Surov K.L., Akayev A.I., Rimshin V.I. K voprosu o raschete prochnosti i zhestkosti stalebetonnykh stanin s uchetom fizicheskoy nelineynosti // Beton i zhelezobeton. – 1996. № 1. s. 24 - 28 [Surov K.L., Akayev A.I., Rimshin V.I. On the issue of calculating the strength and stiffness of steel concrete frames taking into account physical nonlinearity // Concrete and reinforced concrete. 1996. No. 1. p. 24 - 28. (In Russ)]
7. Akayev A.I., Bulgakov A.I. K voprosu o raschete prochnosti po normal'nym secheniyam avariynykh izgibayemykh elementov, usilennykh oboymami // Novoye v raschetakh i proyektirovanii stroitel'nykh konstruksiy: Materialy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 29-30 oktyabrya 2009 g. / Makhachkala: Izd-vo DGTU, 2010. s. 50-60. [Akayev A.I., Bulgakov A.I. On the issue of calculating the strength of normal sections of emergency bending elements reinforced with clips // New in the calculations and design of building structures: Materials of the regional scientific and practical conference, October 29-30, 2009 / Makhachkala: Publishing house of DGTU, 2010. p. 50-60. (In Russ)]
8. Amrakhov Z.G., Batdalov M.M., Akayev A.I., Aliyev M.N. Issledovaniye trekhslonnykh plit, soyedi-nennykh razlichnymi svyazyami, na vibratsionnyye vozdeystviya // Novoye v raschetakh i proyektirovanii stroitel'nykh konstruksiy: Materialy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 29-30 oktyabrya 2009 g. / Makhachkala: Izd-vo DGTU, 2010. s. 137-140. [Amrakhov Z.G., Batdalov M.M., Akayev A.I., Aliyev M.N. The study of three-layer plates connected by various bonds on vibrational effects // New in the calculations and design of building structures: Materials of the regional scientific and practical conference, October 29-30, 2009 / Makhachkala: Publishing house of DGTU, 2010. Pp. 137-140. (In Russ)]
9. Murtazaliyev G.M., Payzulayev M.M. Metody teorii katastrof v mekhanike konstruksiy // Teoriya sooruzheniy: dostizheniya i problemy: sb. statey po materialam II vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 27-28 noyabrya 2015 g. Makhachkala / Makhachkala: Izd-vo DGTU, 2015. s. 5-14. [Murtazaliyev G.M., Payzulaev M.M. Methods of the theory of disasters in the mechanics of structures // Theory of structures: achievements and problems: collection. articles on the materials of the II All-Russian scientific-practical conference, November 27-28, 2015. Makhachkala / Makhachkala: Publishing house of the DSTU, 2015. pp. 5-14. (In Russ)]
10. Akayev A. I., Payzulayev M. M. Ispol'zovaniye funktsii napryazheniy ploskoy zadachi teorii upru-gosti dlya otsenki napryazhennogo sostoyaniya mnogokomponentnykh balok // Teoriya sooruzheniy: dostizheniya i problemy: sb. statey po materialam II vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 27-28 noyabrya 2015 g. Makhachkala / Makhachkala: Izd-vo DGTU, 2015. s. 134-138. [Akayev A. I., Payzulaev M. M. Using the stress function of the plane problem of the theory of elasticity to assess the stress state of multicomponent beams // Theory of constructions: achievements and problems: collection of works. articles on the materials of the II All-Russian scientific-practical conference, November 27-28, 2015. Makhachkala / Makhachkala: Publishing house of the DSTU, 2015. p. 134-138. (In Russ)]
11. Akayev A.I., Payzulayev M.M. Raschet prochnosti po pervoy gruppe predel'nykh sostoyaniy izgiba-yemykh elementov, usilennykh stal'nymi oboymami // Zhurnal «Nauchnoye obozreniye». – Moskva, 2015. №9. s. 112-115. [Akayev A.I., Payzulaev M.M. Strength calculation for the first group of limiting states of bending elements reinforced with steel clips // Journal "Scientific Review". - Moscow, 2015. No. 9. Pp. 112-115. (In Russ)]
12. Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Optimizatsiya sostava tsementnogo-betona dlya aerodromnykh pokrytiy // Izvestiya kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno stroitel'nogo universiteta. 2014. № 2. S. 166-172 [Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Optimization of the composition of cement-concrete for airfield coatings // News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. No. 2. pp. 166-172. (In Russ)]
13. Yakupov M.I., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Modifitsirovanny melkozernistyy beton dlya vozvedeniya monolitnykh pokrytiy vzletnopoladochnykh polos aerodromov // Izvestiya kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno stroitel'nogo universiteta. 2013. № 4 (26). S. 257-261. [Yakupov M.I., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Modified fine-grained concrete for the construction of monolithic coatings of runways of airfields // News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2013. No. 4 (26). pp. 257-261. (In Russ)]
14. Ovchinnikov I.G., Popov A.N., Masalykin A.N. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye sbor-nykh aerodromnykh pokrytiy, usilennykh asfal'tobetonom v model'nom predstavlenii // Internet-zhurnal naukovedeniye. 2016. № 1 (32). S. 28. [Ovchinnikov I.G., Popov A.N., Masalykin A.N. The stress-strain state of prefabricated airfield coatings

reinforced with asphalt in a model representation // Internet Journal of Science of Science. 2016. No. 1 (32). pp. 28. (In Russ)]

15. Sklyarov A.N. Analiz kharaktera silovoy nagruzki vozdushnykh sudov pri sovershenii vzletnopo-sadochnykh operatsiy i yego uchet pri ekspluatatsii aerodromnykh pokrytiy // *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*. 2015. № 2 (8). S. 104-108. [Sklyarov A.N. Analysis of the nature of the power load of aircraft during takeoff and landing operations and its accounting for the operation of airfield coatings // *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2015. No. 2 (8). pp. 104-108. (In Russ)]

16. Villarreal J., Hossain M. Condition Evaluation of General Aviation Airport Runway Pavements. Airfield and highway pavements 2015: innovative and costeffective pavements for a sustainable future. 2015. No. 2. pp. 572-580.

17. Ziari H.A., Hayati P.A., Sobhani J.B. Air-Entrained Air Field Self-Consolidating Concrete Pavements: Strength and Durability. *International Journal of Civil Engineering*. 2017.No. 15 (1). pp. 21-33.

18. Sushovan D., Padade A.H., Chaudhury N.N., Mandal J.N. Design Charts for Flexible Airfield Pavement Based on Analytical Study. *Transportation Research Procedia*. 2016.No. 17. pp. 155-163.

Сведения об авторах:

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: smdstu@mail.ru

Батдалов Мухтаритдин Магомедович, доктор технических наук, профессор, член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Акаев Абдулжафар Имамусейнович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сейсмостойкое строительство», e-mail: aabdulzhafar@mail.ru.

Булгаков Александр Исакович, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; e-mail: smdstu@mail.ru

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: ventav@mail.ru

Information about the authors.

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; e-mail: smdstu@mail.ru

Mukhtaruddin M. Batdalov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Corresponding member Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; e-mail: dekanat_asf@mail.ru

Aleksandr I. Bulgakov, Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures; e-mail: smdstu@mail.ru

Abdulzhafar I. Akayev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department “Earthquake-Resistant Construction” e-mail: aabdulzhafar@mail.ru

Magomed M. Payzulaev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Resistance of Materials, Theoretical and Building Mechanics; e-mail: ventav@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.10.2019.

Принята в печать 30.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.10.2019.

Accepted for publication 30.11.2019.

Для цитирования: Несветаев Г.В., Долгова А.В., Постой Л.В., Хаджишалапов Г.Н. О влиянии редуцируемых порошков и низко модульных включений на морозостойкость контактной зоны мелкозернистых бетонов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4):186-196. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-186-196

For citation: G.V. Nesvetaev, A.V. Dolgova, L.V. Postoy, G.N. Khadzhashalapov. Influence of redispersible powders and low-modular inclusions on the frost resistance of the fine-grained concrete contact zone. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4):186-196. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-186-196

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-186-196

О ВЛИЯНИИ РЕДИСПЕРГИРУЕМЫХ ПОРОШКОВ И НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

Несветаев Г.В.¹, Долгова А.В.², Постой Л.В.³, Хаджишалапов Г.Н.⁴

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону,
¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону,
²344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Россия,

³Волгодонский инженерно-технический институт,
филиал Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ),

³347360 г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94, Россия,

⁴Дагестанский государственный технический университет,

⁴367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования состояла в выявлении закономерностей изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления с основанием и зависимости коэффициента морозостойкости по критерию прочности сцепления от рецептурных факторов мелкозернистых бетонов, полученных из сухих строительных смесей на основе различных портландцементов с содержанием различных низко модульных включений и редуцируемых полимерных порошков от 0 до 3%. **Метод.** Испытания основных образцов проведены после 75 циклов замораживания-оттаивания по ГОСТ 31356. Марки по морозостойкости контактной зоны установлены от $F_{кз}25$ до $F_{кз}100$. За марку принимается количество циклов замораживания-оттаивания, после которого прочность сцепления с основанием, определяемая по ГОСТ 31356, составляет не менее 80% от прочности контрольных образцов. За прочность сцепления принимается среднее арифметическое не менее 5 значений, при этом коэффициент вариации измеренных в серии значений прочности сцепления не учитывается. **Результат.** Средние значения коэффициента вариации прочности сцепления составили: после 75 циклов замораживания-оттаивания - 0,224, диапазон от 0,058 до 0,616, после 25 циклов замораживания-оттаивания - среднее 0,129, диапазон от 0,016 до 0,352. Коэффициент вариации прочности сцепления может быть примерно в 2,5 – 3 раза выше значения коэффициента вариации прочности на сжатие. При введении в состав МЗБ РПП не наблюдается однозначной закономерности изменения значений коэффициента вариации прочности сцепления с основанием, возможно как повышение, так и понижение указанной величины, а значения коэффициента вариации прочности сцепления могут изменяться на порядок. **Вывод.** Для всех бетонов прослеживается тенденция повышения коэффициента морозостойкости прочности сцепления с уменьшением коэффициента вариации прочности сцепления как после твердения в НУ, так и в процессе циклического замораживания-оттаивания, а при выполнении условия $V_F/V_{28A} < 1$ коэффициент морозостойкости прочности сцепления, определенный с учетом коэффициента вариации, будет удовлетворять требованиям ГОСТ 31356.

