

**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, №1, 2019.**

# ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Volume 46, No.1, 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); 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); Socionet; CyberLeninca.

© Founder and Publisher Daghestan State Technica Iniversity, 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, №1, 2019

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

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

Давидюк А.Н., заслуженный строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия.

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

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, Россия.

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

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, Россия.

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

Лобанов И.Е., д.т.н., ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия.

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

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

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, Россия.

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

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

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

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

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

Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. МАХ, НИИ промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, Россия.

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

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

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

Редакционный совет: Председатель редакционного совета:  
Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия.

Сопредседатели:

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

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

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

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, Россия.

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

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, №1  
Махачкала, 2019 – 200с.  
Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»  
Адрес учредителя и издателя:  
367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70,  
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».  
Тел./факс 8722)623715;  
(8722)623964  
e-mail:  
[vestnik.dgtu@mail.ru](mailto:vestnik.dgtu@mail.ru)  
Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ ..8

*Бухаров А.В., Вишневский Е.В., Гиневский А.Ф.*

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СТРУЙ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ ПРИМЕНительно К УСТАНОВКАМ ПО ПОЛУЧЕНИЮ КРИОГЕННЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ .....**8

*Глушаев А.В., Замарашкина В.Н., Малышева Т.А., Соколова Е.В.*

**КРИОХИРУРГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ, ОХЛАЖДАЕМЫЙ ПОТОКОМ НЕДОГРЕТОГО ЖИДКОГО АЗОТА .....**19

*Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Миснахов И.Ш., Набиев Н.А., Насрулаев А.М.*

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА .....**32

*Исмаилов Т.А., Ибрагимова А.М.*

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ .....**42

*Лобанов И.Ю.*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С СИММЕТРИЧНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ НА ОБЕИХ СТОРОНАХ .....**53

*Хураמיшина Р.А., Ямалов А.И.*

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРАНИЛИЩ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВРЕМЯ НАСТУПЛЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ РОЛЛОВЕРА .....**66

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ .....

79

*Антонов В.О., Петренко В.И., Сычков В.Б., Тебуева Ф.Б.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ МЕХАНИЗМА ЗАДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ИЗБЫТОЧНОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ .....**79

*Бокова О.И., Дровникова И.Г., Попов А.Д., Rogozin Е.А.*

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА, СОЗДАННАЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «CPN TOOLS» .....**90

*Бужинская Н.В., Васева Е.С., Искандаров Р.Н., Шубина Н.В.*

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO .....**103

*Гришин В.М., Ву Чонг Туан*

**УЧЕТ СУЩЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ И ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ .....**113

*Емельянов М.В.*

**ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ .....123**

*Жеругов Р. А., Кангезова М. Х., Ланидус А.А.*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТА СТАНДАР-  
ТАМ «ЗЕЛЕНОГО» СТРОИТЕЛЬСТВА .....132**

*Попов А.Л.*

**УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ БЛОКИ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
БАЗАМИ ДАННЫХ ОПЕРАТИВНОЙ ДЕЖУРНОЙ СМЕНЫ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ В КРИ-  
ЗИСНЫХ СИТУАЦИЯХ .....142**

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА .....152**

*Гайшун А.С., Гайшун Е.С., Ковалеристова Е.В., Явруян Х.С.*

**СТЕНОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ  
УГОЛЬНОГО РЯДА 152**

*Жуков К. Ю., Левченко А.А., Поцепня К.Н.*

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ  
УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ШПУНТОВЫХ СВАЙ, ИЗГОТОВЛЕН-  
НЫХ ИЗ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА .....160**

*Зотов И.М., Чепурненко А.С., Языев С.Б.*

**РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА БАЛОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО  
СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ .....169**

*Карпов Д. Ф., Сеницын А. А.*

**ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕ-  
РИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ СТЕНДЕ .....177**

*Кокоев М.Н., Федоров В.Т., Хаджишалапов Г.Н.*

**ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОСТЕКЛА И КЕРАМЗИТА .....187**

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ .....195**

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. Volume46, No.1, 2019.

<p><b>Editor-in-Chief:</b> Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p><b>Deputy Editor:</b> Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p><b>Editorial Board:</b> Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Rasul M. Aliev, Doctor of Technical Science Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Ganapi J. Akhmedov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Mahir M. Bashirov, Doctor of Technical Science, Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;</p> <p>Alexey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;</p> <p>Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;</p> <p>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;</p> <p>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;</p> <p>Dmitry N. Kobzareno, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland;</p> <p>Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Arkady N. Lariyonov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia;</p> <p>Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;</p> <p>Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionschikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;</p> <p>Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;</p> <p>Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;</p> <p>Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>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;</p> <p>Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.</p>	<p>Research areas</p> <p>05.04.03 - Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning systems and life support (Technical Sciences),</p> <p>05.04.13 - Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences),</p> <p>05.13.01 - System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.06 - Automation and management of technological processes and production (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.10 - Management in social and economic systems (Technical Sciences),</p> <p>05.13.12 - Design automation systems (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p> <p>05.13.19 - Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p> <p>05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p> <p>05.23.05 - Building materials and products (Technical Sciences),</p> <p>05.23.17 - Construction mechanics (Technical Sciences),</p> <p>05.23.19 - Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences)</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 46, No.1 Makhachkala, 2019–200p.</p> <p>Published by decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>
--	---

**CONTENTS**  
**POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

<i>Boukharov A.V., Vishnevsky E.V., Ginevsky A.F.</i> <b>NUMERICAL SIMULATION OF COOLING JET FROM HYDROGEN AND DEUTERIUM AS APPLICABLE TO INSTALLATIONS ON RECEIVING CRYOGENIC MONODISPERSE TARGETS .....</b>	<b>8</b>
<i>Glushaev A.V., Zamarashkina V.N., Malysheva T.A., Sokolova E.V.</i> <b>CRYOGENIC INSTRUMENT REFRIGERATING BY LIQUID NITROGEN IN UNDERHEATED CONDUCTION .....</b>	<b>19</b>
<i>Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispahov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M.</i> <b>THERMOELECTRIC SYSTEM FOR EXTRACTION OF FOREIGN OBJECTS FROM HUMAN BODY .....</b>	<b>32</b>
<i>Ismailov T.A., Ibragimova A.M.</i> <b>CALCULATION MODEL OF THE SYSTEM OF THERMAL STABILIZATION OF THE ELEMENTS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT .....</b>	<b>42</b>
<i>Lobanov I. E.</i> <b>MODELING OF HEAT EXCHANGE AT TURBULENT FLOW IN FLAT CHANNELS WITH SYMMETRIC TURBULIZERS ON BOTH PARTIES .....</b>	<b>53</b>
<i>Khuramshina R.A., Yamalov A.I.</i> <b>THE IMPACT OF LIQUEFIED NATURAL GAS COMPOSITION AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE STARTING STORAGE OF THE EQUIPMENT AT THE TIME OF OCCURRENCE OF THE PHENOMENON OF ROLLOVER .....</b>	<b>66</b>
<b>COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT .....</b>	<b>79</b>
<i>Antonov V.O., Petrenko V.I., Sychkov V.B., Tebueva F.B.</i> <b>DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF GENERALIZED COORDINATES OF THE MECHANISM OF THE BASIC DEVICE WITH EXCESSIVE MOBILITY .....</b>	<b>79</b>
<i>Bokova O.I., Drovnikova I.G., Popov A.D., Rogozin E.A.</i> <b>MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF THE INFORMATION PROTECTION SYSTEM FROM UNAUTHORIZED ACCESS CREATED IN THE SOFTWARE ENVIRONMENT OF IMITATION MODELING «CPN TOOLS» .....</b>	<b>90</b>
<i>Buzhinskaya N. V., Vaseva E. S., Iskandarov R. N., Shubina N. V.</i> <b>SYSTEM OF CONTROL AND MANAGEMENT OF ACCESS ON THE BASIS OF ARDUINO MICROCONTROLLERS .....</b>	<b>103</b>
<i>Grishin V.M., Wu Chong Tuan</i> <b>CONSIDERATION OF SIGNIFICANT FACTORS AND LIMITATIONS IN THE STUDY AND DEVELOPMENT OF PASSIVELY RESERVED AIRCRAFT SUBSYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT TOLERANCES .....</b>	<b>113</b>