Ключевые слова: морозостойкость контактной зоны, прочность сцепления, коэффициент вариации, коэффициент морозостойкости, мелкозернистый бетон, сухие строительные смеси

BUILDING AND ARCHITECTURE

INFLUENCE OF REDISPERSIBLE POWDERS AND LOW-MODULAR INCLUSIONS ON THE FROST RESISTANCE OF THE FINE-GRAINED CONCRETE CONTACT ZONE

G.V. Nesvetaev¹, A.V. Dolgova², L.V. Postoy³, Hadzhishalapov G.N.⁴

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin pl., Rostov-on-Don 344000, Russia,

²Rostov State University of Communications,

²2 Rostov Rifle Regiment of the People's Militia Sq., Rostov-on-Don 344038, Russia,

Volgodonsk Institute of Engineering,

³73/94 Lenin St., Volgodonsk 347360, Russia,

³Branch of the National Research Nuclear University (MEPhI),

⁴Daghestan State Technical University,

⁴70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objectives. The aim of this study was to identify variation patterns of the in-series variation coefficient of adhesive strength to base and the dependency of the frost resistance coefficient on the criterion of adhesion on prescription factors of fine-grained concrete obtained from dry building mixtures based on various Portland cements containing various low-modulus inclusions and redispersible polymer powders from 0 to 3%. According to GOST 31357, the main quality indicators of the hardened mixture or fine-grained concrete, in addition to frost resistance, include the indicator of "frost resistance of the contact zone", which characterises the ability of the hardened concrete to maintain adhesion to the base during normal separation following a certain number of freeze-thaw cycles. **Method.** The tests of the main samples were carried out after 75 freeze-thaw cycles in accordance with GOST 31356. The marks of the frost resistance of the contact zone are set from F_{KZ25} to F_{KZ100} . The number of freeze-thaw cycles is taken as a mark, after which the adhesion strength to the base, determined according to GOST 31356, is at least 80% of the strength of the control samples. The arithmetical average is taken at between at least 5 values, while the variation coefficient measured across a series of adhesion strength values is not considered. **Results.** The average values of the variation coefficient of adhesion strength were: following 75 cycles of freezing-thawing – 0.224 (in a range from 0.058 to 0.616); following 25 cycles of freezing-thawing – an average of 0.129 (in a range from 0.016 to 0.352). The variation coefficient of adhesion strength can exceed the variation coefficient of compression strength by approximately 2.5 to 3 times. When introducing the redispersible powders into the structure of fine-grained concrete, there is no unambiguous pattern of change in the values of the variation coefficient of adhesion to base and it is possible to increase or decrease this value, while the values of the variation coefficient of adhesion can vary by an order of magnitude. **Conclusion.** For all concretes, there is a tendency of increase of the coefficient of frost resistance with a decrease in the adhesion variation coefficient both after hardening under normal conditions as well as during cyclic freezing and thawing. When conditions $V_F/V_{28A} < 1$ are met, the coefficient of frost resistance of adhesion, determined when considering the variation coefficient, will satisfy the requirements of GOST 31356.

Keywords: frost resistance of contact zone, adhesion strength, variation coefficient, coefficient of frost resistance, fine-grained concrete, dry building mixes

Введение. Вопросы морозостойкости бетонов, в т.ч. мелкозернистых (МЗБ) по критерию прочности на сжатие изучены весьма обстоятельно [1-3]. Результаты испытаний на морозостойкость контактной зоны, когда в качестве критерия выступает изменение прочности сцепления с основанием после циклического замораживания-оттаивания немногочисленны [4-6], идет накопление данных и анализ работы покрытий с различными основаниями [7,8], в связи, с чем исследования в этой области представляют теоретический и практический интерес.

Постановка задачи. В настоящем исследовании определение закономерностей изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления с основанием и зависимости коэффициента морозостойкости по критерию прочности сцепления от рецептурных факторов мелкозернистых бетонов, полученных из сухих строительных смесей на основе различных портландцементов с содержанием различных низкомодульных включений и ретиспергируемых полимерных порошков от 0 до 3% является основной задачей.

Методы исследования. Испытания на морозостойкость контактной зоны по ГОСТ 31356 проведены на мелкозернистых бетонах (МЗБ) различных составов [9], в т.ч. с низкомодульными включениями (НМВ) на базе 75 циклов. Дополнительно после 25 циклов определена прочность сцепления составов без НМВ. Образцы изготовлены с применением 3 отличающихся химико-минералогическим составом портландцементов (ПЦ), один из которых - сульфатостойкий. С каждым ПЦ изготовлено по 3 группы образцов: без НМВ (ПЦ), с НМВ в виде зольной микросферы (ПЦ+МС) и в виде вовлеченного воздуха (ПЦ+ВВ). В каждой группе изготовлено по 4 серии с содержанием различных ретиспергируемых полимерных порошков (РПП) 0,1,2,3%. Число образцов в серии – 5 для каждого испытания.

В табл. 1 представлены средние значения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления МЗБ с основанием.

Таблица 1. Средние значения коэффициентов вариации прочности сцепления и коэффициентов морозостойкости

Table 1. The average values of the coefficients of variation of the adhesion strength and the coefficients of frost resistance

Состав морозостойких бетонов Composition of frost-resistant concrete	Показатели Indicators	
	коэффициент вариации прочности сцепления Coefficient of variation grip strength	коэффициент морозостойкости по сцеплению ³ Coefficient of frost resistance on clutch ³
ПЦ	0,201 / 0,269 ¹	1,143 / 1,595 ²
ПЦ+МС	0,196 / 0,279	1,207 / 3,861
ПЦ+ВВ	0,286 / 0,215	1,58 / 6,289
[10]	0,329 / -	-
ПЦ	- / 0,129 ⁴	-

Примечание: 1 – в числителе после 28 сут твердения в нормальных условиях (НУ), в знаменателе после 75 циклов замораживания-оттаивания, 4 – после 25 циклов замораживания-оттаивания; 2 – в числителе – без учета внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления, в знаменателе – с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления; 3 – AF/A0

Notes: 1 - In the numerator after 28 days of hardening under normal conditions (NU), in the denominator after 75 cycles of freezing-thawing, 4 - after 25 cycles of freezing-thawing; 2 - in the numerator - without taking into account the in-series coefficient of variation of adhesion strength, in the denominator - taking into account the in-series coefficient of variation in adhesion strength; 3 - AF / A0

Из представленных в табл.1 данных очевидно:

- средние значения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления с основанием после 75 циклов замораживания-оттаивания уменьшились у бетонов с ВВ, у остальных увеличились;
- средние значения коэффициента морозостойкости по критерию прочности сцепления без учета внутрисерийного коэффициента вариации превышают предельное по ГОСТ значение 0,8;
- средние значения коэффициента морозостойкости с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления значительно превышают предельное по ГОСТ значение 0,8 и превышают средние значения коэффициента морозостойкости по критерию прочности сцепления без учета внутрисерийного коэффициента вариации;
- средние значения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления с основанием значительно превосходят средние значения коэффициента вариации предела прочности на сжатие, которые составили от 0,055 до 0,095.

На рис. 1 показано влияние вида цемента и НМВ, а также дозировки РПП на внутрисерийный коэффициент вариации прочности сцепления с основанием исследованных МЗБ после 28 сут твердения в нормальных условиях (НУ) и после 75 циклов замораживания-оттаивания по ГОСТ 31356.

Из представленных на рис. 1 данных очевидно:

- коэффициент вариации прочности сцепления с основанием исследованных МЗБ зависит от вида ПЦ, вида и наличия НМВ;
- при введении РПП в состав МЗБ не наблюдается однозначной закономерности изменения значений коэффициента вариации прочности сцепления с основанием, возможно как повышение, так и понижение указанной величины;
- значения коэффициента вариации прочности сцепления изменяются в широком диапазоне от 0,058 до 0,775, т.е. на порядок.

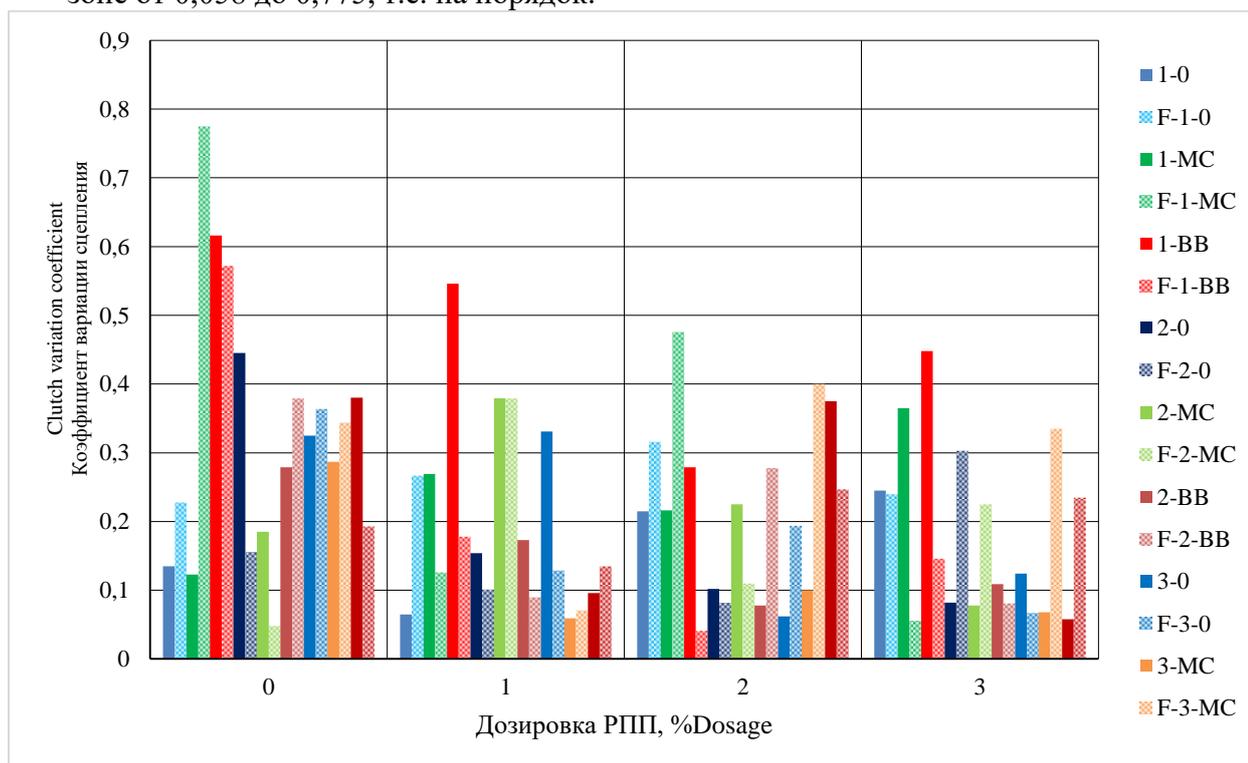


Рис. 1. Влияние вида цемента, дозировки РПП и вида НМВ на внутрисерийный коэффициент вариации прочности сцепления с основанием исследованных морозостойких бетонов после 28 суток твердения в НУ и после 75 циклов замораживания-оттаивания (F) 1,2,3 – вид цемента; 0, MC, BB – вид НМВ (0 – НМВ отсутствует)

Fig. 1. Influence of the type of cement, the dosage of RPP and the type of HMB on the in-series coefficient of variation in adhesion to base investigated frost-resistant concrete after 28 days of hardening in NU and after 75 freeze-thaw cycles (F) 1,2,3 - type of cement; 0, MS, EXPLOSIVES - view of the NMV (0 - no NMV)

В соответствии с ГОСТ 31356 можно представить коэффициент морозостойкости прочности сцепления с основанием в виде

$$k_{F,A} = \frac{A_F}{A_0} > 0,8, \quad (1)$$

где A_F , A_0 – соответственно прочность сцепления с бетонным основанием основных образцов после N циклов замораживания-оттаивания и контрольных образцов.