<b>Emelianov M. V.</b> <b>THE DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS .....</b>	<b>123</b>
<b>Zherugov R. A., Kangezova M. H., Lapidus A. A.</b> <b>AUTOMATION OF THE PROCESS OF ENSURING THE CONFORMITY OF THE OBJECT TO THE “GREEN” CONSTRUCTION STANDARDS .....</b>	<b>132</b>
<b>Popov A.L.</b> <b>UNIVERSAL INFORMATION BLOCKS AS PART OF THE DATABASE MANAGEMENT SYSTEM OF THE OPERATIONAL DUTY SHIFT OF THE CONTROL CENTER IN CRISIS SITUATIONS</b>	<b>142</b>
<b>BUILDING AND ARCHITECTURE .....</b>	<b>152</b>
<b>Gaishun A.S., Gaishun E.S., Kovaleristova E.V., Yavruyan Kh.S.</b> <b>WALL CERAMIC MATERIALS BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS OF COAL SERIES .....</b>	<b>152</b>
<b>Zhukov K. Y., Levchenko A. A., Potsepnya K. N.</b> <b>ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF ADDITIONAL HOLDING DEVICES TO IMPROVE THE STABILITY OF SHEET PILES MADE OF POLYVINYLCHLORIDE .....</b>	<b>160</b>
<b>Zotov I.M., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B.</b> <b>CALCULATION OF THE FLAT BENDING SHAPE STABILITY OF RECTANGULAR CROSS SECTION BEAMS WITH REGARD TO CREEP .....</b>	<b>169</b>
<b>Karpov D. F., Sinitsyn A. A.</b> <b>POSSIBILITIES OF INTEGRATED CONTROL OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF BUILDING STRUCTURES AT THE RESEARCH BENCH .....</b>	<b>177</b>
<b>Kokoev M.N., Fedorov V.T., Hadgishalapov G.N.</b> <b>WIND ENERGY IN THE MANUFACTURE OF PENOSTEKL AND KERAMZIT .....</b>	<b>187</b>
<b>FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS .....</b>	<b>195</b>

**Для цитирования:** Бухаров А.В., Вишневецкий Е.В., Гиневский А.Ф. Численное моделирование охлаждения струй водорода и дейтерия применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 8-17.  
DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-17

**For citation:** Boukharov A.V., Vishnevsky E.V., Ginevsky A.F. Numerical simulation of cooling jet from hydrogen and deuterium as applicable to installations on receiving cryogenic monodisperse targets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 8-17. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-17

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.56: 621.039

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-8-18

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СТРУЙ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСТАНОВКАМ ПО ПОЛУЧЕНИЮ КРИОГЕННЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИШЕНЕЙ

**Бухаров А.В.<sup>1</sup>, Гиневский А.Ф.<sup>3</sup>, Вишневецкий Е.В.<sup>2</sup>**

<sup>1-3</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

<sup>1-3</sup>111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия,

<sup>1</sup>e-mail:boukharov@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail:alexeyginevsky@gmail.com,

<sup>3</sup>e-mail: emmanuelcell@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели и проведение численных расчётов охлаждения тонких струй водорода и дейтерия применительно к установкам по получению криогенных монодисперсных мишеней. **Методы.** Для реализации поставленной цели была создана модель истечения криогенной струи в область низкого давления. В программной среде PHOENICS численным методом исследовано изменение с течением времени температуры поверхности и внутренней части струи при различных внешних параметрах. **Результат.** Получены зависимости изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия вдоль поверхности струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере установок по получению криогенных монодисперсных мишеней. **Вывод.** Показана принципиальная возможность создания высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней. В соответствии с расчётами, при вводе тонких жидких струй водорода или дейтерия со скоростью до 100 м/с в рабочую камеру с низким давлением, струи на расстоянии до 1 мм не успевают замёрзнуть и могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся гранулами. Разработанная модель и программа для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй, а также результаты численных расчётов могут быть использованы при создании установок по получению высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней.