По аналогии с ГОСТ 10060, п. 5.2.4 можно ввести понятие о нижней границе доверительного интервала прочности сцепления с основанием в виде

$$A_{F,lim} = A_F \cdot (1 - \beta \cdot v_F), \quad (2)$$

$$A_{0,lim} = A_0 \cdot (1 - \beta \cdot v_0), \quad (3)$$

где $A_{F,lim}$, $A_{0,lim}$ – нижний доверительный интервал прочности сцепления с основанием с учетом внутрисерийного коэффициента вариации основных образцов после N циклов замораживания-оттаивания и контрольных образцов, β – t -критерий Стьюдента (2,776 для 5 образцов),

v_F, v_0 – внутри серийный коэффициент вариации прочности сцепления основных и контрольных образцов.

$$\text{Тогда, принимая} \quad v_F = t \cdot v_0, \quad (4)$$

получим соотношение коэффициентов морозостойкости прочности сцепления без учета (по ГОСТ 31356) $k_{F,A}$ и с учетом коэффициента вариации прочности сцепления $k_{F,v}$ в виде:

$$k_{F,v} = \frac{A_{F,lim}}{A_{0,lim}} = \frac{A_F}{A_0} \cdot \frac{1-\beta \cdot t v_0}{1-\beta \cdot v_0} = k_{F,A} \cdot k_v > 0,8. \quad (5)$$

Функция k_v существенно зависит от характера изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления после циклического замораживания-оттаивания, причем с увеличением внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления контрольных образцов степень влияния характера изменения коэффициента вариации в процессе циклического замораживания-оттаивания на функцию k_v возрастает, в связи, с чем целесообразно сопоставление результатов оценки коэффициента морозостойкости прочности сцепления, определенного без учета и с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления.

На рис.3 представлена зависимость коэффициента морозостойкости прочности сцепления $k_{F,A}$, определенного без учета внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления (по ГОСТ 31356) от изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления после циклического замораживания-оттаивания.

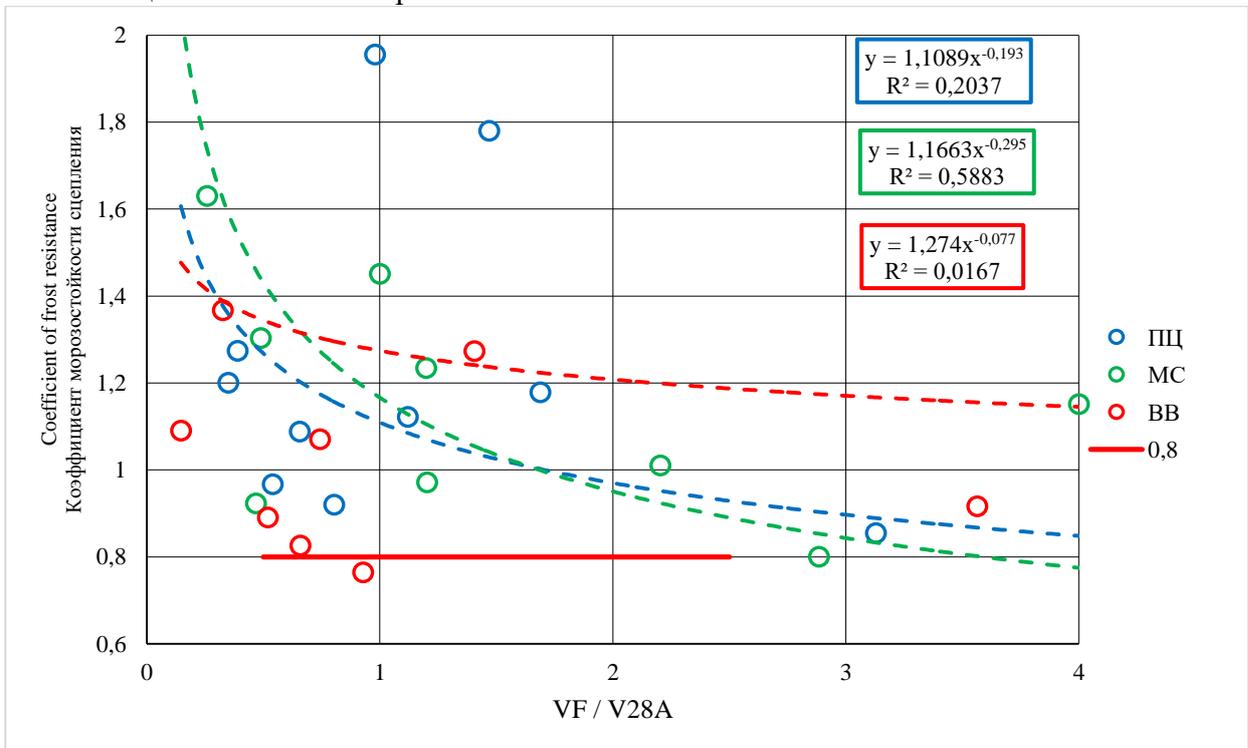


Рис. 3. Зависимость коэффициента морозостойкости сцепления по ГОСТ 31356 исследованных МЗБ от изменения внутрисерийного коэффициента вариации сцепления после циклического замораживания-оттаивания ПЦ – бетон без НМВ, МС и ВВ – бетон с НМВ в виде зольной микросферы и вовлеченного воздуха 0,8 – критерий по ГОСТ 31356

Fig. 3. The dependence of the coefficient of frost resistance of adhesion in accordance with GOST 31356 of the investigated frost-resistant concrete from changes in the in-series coefficient of variation of adhesion after cyclic freezing-thawing PC - concrete without HMW, MS and BB - concrete with HMW in the form of an ash microsphere and entrained air 0.8 - criterion according to GOST 31356

Из представленных на рис. 3 данных, очевидно, что явной зависимости коэффициента морозостойкости прочности сцепления $k_{F,A} = A_F/A_0$ от изменения коэффициента вариации прочности сцепления нет, можно говорить лишь о тенденции повышения коэффициента морозостойкости прочности сцепления с уменьшением коэффициента вариации прочности сцепления в процессе циклического замораживания-оттаивания.

Поскольку коэффициент вариации прочности сцепления зависит как минимум от методики испытаний (геометрия образцов, центрирование) и от однородности структуры МЗБ, то, принимая допущение о постоянстве влияния на коэффициент вариации методики испытаний, можно утверждать, что в процессе циклического замораживания-оттаивания до определенного количества циклов, зависящего от морозостойкости бетона, происходит повышение однородности структуры и прочности сцепления, что показано далее. Такое явление хорошо известно при оценке морозостойкости бетонов по критерию прочности на сжатие.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента морозостойкости прочности сцепления $k_{F,A}$, определенного с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления (по ф.(5) от изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления после циклического замораживания-оттаивания.

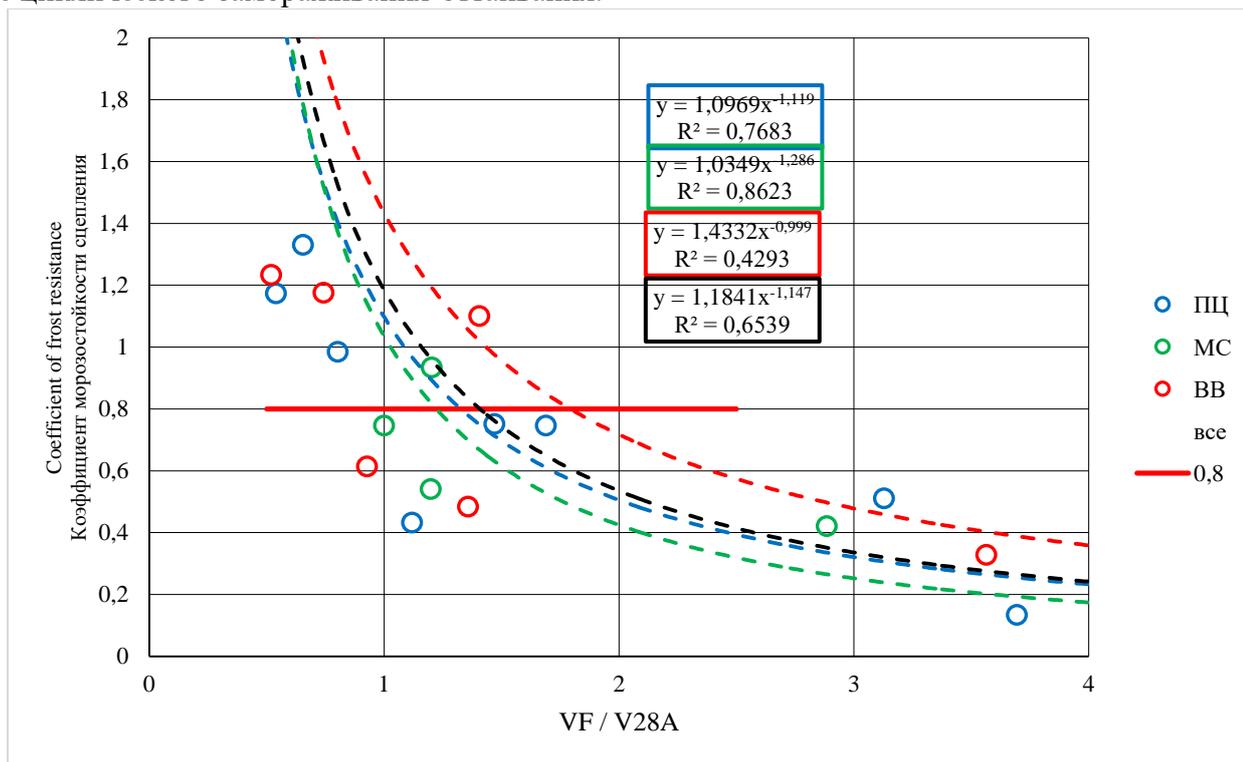


Рис. 4. Зависимость коэффициента морозостойкости прочности сцепления по ф.(5) исследованных МЗБ от изменения внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления после циклического замораживания-оттаивания ПЦ – бетон без НМВ, МС и ВВ – бетон с НМВ в виде зольной микросферы и вовлеченного воздуха 0,8 – критерий по ГОСТ 31356

Fig. 4. The dependence of the coefficient of frost resistance of adhesion strength according to f. (5) of the investigated frost-resistant concrete from changes Coefficient of variation of adhesion strength after cyclic freezing-thawing PC - concrete without HMW, MS and BB - concrete with HMW in the form of an ash microsphere and entrained air 0.8 - criterion according to GOST 31356

Из представленных на рис. 4 данных, очевидно, что зависимость между коэффициентом морозостойкости прочности сцепления по ф.(5) и изменением коэффициента вариации прочности сцепления более тесная, чем в предыдущем случае.

Для всех бетонов явно прослеживается тенденция повышения коэффициента морозостойкости прочности сцепления с уменьшением изменения коэффициента вариации прочности сцепления в процессе циклического замораживания-оттаивания, причем для бетонов с НМВ в виде МС зависимость может быть использована для практических целей, поскольку показатель $R^2 = 0,86 > 0,8$. Можно сделать предварительное заключение, что при выполнении условия $V_F/V_{28A} < 1$ коэффициент морозостойкости прочности сцепления, определенный по ф.(5), будет удовлетворять требованиям ГОСТ 31356.

На рис. 5 приведено соотношение изменения коэффициентов вариации предела прочности на сжатие (V_F / V_{28R}) и прочности сцепления (V_F / V_{28A}) после 75 циклов замораживания-оттаивания.

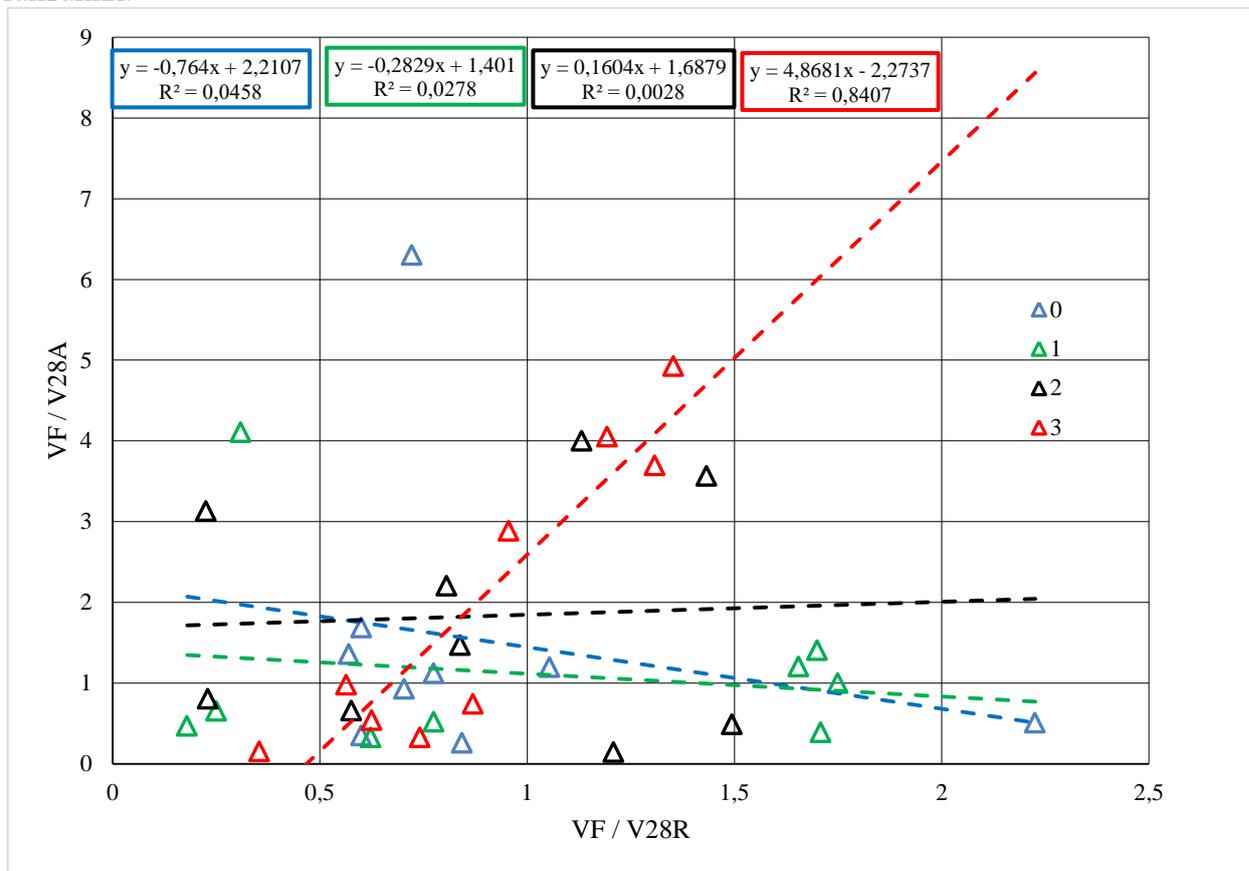


Рис. 5. Соотношение изменения при циклическом замораживании-оттаивании коэффициентов вариации прочности сцепления и предела прочности на сжатие в зависимости от содержания РПП в составе МЗБ 0 – 3 – содержание РПП, %

Fig. 5. The ratio of changes during cyclic freezing-thawing of the coefficients of variation in adhesion strength and compressive strength depending on the content of RPP in the composition of the frost-resistant concrete 0 - 3 - RPP content, %

Из представленных на рис. 5 данных можно сделать вывод о том, что связь между изменением коэффициентов вариации предела прочности на сжатие и прочности сцепления после 75 циклов замораживания-оттаивания имеет место только для составов с содержанием РПП 3%, что можно рассматривать как признак качественного изменения структуры МЗБ с относительно высоким содержанием РПП.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента морозостойкости МЗБ по критерию сцепления с бетонным основанием по ГОСТ ф.(1) от внутрисерийного коэффициента вариации прочности сцепления после 28 сут твердения в НУ.

Из представленных на рис. 6 данных следует, что общей зависимости между коэффициентом вариации прочности сцепления после 28 сут твердения в НУ и коэффициентом морозостойкости прочности сцепления по ф.(1) нет.

Прослеживается тенденция снижения коэффициента морозостойкости с ростом коэффициента вариации прочности сцепления, что вполне закономерно, поскольку повышение неоднородности структуры для морозостойких бетонов не характерно.

К сожалению, выделить в значении коэффициента вариации долю, обусловленную неоднородностью структуры и методикой испытаний проблематично.

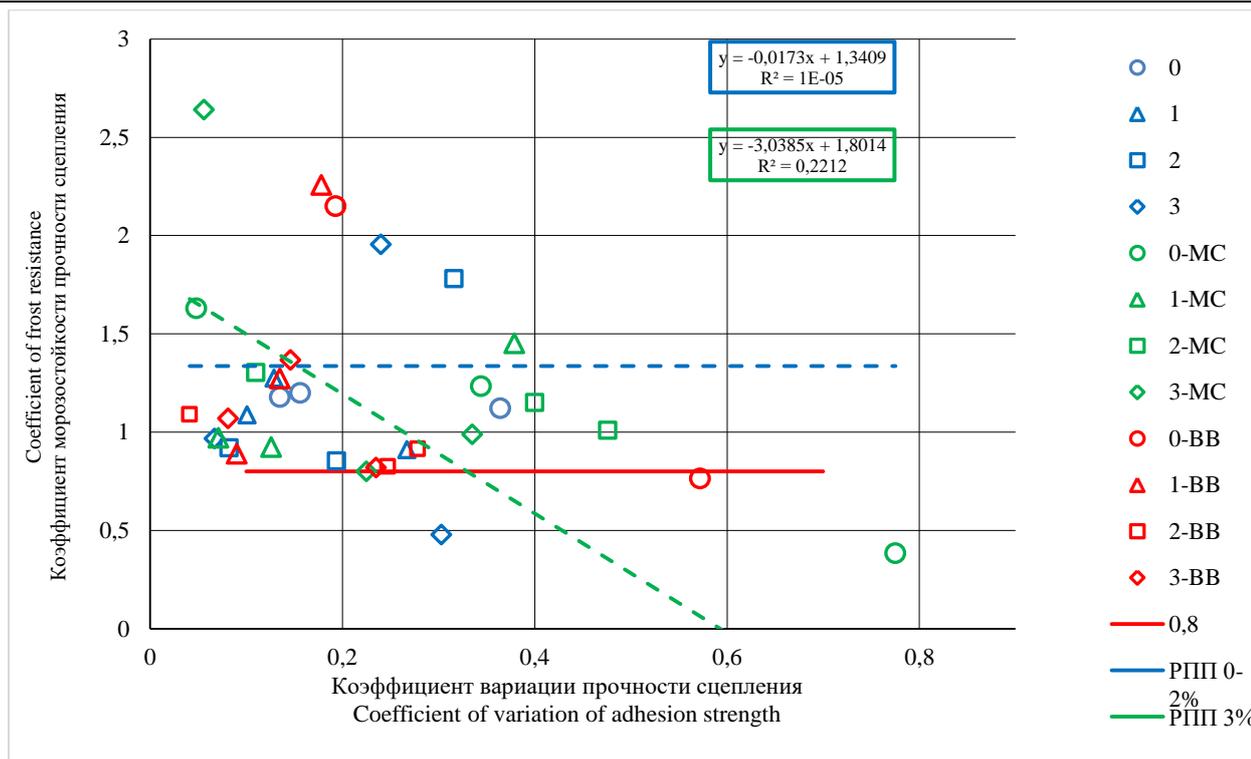


Рис. 6. Зависимость коэффициента морозостойкости МЗБ по критерию прочности сцепления с бетонным основанием от внутрисерийного коэффициента вариации сцепления после 28 сут твердения в НУ 0,1,2,3 – дозировка РПП, %, в составе frost-resistant concrete; 0, МС, ВВ – вид НМВ (0 – НМВ отсутствует); 0,8 – предельное значение по ГОСТ 31356

Fig. 6. Dependence of the coefficient of frost resistance of the frost-resistant concrete according to the criterion of adhesion to a concrete base on the in-series coefficient of variation of adhesion after 28 days of hardening in NU 0,1,2,3 - dosage of RPP,%, in the composition of the frost-resistant concrete; 0, MS, EXPLOSIVES - view of the NMW (0 - no NMV); 0.8 - limit value according to GOST 31356

В табл. 2 представлена информация о влиянии на коэффициент вариации различных факторов.