**Ключевые слова:** струи водорода, струи дейтерия, криогенные монодисперсные мишени, модель истечения криогенной струи, низкое давление, программная среда PHOENICS

## POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

### NUMERICAL SIMULATION OF COOLING JET FROM HYDROGEN AND DEUTERIUM AS APPLICABLE TO INSTALLATIONS ON RECEIVING CRYOGENIC MONODISPERSE TARGETS

Alexander V. Bukharov<sup>1</sup>, Alexey F. Ginevsky<sup>3</sup>, Evgeny V. Vishnevsky<sup>2</sup>

<sup>1-3</sup>National Research University «MPEI»,

<sup>1-3</sup>14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia,

<sup>1</sup>e-mail:boukharov@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail:alexeyginevsky@gmail.com,

<sup>3</sup>e-mail: emmanuelcell@mail.ru

**Abstract Objectives** Development of a model and carrying out numerical calculations for the cooling of thin jets of Hydrogen and Deuterium as applicable to installations on receiving cryogenic monodisperse targets. **Methods.** To achieve this purpose, the model of cryogenic jet outflow into the low pressure area was created and using PHOENICS software the temperature change of the surface and the interior of a jet over time for various external parameters is investigated through the numerical method. **Result.** The dependences of temperature changes of liquid Hydrogen and Deuterium jets along the jet surface and along the radius depending on the jet diameter, speed, initial jet temperature and pressure in the working chamber of installations for receiving cryogenic monodisperse targets were carried out. **Conclusion.** The principal possibility of creating high-speed cryogenic monodisperse targets is shown. According to the calculations, at input of thin liquid jets of Hydrogen or Deuterium with a speed up to 100 m/s into the working chamber with low pressure, jets at a distance of up to 1 mm do not have time to freeze and can be broken into monodisperse drops. Drops are cooled due to evaporation and become granules. The developed model, the program for determination of parameters of steady monodisperse disintegration of liquid cryogenic streams and results of numerical calculations can be used during creation of units for receiving high-speed cryogenic monodisperse targets.

**Keywords:** hydrogen jets, deuterium jets, cryogenic monodisperse targets, cryogenic jet outflow model, low pressure, PHOENICS software

**Введение.** Развитие ускорительной техники сделало возможным получение высокоэнергетических пучков элементарных частиц. Взаимодействие таких пучков с криогенными монодисперсными мишенями позволит решить ряд фундаментальных проблем ядерной физики. Криогенная монодисперсная мишень рассматривается как наиболее перспективная мишень для будущего эксперимента «PANDA» [1-3]. «PANDA» — это уникальный эксперимент в рамках проекта нового европейского ускорителя FAIR в г. Дармштадт (Германия). Физическая программа эксперимента направлена на исследование фундаментальных проблем ядерной физики, нахождение новых экстремальных форм материи.

В общем виде криогенные монодисперсные мишени представляют собой поток твёрдых монодисперсных гранул малых размеров, получаемых из предварительно сжиженного газа, с разбросом гранул по размерам и скорости, не превышающим 0,1%.

Криогенные монодисперсные мишени имеют следующие уникальные свойства:

1. Малый размер монодисперсных мишеней – диаметр от 10 мкм до 100 мкм. Мишени можно получать из жидкого водорода или его изотопов;
2. Высокая светимость мишеней позволяет значительно сократить экспериментальное время и увеличить статистическую достоверность регистрации новых элементарных частиц;
3. Возможность регистрации разлёта частиц, образующихся в результате распада ядер мишени, в угле 4π.
4. Возобновляемость мишени. Место мишени после взаимодействия с пучком занимает

новая мишень.