Таблица 2. Данные о коэффициенте вариации прочности сцепления и прочности на сжатие
 Table 2. Coefficient of variation data adhesion and compressive strength

Бетон Concrete	Показатели Indicators		
	Число серий Number of episodes	Среднее значение Mean	Диапазон изменения Change range
ПЦ	12	0,19 / 0,204 ¹	0,062-0,445 / 0,067-0,364 ¹
ПЦ+МС	12	0,196 / 0,279 ¹	0,059-0,379 / 0,048-0,775 ¹
ПЦ+ВВ	12	0,286 / 0,215 ¹	0,058-0,616 / 0,041-0,572 ¹
Все МЗБ	36	$\frac{0,224}{0,075} / \frac{0,232}{0,059}^{1,3}$	$\frac{0,058-0,616}{0,029-0,2} / \frac{0,041-0,775}{0,016-0,13}^{1,3}$
ПЦ ⁴	15	- / 0,129 ^{1,2}	- / 0,016-0,352 ^{1,2}
ПЦ ⁵	28	0,257 / -	0,049-0,498 / -
ПЦ ⁶	15	0,321 / -	0,072-0,891 / -
[12]	15	0,162 / - ¹	0,029-0,709 / - ¹

Примечания: 1 – перед чертой после 28 сут твердения в НУ, после черты – после 75 циклов замораживания-оттаивания; 2 – после 25 циклов замораживания-оттаивания; 3 – для предела прочности на сжатие; 4-6 – экспериментальные данные авторов, не рассматриваемые в этой работе

Notes: 1 - before the line after 28 days of hardening in NU, after the line after 75 cycles of freezing and thawing; 2 - after 25 cycles of freezing and thawing; 3 - for ultimate compressive strength; 4-6 - experimental data of the authors not considered in this work

На рис. 7 приведена информация о частоте значений коэффициентов вариации прочности на сжатие и прочности сцепления.

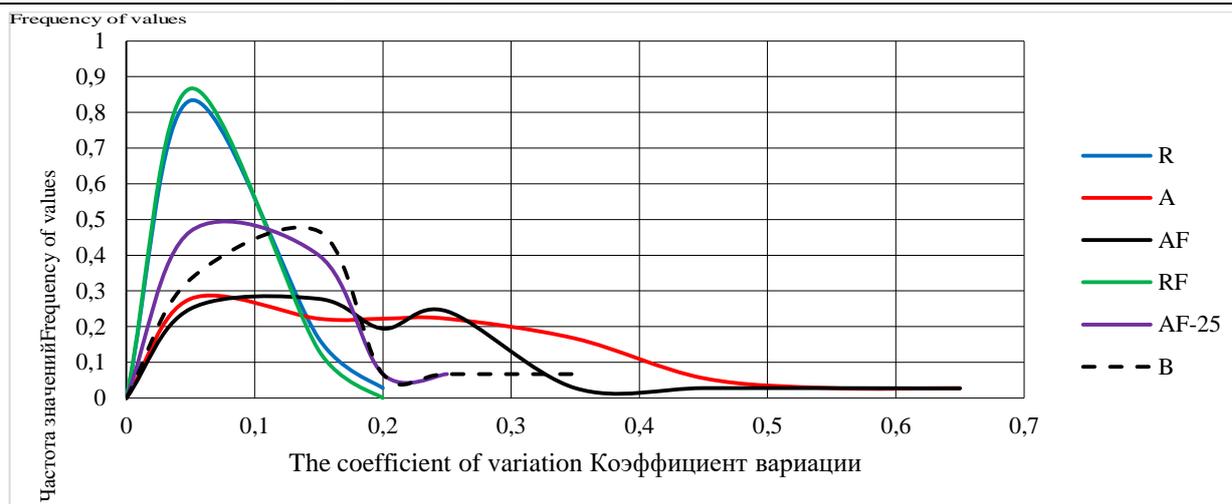


Рис. 7. Частота распределения значений коэффициентов вариации R – предела прочности на сжатие (28 сут НУ); А– прочности сцепления (28 сут НУ); RF – предела прочности на сжатие (75 циклов замораживания-оттаивания); AF– прочности сцепления (75 циклов замораживания-оттаивания); AF-25– прочности сцепления (25 циклов замораживания-оттаивания); В – по экспериментальным данным [12] прочности сцепления (28 сут НУ)

Fig. 7 Frequency of distribution of values of coefficient of variation R - ultimate compressive strength (28 days NU); A– adhesion strength (28 days of NU); RF - compressive strength (75 cycles of freezing and thawing); AF– adhesion strength (75 cycles of freezing and thawing); AF-25 - adhesion strength (25 cycles of freezing and thawing); B - according to experimental data [12] adhesion strength (28 days NU)

Очевидно существенное различие коэффициентов вариации прочности на сжатие и прочности сцепления как после твердения в НУ, так и после циклического замораживания-оттаивания. Можно отметить, что коэффициент вариации прочности сцепления может быть до 3 раз выше значения коэффициента вариации прочности на сжатие.

Прослеживается уменьшение коэффициента вариации прочности сцепления после 25 циклов замораживания-оттаивания с последующим ростом после 75 циклов.

Известно, что коэффициент вариации прочности на растяжение или сжатие при изгибе в ряде случаев может быть несколько выше, чем на сжатие, хотя в рамках настоящего исследования авторами выявлен обратный факт. Коэффициент вариации морозостойкости может до 3 раз превышать коэффициент вариации прочности на сжатие. Выявленное в ряде случаев существенное превышение значений коэффициента вариации прочности сцепления относительно прочности на сжатие, вряд ли связано только с однородностью структуры, поскольку, наряду с высокими, получены и весьма низкие значения коэффициента вариации прочности сцепления.

Вероятно, значительное влияние может оказывать методика испытания. ГОСТ 31356 указывает случаи, при которых фактическое значение сцепления будет выше измеренного, но при этом оно точно не известно. Работа шарнира в приборах, используемых при определении прочности сцепления, может зависеть от многих факторов и влиять на «центральность» отрыва и, закономерно, результаты измерений. Методика определения предела прочности сцепления нуждается в совершенствовании как с технической стороны, так и в вопросе обработки результатов. При возможных высоких значениях коэффициента вариации прочности сцепления применять расчет коэффициента вариации морозостойкости по критерию прочности сцепления по ф.(5) нецелесообразно.

Вывод. 1. Средние значения коэффициента вариации прочности сцепления составили: после 75 циклов замораживания-оттаивания - 0,224, диапазон от 0,058 до 0,616, после 25 циклов замораживания-оттаивания - среднее 0,129, диапазон от 0,016 до 0,352. Коэффициент вариации прочности сцепления может быть примерно в 2,5 – 3 раза выше значения коэффициента вариации прочности на сжатие.

2. При введении в состав МЗБ РПП не наблюдается однозначной закономерности изменения значений коэффициента вариации прочности сцепления с основанием, возможно как по-

вышение, так и понижение указанной величины, а значения коэффициента вариации прочности сцепления могут изменяться на порядок.

3. Для всех бетонов прослеживается тенденция повышения коэффициента морозостойкости прочности сцепления с уменьшением коэффициента вариации прочности сцепления как после твердения в НУ, так и в процессе циклического замораживания-оттаивания, а при выполнении условия $V_F / V_{28A} < 1$ коэффициент морозостойкости прочности сцепления, определенный с учетом коэффициента вариации, будет удовлетворять требованиям ГОСТ 31356.

Библиографический список:

1. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983, 132 с.
2. Стольников В.В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов чередующимися циклам замораживания и оттаивания. Л.: Энергия, 1970 - 68 с.
3. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
4. Манушина А.С., Урбанов А.В., Ахметжанов А.М., Зырянов М.С., Потапова Е.Н., Захаров С.А., Влияние минеральных и полимерных добавок на свойства плиточного клея // Сухие строительные смеси №2, 2016. – С. 17-20
5. Удодов С.А., Бычкова О.А. К вопросу о долговечности сцепления цементных растворов с легкобетонным основанием. INTERNATIONAL INNOVATION RESEARCH: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. 2017. С. 42-45.
6. 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.
7. Бабков В.В., Синицын Д.А., Чуйкин А.Е., Кильдибаев Р.С., Резвов О.А. Работа штукатурных покрытий современных теплоэффективных наружных стен зданий // Инженерно-строительный журнал. №8. 2012. – С. 22-29
8. Парута В.А., Саевский А.А., Семина Ю.А., Столяр Е.А., Устенко А.В., Брынзин Е.В. Теоретические предпосылки оптимизации рецептурно-технологических параметров штукатурных растворов для стен, выполненных из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 30-36.
9. Несветаев Г.В., Долгова А.В. Влияние дозировки диспергируемых порошков на свойства мелкозернистого бетона после многократного замораживания-оттаивания // Инженерный вестник Дона, №5 (2019) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5977
10. Деревянко В.Н., Полтавцев А.П., Д. Гудыменко Методы определения адгезионной прочности наружных отделочных растворов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2008. № 1-2 (120). С. 18-22.
11. Бычкова О.А. Состав и свойства модифицированного гипсоглиноземистого расширяющегося цемента и сухих строительных смесей на его основе: Автореф. дисс. ... канд.техн. наук 05.23.05. – Махачкала: ДГТУ, 2018. – 24 с.

References:

1. Kuntsevich O.V. Betony vysokoy morozostoykosti dlya sooruzheniy Kraynego Severa. L.: Stroyizdat, 1983, 132 s. [Kuntsevich OV Concrete of high frost resistance for structures of the Far North. L. : Stroyizdat, 1983, 132 p. (In Russ)]
2. Stol'nikov V.V. O teoreticheskikh osnovakh soprotivlyayemosti tsementnogo kamnya i betonov chereduyushchimi-sya tsiklam zamorazhivaniya i ottaivaniya. L.: Energiya, 1970 - 68 s. [Stolnikov VV 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)]
3. Sheykin, A.Ye. Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti / A.Ye. Sheykin, L.M. Dobshits. – L.: Stroyizdat, 1989. – 128 s. [Sheikin, A.E. Cement concrete with high frost resistance / A.E. Sheikin, L.M. Dobschitz. - L. : Stroyizdat, 1989. 128 p. (In Russ)]
4. Manushina A.S., Urbanov A.V., Akhmetzhanov A.M., Zyryanov M.S., Potapova Ye.N., Zakharov S.A., Vliyaniye mineral'nykh i polimernykh dobavok na svoystva plitochnogo kleya // Sukhiye stroitel'nyye smesi №2, 2016. – S. 17-20 [Manushina A.S., Urbanov A.V., Akhmetzhanov A.M., Zyryanov M.S., Potapova E.N., Zakharov S.A., Effect of mineral and polymer additives on the properties of tile adhesives // Dry building mixtures No. 2, 2016. pp. 17-20 (In Russ)]
5. Udodov S.A., Bychkova O.A. K voprosu o dolgovechnosti stsepleniya tsementnykh rastvorov s legkobetonnym osnovaniyem / International innovation research: sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2017. S. 42-45. [Udodov S. A., Bychkova O. A. To the question of the durability of adhesion of cement mortars with light concrete base. INTERNATIONAL INNOVATION RESEARCH: a collection of articles from the VIII International Scientific and Practical Conference. 2017. pp. 42-45. (In Russ)]
6. Loganina V.I., Zhegera K.V. Otsenka morozostoykosti plitochnogo kleya na tsementnoy osnove s primeneni-yem 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. Estimation 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)]
7. Babkov V.V., Sinitsyn D.A., Chuykin A.Ye., Kil'dibayev R.S., Rezvov O.A. Rabota shtukaturnykh pokrytiy sovremennykh teploeffektivnykh naruzhnykh sten zdaniy // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. №8. 2012. – S. 22-29 [Babkov V.V., Sinitsyn D.A., Chuikin A.E., Kildibaev R.S., Rezvov O.A. The work of plaster coatings of modern heat-efficient exterior walls of buildings // *Engineering and Construction Journal*. Number 8. 2012. pp. 22-29(In Russ)]
8. Paruta V.A., Sayevskiy A.A., Semina YU.A., Stolyar Ye.A., Ustenko A.V., Brynzin Ye.V. Teoreticheskiye pred-posylki optimizatsii retsepturno-tehnologicheskikh parametrov shtukaturnykh rastvorov dlya sten, vpol-nennykh iz gazobetonnnykh blokov // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2012. № 8 (34). S. 30-36. [Paruta V.A., Saevsky A.A., Semina Yu.A., Stolyar E.A., Ustenko A.V., Brynzin E.V. Theoretical premises for optimizing the formulation and technological parameters of stucco mortars for walls made of aerated concrete blocks // *Engineering and Construction Journal*. 2012. No. 8 (34). pp. 30-36. (In Russ)]
9. Nesvetayev G.V., Dolgova A.V. Vliyaniye dozirovki redispersiruyemykh poroshkov na svoystva melkozerni-stogo betona posle mnogokratnogo zamorazhivaniya-ottaivaniya // *Inzhenernyy vestnik Dona*, №5 (2019) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5977 [Nesvetaev 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/ru/magazine/archive/n5y2019/5977(In Russ)]
10. Derevyanko V.N., Poltavtsev A.P., D. Gudymenko Methods for determining the adhesion strength of external finishing solutions // *Visnik Pridniprovskoe sovereign academy of buddies and architecture*. 2008. No. 1-2 (120). pp. 18-22.
11. Bychkova O.A. Sostav i svoystva modifitsirovannogo gipsoglinozemistogo rasshiryayushchegosya tsementa i sukhikh stroitel'nykh smesey na yego osnove: Avtoref. diss. ... kand.tekhn. nauk 05.23.05. – Makhachkala: DGTU, 2018. – 24 s. [Bychkova O.A. Composition and properties of modified gypsum-alumina expanding cement and dry building mixtures based on it: Abstract. diss. ... Ph.D. Sciences 05.23.05. Makhachkala: DSTU, 2018 . 24 p. (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

Постой Людмила Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительных производств; e-mail: LVPostoj@mephi.ru

Хаджишалапов Гаджи Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета, кафедра «Технология и организация строительного производства»; e-mail:dekanat_asf@mail.ru

Information about the authors:

Grigory V. Nesvetaev, 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

Ludmila V. Postoy, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Construction Production; e-mail: LVPostoj@mephi.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

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.10.2019.

Принята в печать 18.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.10.2019.

Accepted for publication 18.11.2019.

Для цитирования: Шершенов Р.А., Ефимов А. Ю., Шмаков В. Ю. Повышение надежности систем теплоснабжения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):197-204. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-197-204

For citation: R.A. Shershenov, A.Yu. Efimov, V. Yu. Shmakov. Increasing the reliability of heating systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4):197-204. (In Russ.) OI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-197-204

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.113

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-197-204

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Шершенов Р.А., Ефимов А.Ю., Шмаков В.Ю.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

им. Н.П. Огарёва,

430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68, Россия

Резюме. Цель. Статья посвящена вопросу повышения надежности систем теплоснабжения. В данное время это является одной из наиболее актуальных задач в вопросах теплоснабжения. Большое значение в плане безопасности граждан и государства в целом имеет вопрос надежности теплоснабжения. Современные реалии показывают, что безопасность теплоснабжения стоит практически на одном уровне с продовольственной безопасностью. **Метод.** Исследование проведено на основе метода проектирования схем резервирования тепловых сетей. **Результат.** Для избежания разморозки системы теплоснабжения и снижения дополнительных расходов предложена схема резервирования с односторонним присоединением к закольцованным головным магистральям, дополнительно осуществив закольцовку трубопроводов систем теплоснабжения между двумя котельными. Произведен расчет убытков в случае возникновения аварийной ситуации в системе теплоснабжения. **Вывод.** В настоящее время наиболее важным является решение проблемы повышения надежности и резервирования системы теплоснабжения в целях минимального дискомфорта потребителей тепловой энергии в момент отказа источника или трубопроводов системы теплоснабжения. Предложенный авторами способ повышения надежности эксплуатации системы теплоснабжения является одним из наиболее эффективных, поскольку способствует уменьшению количества часов простоя и общего количества недополученной потребителем теплоты.

Ключевые слова: теплоснабжение, надежность, повышение, недоотпуск, резервирование

BUILDING AND ARCHITECTURE

INCREASING THE RELIABILITY OF HEATING SYSTEMS

R.A. Shershenov, A.Yu. Efimov, V.Yu. Shmakov
National Research Ogarev Mordovia State University,
68 Bolshevik St., Saransk 430005, Russia

Abstract. Objectives. The study was aimed at improving the reliability of heat supply systems. At present, this is one of the most relevant topics in the field of heat supply. The issue of reliability of heat supply is of great importance in terms of the safety of citizens and the state as a whole. Due to the severity of winter conditions and risk of hypothermia, heat supply security can be considered to be as critical as food security. Therefore, the reliability of heat supply systems becomes one of the most important aspects of the security of the state. **Method.** The study was carried out using the method of reservation of the heat supply system by looping. **Result.** In order to avoid the defrosting of the heat supply system and reduce additional costs, a redundancy scheme was proposed with one-way connection to the looped main pipelines, additionally looping the pipelines of the heat supply systems between two boiler rooms. The calculation of losses in the event of an emergency in the heating system was carried out. **Conclusion.** The most important problem requiring immediate solution is how to increase the reliability and redundancy of the heat supply system itself, in order to achieve minimal discomfort for consumers of heat energy at the time of failure of the source or transmission of the heat supply system. The proposed method for increasing the reliability of operation of heat supply systems is characterized by a high efficiency, since allows the number of idle hours and the total amount of short-received heat to be reduced.

Keywords: heat supply, reliability, increase, under-supply, reservation

Введение. В настоящее время большое значение в плане безопасности граждан и государства в целом имеет вопрос надежности теплоснабжения. Современные реалии показывают, что безопасность теплоснабжения стоит практически на одном уровне с продовольственной безопасностью. А это значит, что надежность систем теплоснабжения является одним и важнейших аспектов безопасности существования государства.

Согласно государственной программе Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. №2446 [1], энергосбережение и повышение энергетической эффективности необходимо рассматривать как один из основных источников экономического роста ВВП страны.

Согласно подпрограммам вышеупомянутой государственной программы, планируется осуществление технических мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности тепло- и электростанциях. Предлагается техническое перевооружение действующих станциях с выводом из эксплуатации неэкономичного, морально устаревшего паросилового оборудования газовых тепловых станций и замена его новыми установками с использованием газотурбинных и парогазовых технологий, модернизация и реконструкция действующих конденсационных и теплофикационных установок и станций с использованием современного энергоэффективного оборудования.

Замена неэффективного оборудования на новое - это конечно хорошо, однако затраты, связанные с этим огромны, а отказы самого оборудования источников теплоснабжения имеют малую вероятность, а систем газоснабжения вообще минимальны и практически не ведется учет в перебоях с поставками топлива. Наиболее важным с нашей точки зрения является вопрос повышения надежности и резервирования самой системы теплоснабжения, для осуществления минимального дискомфорта потребителей тепловой энергии в моменты отказа источника или трубопроводов системы теплоснабжения.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение современных способов повышения надежности систем теплоснабжения, их недостатки и предложить авторский вариант решения проблемы.

Исторически сложилось так, что в России применяются преимущественно системы центрального теплоснабжения посредством построенных систем комбинированной выработки тепловой и электрической энергии ТЭЦ.

Однако в современных реалиях эффективность таких систем снижается [2]. Теплоэлектростанции становятся все менее востребованными. Их место занимают небольшие, компактные блочно-модульные котельные и сравнительно более эффективные газопоршневые установки [3]. Применение таких котельных позволяет разбить огромную систему теплоснабжения на небольшие подсистемы, которые позволяют более гибко управлять процессами теплоснабжения потребителей. В случаях выхода из строя какого либо элемента системы теплоснабжения одной подсистемы, снабжение тепловой энергией потребителя должно осуществляться от ближайшего источника теплоснабжения.