Подробное описание принципа работы установок по получению криогенных корпускулярных мишеней приведено в работах [4-7] и на рис. 1.

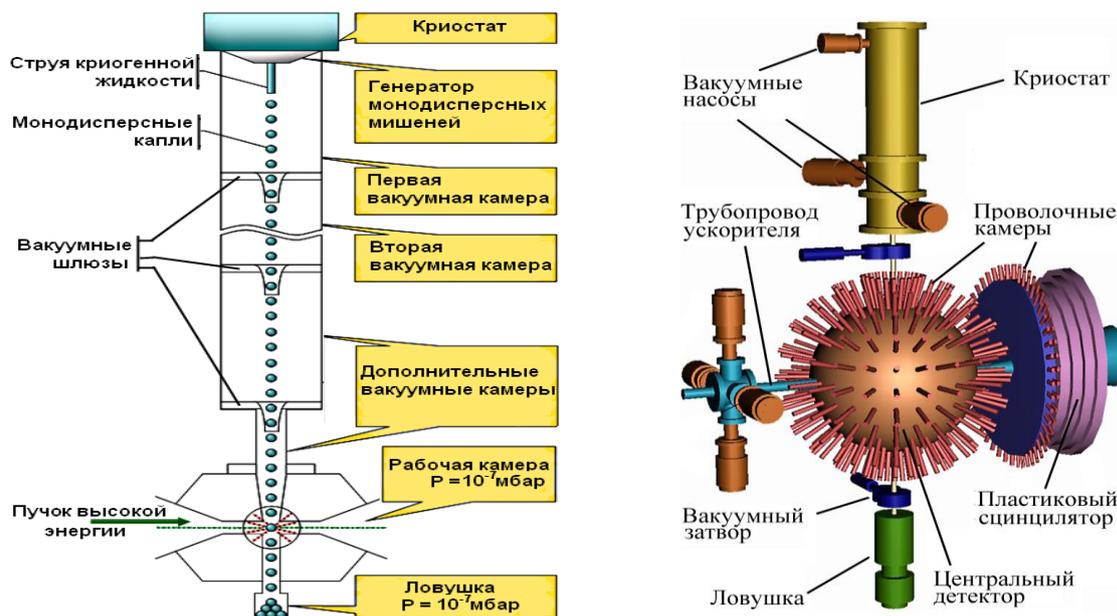


Рис. 1. Принцип работы и вариант установки криогенной монодисперсной мишени для исследования экстремальных форм материи: левый рисунок – принцип работы, правый рисунок – возможный вариант установки мишени

Fig.1. The principle of operation and the possible installation of a cryogenic monodisperse target for the study of extreme matter forms: left picture – principle of operation, right picture – possible installation of the target

Из генератора монодисперсных капель струя жидкого криоагента вытекает в первую вакуумную камеру. Для предотвращения быстрого замерзания истекающей струи в камере поддерживается давление немного меньше давления тройной точки.

В этой камере под действием специального возмущения, создаваемого на поверхности, струя распадается на одинаковые монодисперсные капли. Теоретической основой получения монодисперсных капель является теория Релея – Вебера [9].

Поскольку давление в вакуумной камере ниже давления около поверхности капель, происходит интенсивное испарение жидкости. В результате капли охлаждаются, замерзают и становятся твёрдыми гранулами. Гранулы, проходя через систему шлюзов и дополнительных вакуумных камер, ускоряются и поступают в рабочую камеру, где и происходит их взаимодействие с ускорительным пучком или лучом лазера. Для уменьшения натекания и увеличения скорости гранул используют две и более вакуумные камеры, разделённые между собой шлюзами. После взаимодействия с высокоэнергетичным пучком гранулы попадают в охлаждаемую ловушку и осаждаются на её стенках.