Методы исследования. При проектировании схем резервирования рекомендуется исходить из основных принципов создания резервной системы [4-9]:

1. Обеспечение резервирования на источнике тепла, путем установки большего числа котлов.
2. Вероятности аварии на одной головной магистрали в рассматриваемый период времени.
3. Возможности кратковременного отключения от тепловых сетей большинства потребителей при ускоренном выполнении ремонтных работ с учетом теплоустойчивости зданий.

Так же система резервирования, как и обычная система сетей теплоснабжения должна обладать живучестью, т.е. способностью сохранять свою работоспособность в случае возникновения аварийных или экстремальных ситуаций, связанных с изменением температуры наружного воздуха [10-15].

Основные способы резервирования, рассмотренные в [4] представлены на рис. 1-3.

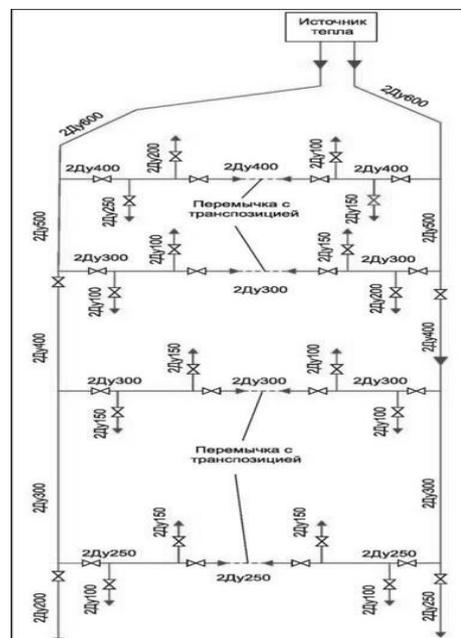


Рис.1. Схема резервирования тепловых сетей с двухсторонним присоединением к двум главным магистралям

Fig.1. Scheme of reservation of heating networks with two-way connection to two main highways

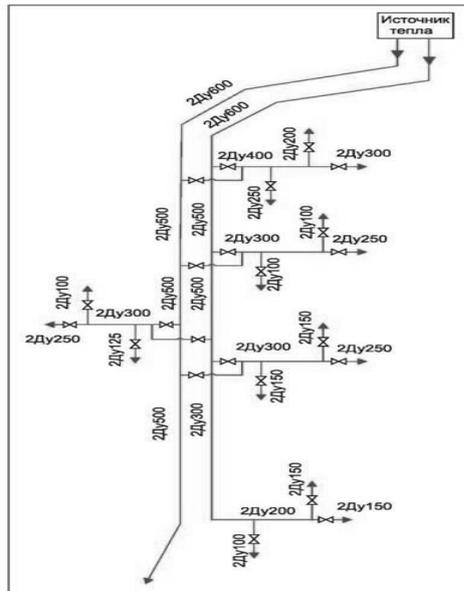


Рис. 2. Схема резервирования тепловых сетей с односторонним присоединением к двум главным магистралям

Fig.2. Scheme of reservation of heating networks with one-way connection to two main highways

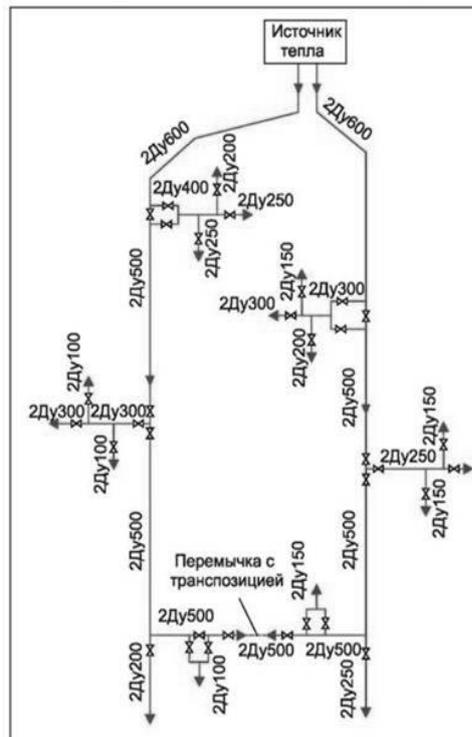


Рис.3. Схема резервирования тепловых сетей с односторонним присоединением к закольцованному главному магистральному

Fig.3. Scheme of redundancy of heating networks with one-sided connection to the looped main lines

Обсуждение результатов. Наиболее эффективной схемой является схема резервирования тепловых сетей с односторонним присоединением абонентов [5]. Однако данные схемы резервирования эффективны в тех случаях, когда происходит аварийная ситуация на трубопроводе. В ситуациях с выходом из строя оборудования самого источника теплоснабжения такая схема оказывается бесполезной.

Согласно приказу Минэнерго РФ от 12.03.2013 n 103 «Об утверждении правил оценки готовности к отопительному периоду» [5] все потребители делятся на три категории. Так как

большинство абонентов является потребителями второй и третьей категории, то подача тепловой энергии на отопление и вентиляцию жилищно-коммунальным и промышленным потребителям осуществляется в размерах, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Допустимый отпуск тепловой энергии
Table 1. Allowable supply of thermal energy

Наименование показателя Name of indicator	Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления $t^{\circ}\text{C}$ (соответствует температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92) The calculated outside temperature for heating design $t^{\circ}\text{C}$ (corresponds to the outside temperature of the coldest five-day security of 0.92)				
	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-50°C
Допустимое снижение подачи тепловой энергии, %, до Permissible reduction in the supply of thermal energy, %, to	78	84	87	89	91

Учитывая результаты анализа в [6] можно установить виды показателей и их граничные значения для трех аварийных состояний системы энергоснабжения:

1. Аварии чрезвычайной ситуации местного характера. Время восстановления ограничивается временем более шести часов, но менее 24 часов. Снижение температуры в зданиях ограничивается выше критической, но ниже комфортной (20°C). Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах $5 \cdot 10^3$.

2. Аварии чрезвычайной ситуации территориального уровня. Время восстановления подачи тепла ограничивается тремя сутками. Температура в зданиях ниже критического значения. Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$.

3. Аварии чрезвычайной ситуации регионального уровня. Характеризуются значительным временем восстановления, выше трех суток. Полностью остановлена подача теплоэнергии, температура в зданиях ниже нуля. Относительный материальный ущерб к МРОТ принимается более $5 \cdot 10^5$.

В договоре на теплоснабжение оговаривается гарантированное число часов n , в течение которых поставщик обязан поставлять потребителю горячую воду заданных параметров.

Однако в результате аварий, перебоев с подачей топлива, простоя оборудования по техническим причинам годовое число часов работы системы теплоснабжения бывает меньше. Кроме количества часов простоя, фиксируют и общее количество недополученной теплоты, Гкал, поскольку интенсивность отпуска тепла зависит от сезона. В пик нагрузки мощность источника максимальна и за один час потребителю отпускается теплоты больше, чем, скажем, весной, когда заканчивается отопительный сезон.

Произведём примерный расчет ущерба из-за недоотпуска тепловой энергии. Используя оценку систем надежности теплоснабжения относительный аварийный недоотпуск теплоты определяется по формуле:

$$(q) = \frac{\sum Q_{ав}}{\sum Q}, \quad (1)$$

где $\sum Q_{ав}$ -аварийный недоотпуск теплоты (Гкал), $\sum Q$ -расчетный отпуск тепла (Гкал).

В среднем 10-этажный дом в самый холодный месяц зимы потребляет около 12 Гкал/сут тепловой энергии, это 0,48 Гкал/ч. Учитывая возможность недоотпуска тепла в размере 87%, получаем, что относительный аварийный недоотпуск теплоты равен:

$$(q) = \frac{0,48 \cdot 0,87}{0,48} = 0,87$$

Стоимость одной Гкал тепловой энергии в Саранске составляет 1692,49 руб. Получаем часовой ущерб равен:

$$x = 0,87 \cdot 1692,49 = 1472,7 \text{ руб.}$$

При идеальном стечении обстоятельств (достаточно быстро будет обнаружено место повреждения, материалы и приспособления для восстановления системы будут имеется в арсенале аварийной бригады) время на восстановлении будет равно не меньше 6 часов. Основываясь на результатах расчетов, описанных выше, ущерб от недоотпуска тепловой энергии за одну аварийную ситуации составляет

$$x = 1472,7 \cdot 6 = 8836,2 \text{ руб.}$$

Это минимальные потери подчеркиваю только из-за недоотпуска тепловой энергии одного дома. Одна котельная осуществляет поставку теплоснабжения в среднем 60-70 потребителям. Конечная сумма ущерба составит 530 172 руб и это помимо того, что предстоит восстанавливать сам источник .

Вывод. Правительство Российской Федерации совместно с министерством энергетики разработали стратегию развития энергетической эффективности, основываясь на полном обновлении котельного оборудования.

С целью повышения надежности систем теплоснабжения необходимо применять схему с закольцовкой трубопроводов, но она не обеспечивает должной надежности теплоснабжения потребителей в случае выхода из строя источника теплоснабжения.

Для избежания разморозки системы и снижения дополнительных расходов рекомендуем применять схему резервирования с односторонним присоединением к закольцованным головным магистралям дополнительно осуществив закольцовку трубопроводов систем теплоснабжения между 2 котельными. Это доказано расчетами на одно здание. А котельная снабжает тепловой энергией не одно здание, а целые кварталы или даже микрорайоны. Поэтому предложенный способ повышения надежности системы теплоснабжения является одним из наиболее эффективных на данный момент.

Библиографический список:

1. Государственная программа Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года" (утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 2446-р)// [Электронный ресурс]. (дата обращения: 13.09.19). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_109625/1c6de4ecab11da862539d19b94ae677f09ba7caa/
2. Ефимов А.Ю., Марков В.А. Анализ и оценка проблем систем горячего водоснабжения// Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы межвузовский сборник научных трудов, 2016. С. 167-173.
3. Артемов И.Н., Артемова Е.А. Наиболее полное использование теплоты уходящих газов котлоагрегатов// Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы Международная конференция., 2014. С. 126-129.
4. А.А.Арешкин, А.В. Москаленко, Н.В. Горобец, Д.Н. Николаевский, В.А. Кролин , Общие положения по резервированию подачи тепла в системах теплоснабжения// "Новости теплоснабжения" №01 (125), 2011. С. 26-35.
5. Глухов С.В., Чуриков Д.А. Новый подход к управлению системами теплоснабжения малых населенных пунктов // ОНВ. 2017. №4 (154). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-podhod-k-upravleniyu-sistemami-teplosnabzheniya-malyh-naselennyh-punktov> (дата обращения: 12.09.2019).
6. Гришкова А.В., Красовский Б.М., Полетаев И.А. О снижении надежности теплоснабжения при недостатке средств на перекладку тепловых сетей // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Материалы IV РНТК Т.2. - Ульяновск: УлГТУ, 2003.
7. Жиркова М.В. Повышение надежности систем теплоснабжения малых населенных пунктов в условиях крайнего севера // Промышленное и гражданское строительство изд-во СГТУ, 2013. № 8 с.47-50.
8. Малая Э.М., Сергеева С.А. Энергосбережение как важный фактор развития инфраструктуры теплоснабжения //Вестник СГТУ. - Саратов: изд-во СГТУ, 2004. № 4.
9. МДС 41-6.2000 - Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах Российской Федерации.— М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 37 с.