На основании анализа имеющейся литературы [10-15] можно сделать вывод, что наиболее сильное влияние на стабильность потока мишеней оказывают шлюзы и особенно первый шлюз, соединяющий камеру тройной точки с другими вакуумными камерами. Если значительно уменьшить давление в первой камере или совсем убрать первый шлюз и сразу направить капли во вторую вакуумную камеру, то можно значительно упростить конструкцию установки и уменьшить её размеры. Главное, не дать жидкой криогенной струе замёрзнуть.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является определение связи между параметрами струй и давлением в первой камере, необходимой для устойчивого монодисперсного распада жидких струй водорода и дейтерия без их замерзания.

**Методы исследования.** Для реализации поставленной цели была создана модель истечения криогенной струи в область низкого давления, и в программной среде PHOENICS численным методом исследовано изменение с течением времени температуры поверхности и внутренней части струи при различных внешних условиях.

**Математическая модель истечения криогенной жидкости в область низкого давления.** В модели предполагается, что охлаждение струи происходит только за счёт испарения вещества с её поверхности. Испарение молекул с поверхности струи осуществляется по закону Герца – Кнудсена. Обратный поток молекул нагревает струю и замедляет процесс испарения. Однако влиянием этого процесса на температуру струи можно пренебречь в силу того, что его вклад при испарении в вакуум не превышает 5–10%.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: течение является стационарным;

- скорость жидкости достаточно мала по сравнению со скоростью звука, как в струе, так и в окружающей среде, поэтому использовано приближение несжимаемой жидкости;
- течение жидкости считается ламинарным;
- все свойства жидкости являются постоянными, не зависящими от температуры;
- окружающая среда достаточно разреженная, поэтому трением на поверхности струи можно пренебречь;
- температура жидкости такова, что поверхность струи находится в неравновесном состоянии, поэтому существует достаточно интенсивное испарение с поверхности струи;
- охлаждение струи происходит без фазового перехода.

В описанных допущениях уравнения математической модели могут быть записаны в следующем виде:

уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div}(\vec{u}) = 0, \quad (1)$$

уравнение Навье - Стокса с учётом осевой симметрии в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \rho(\vec{u} \cdot \nabla)u_r &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left( \Delta u_r - \frac{u_r}{r^2} \right), \\ \rho(\vec{u} \cdot \nabla)u_z &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \Delta u_z \end{aligned}, \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\rho C_p (\vec{u} \cdot \nabla)T = \lambda \Delta T. \quad (3)$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости струи,  $u_r$  – скорость струи по радиусу,  $u_z$  – скорость струи по оси  $z$ ,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $T$  – температура струи,  $\rho$  – плотность жидкости,  $P$  – давление в рабочей камере,  $C_p$  – теплоёмкость,  $\lambda$  – теплопроводность.

Система уравнений (1) - (3) имеет следующие граничные условия:

- на входе в рабочую вакуумную камеру задается распределение скорости и температура жидкости:

$$\text{при } z = 0 \quad u_r = 0, \quad u_z = u_0(r), \quad T = T_0; \quad (4)$$

- на оси струи задается условие симметрии:

$$\text{при } r = 0 \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad u_r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

- на поверхности струи при  $r = R$  задаются нулевые касательные напряжения и условия испарения:

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \chi \cdot j(T), \quad (6)$$

где  $\chi$  – скрытая теплота парообразования;  $u_0$  и  $T_0$  соответственно скорость и начальная температура струи на входе в рабочую камеру;  $R$  – радиус струи.

Массовый поток в (6) может быть рассчитан с применением различных моделей.

В нашем случае используется модель Герца - Кнудсена:

$$j(T) = [P_s(T) - P] \left( \frac{M}{2\pi R_g T} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $P_s(T)$  – давление насыщения на поверхности струи;  $P$  – давление в рабочей камере (см. рис.1);  $M$  – масса молекулы жидкости,  $R_g$  – универсальная газовая постоянная.