10. Пашченко Е.И. Анализ причин снижения ресурса тепловых сетей // *Новости теплоснабжения*. - 2002. - № 12. - С. 33 - 35.
11. Приказ минэнерго РФ от 12.03.2013 n 103 "об утверждении правил оценки готовности к отопительному периоду"// [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145877/ (дата обращения: 15.09.19).
12. Прогнозирование аварийных ситуаций на объектах жизнеобеспечения ЖКХ: отчет по НИР / В. Н. Иванов, В. А. Прохоров [и др.]. СВФУ им. М. К. Аммосова, гос. контракт № 334, тема № 1.9.14. Якутск, 2006.
13. Прохоров Д. В. Повышение надежности децентрализованных энергетических систем северных территорий: дис. кандидат технических наук, Якутск, 2018, с.123
14. Стенников В.А., Постников И.В. Комплексный анализ надежности теплоснабжения потребителей// *Известия российской академии наук. энергетика*, 2011. С. 107-121.
15. Федеральный закон от 27.07.2010 N 190-ФЗ (ред. от 29.07.2018) "О теплоснабжении" [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102975/ (дата обращения: 14.09.19).

References:

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii "Energoberezheniye i povysheniye energeticheskoy effektivnosti na period do 2020 goda" (utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva RF ot 27 dekabrya 2010 g. № 2446-r)// [Elektronnyy resurs]. (data obrashcheniya: 13.09.19) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_109625/1c6de4ecab11da862539d19b94ae677f09ba7caa/. [The state program of the Russian Federation "Energy conservation and energy efficiency for the period up to 2020" (approved by the order of the Government of the Russian Federation of December 27, 2010 No. 2446-r) [Electronic resource].(accessed September 13, 2019) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_109625/1c6de4ecab11da862539d19b94ae677f09ba7caa/ (In Russ)]
2. Yefimov A.YU., Markov V.A. Analiz i otsenka problem sistem goryachego vodosnabzheniya// *Energoeffektivnyye i resursoberegayushchiye tekhnologii i sistemy mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov*, 2016. S. 167-173. [Efimov A.Yu., Markov V.A. Analysis and assessment of problems of hot water supply systems // *Energy-efficient and resource-saving technologies and systems of inter-university collection of scientific papers*, 2016. P. 167-173. (In Russ)]
3. Artemov I.N., Artemova Ye.A. Naiboleye polnoye ispol'zovaniye teploty ukhodyashchikh gazov kotloagregatov// *Energoeffektivnyye i resursoberegayushchiye tekhnologii i sistemy Mezhdunarodnaya konferentsiya.*, 2014. S. 126-129. [Artemov I.N., Artemova E.A. The most complete use of the heat of the exhaust gases of boiler units // *Energy-efficient and resource-saving technologies and systems International Conference.*, 2014. pp. 126-129. (In Russ)]
4. A.A.Areshkin, A.V. Moskalenko, N.V. Gorobets, D.N. Nikolayevskiy, B.A. Krolin , Obshchiye polozheniya po rezervirovaniyu podachi tepla v sistemakh teplosnabzheniya// "*Novosti teplosnabzheniya*" №01 (125), 2011. S. 26-35. [A.A. Areshkin, A.V. Moskalenko, N.V. Gorobets, D.N. Nikolaevsky, B.A. Krolin, General Provisions for Reserving Heat Supply in Heat Supply Systems // "*Heat Supply News*" No. 01 (125), 2011. pp. 26-35. (In Russ)]
5. Glukhov S.V., Churikov D.A. Novyy podkhod k upravleniyu sistemami teplosnabzheniya malykh naseleennykh punktov // *ONV*. 2017. №4 (154). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-podhod-k-upravleniyu-sistemami-teplosnabzheniya-malykh-naseleennykh-punktov> (data obrashcheniya: 12.09.2019). [Glukhov S.V., Churikov D.A. A new approach to managing heat supply systems in small settlements // *ONV*. 2017. No4 (154). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-podhod-k-upravleniyu-sistemami-teplosnabzheniya-malykh-naseleennykh-punktov> (accessed September 12, 2019) (In Russ)]
6. Grishkova A.V., Krasovskiy B.M., Poletayev I.A. O snizhenii nadezhnosti teplosnabzheniya pri nedostatke sredstv na perekladku teplovykh setey // *Energoberezheniye v gorodskom khozyaystve, energetike, promyshlennosti: Materialy IV RNTK T.2.* - Ulyanovsk: UIGTU, 2003. [Grishkova A.V., Krasovsky B.M., Poletaev I.A. On reducing the reliability of heat supply with a lack of funds for the transfer of heating networks // *Energy Saving in Urban Economy, Energy, Industry: Materials IV RSTC T.2.* - Ulyanovsk: UISTU, 2003. (In Russ)]
7. Zhirkova M.V. Povysheniye nadezhnosti sistem teplosnabzheniya malykh naseleennykh punktov v usloviyakh kraynego severa // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo izd-vo SGTU*, 2013. [Zhirkova M.V. Improving the reliability of heat supply systems in small settlements in the Far North // *Industrial and Civil Engineering Publishing House of SSTU*, 2013. No. 8 pp. 47-50. (In Russ)]
8. Malaya E.M., Sergeeva S.A. Energoberezheniye kak vazhnyy faktor razvitiya infrastruktury teplosnabzheniya // *Vestnik SGTU.* - Saratov: izd-vo SGTU, 2004. № 4. Malaya E.M., Sergeeva S.A. Energy saving as an important factor in the development of heat supply infrastructure // *Bulletin of SSTU.* - Saratov: Publishing House of SSTU, 2004. No. 4. (In Russ)]
9. MDS 41-6.2000 - Organizatsionno-metodicheskiye rekomendatsii po podgotovke k provedeniyu otopitel'nogo perioda i povysheniyu nadezhnosti sistem kommunal'nogo teplosnabzheniya v gorodakh i naseleennykh punktakh Rossiyskoy Federatsii.— M.: SPO ORGRES, 2000. – 37 s. [MDS 41-6.2000 - ORGANIZATIONAL AND METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS for preparing for the heating period and improving the reliability of district heating systems in cities and towns of the Russian Federation. - M.: SPO ORGRES, 2000. 37 p. (In Russ)]
10. Pashchenko Ye.I. Analiz prichin snizheniya resursa teplovykh setey // *Novosti teplosnabzheniya.* - 2002. - № 12. - S. 33 - 35. [Pashchenko E.I. Analysis of the reasons for reducing the resource of heating networks // *News of heat supply.* - 2002. No. 12. pp. 33 - 35. (In Russ)]

11. Prikaz minenergo RF ot 12.03.2013 n 103 "ob utverzhdenii pravil otsenki gotovnosti k otopitel'nomu periodu"// [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145877/ (data obrashcheniya: 15.09.19). [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of March 12, 2013 n 103 "On the approval of the rules for assessing readiness for the heating period" // [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145877/ (accessed: 09/15/19). (In Russ)]
12. Prognozirovaniye aviarynykh situatsiy na ob"yektakh zhizneobespecheniya ZHKKH: otchet po NIR / V. N. Ivanov, V. A. Prokhorov [i dr.]. SVFU im. M. K. Ammosova, gos. kontrakt № 334, tema № 1.9. [Forecasting emergencies at the life support facilities of the housing and communal services: report on research / V. N. Ivanov, V. A. Prokhorov [and others]. NEFU them. M.K. Ammosova, state contract number 334, topic number 1.9.14. Yakutsk, 2006. (In Russ)]
13. Prokhorov D. V. Povysheniye nadezhnosti detsentralizovannykh energeticheskikh sistem severnykh territoriy: dis. kandidat tekhnicheskikh nauk, Yakutsk, 2018, s.123 [Prokhorov D. V. Improving the reliability of decentralized energy systems of the northern territories: dis. Candidate of Technical Sciences, Yakutsk, 2018, pp.123 (In Russ)]
14. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Kompleksnyy analiz nadezhnosti teplosnabzheniya potrebiteley// Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. energetika, 2011. S. 107-121. [Stennikov V.A., Postnikov I.V. A comprehensive analysis of the reliability of heat supply to consumers // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy, 2011.pp. 107-121. (In Russ)]
15. Federal'nyy zakon ot 27.07.2010 N 190-FZ (red. ot 29.07.2018) "O teplosnabzhenii" [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102975/ (data obrashcheniya: 14.09.19) [Federal Law of July 27, 2010 N 190-FZ (as amended on July 29, 2018) "On Heat Supply" [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102975/ (accessed: 09/14/19). (In Russ)]

Сведения об авторах:

Шершенов Ростислав Александрович, студент-магистр, кафедра теплоэнергетических систем;

e-mail: slava_rostislav@mail.ru

Ефимов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра теплоэнергетических систем e-mail: sem314@yandex.ru

Шмаков Валерий Юрьевич, студент-магистр, кафедра теплоэнергетических систем;

e-mail: Shmakov@mail.ru

Information about the authors:

Rostislav A. Shershenov, master student, Department of Thermal Power Systems;

e-mail: slava_rostislav@mail.ru

Efimov Alexander Yuryevich, Cand. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Department of Thermal Power Systems e-mail: sem314@yandex.ru

Shmakov Valery Yurievich, master student, department of heat power systems; e-mail: Shmakov@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.11.2019.

Принята в печать 29.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.11.2019.

Accepted for publication 29.11.2019.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9-10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах

невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;
- electronic copy (e-mail is acceptable);
- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);
- Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 - 2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 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– №4 – 2019.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 46, No.4, 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 23.12.2019г. Сдано в печать 30.12.2019г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 15,00 Уч. изд.л. 15,00

Заказ № 473.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.