Таким образом, получена замкнутая система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

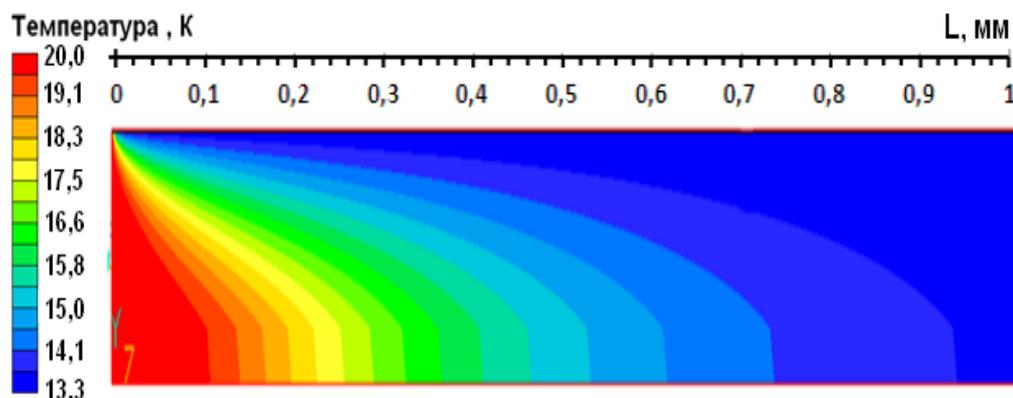
**Обсуждение результатов.** В программной среде PHOENICS [16] были проведены численные расчёты изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия по длине струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере. Конечно-разностная аппроксимация для связи давления и скорости при решении уравнений движения производилась методом контрольного объема с применением метода SIMPLEST [16].

Расчёты проводились для струй водорода и дейтерия с начальной температурой 20 К. Теплофизические свойства водорода и дейтерия, необходимые для расчётов взяты из работ [17-19] и представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Теплофизические свойства водорода и дейтерия [17-19]**  
**Table 1. Heatphysical properties of hydrogen and deuterium [17-19]**

Вещество Substance	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)	$\chi$ , кДж/кг	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с
Водород Hydrogen	70,9	9,4	100	449,4	13,9
Дейтерий Deuterium	171,3	5,3	126	312,7	42,0

Результаты некоторых расчётов изменения температуры жидких струй водорода представлены на рис. 2 - 6, а результаты для струй дейтерия – на рис. 7- 11.



**Рис.2. Изменение температуры поверхности и внутренней части 10 мкм струи водорода при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с давлением 50 мбар**

**Fig.2. Temperature change of the surface and internal part of 10 mkm of hydrogen jet with expiration speed of 100 m/s in the working chamber with pressure of 50 mbar**

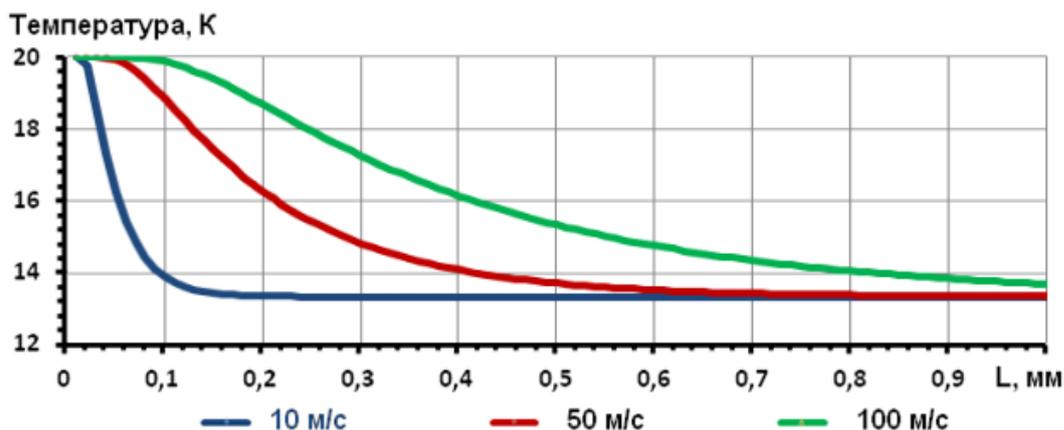


Рис.3. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 10 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.3. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 10 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

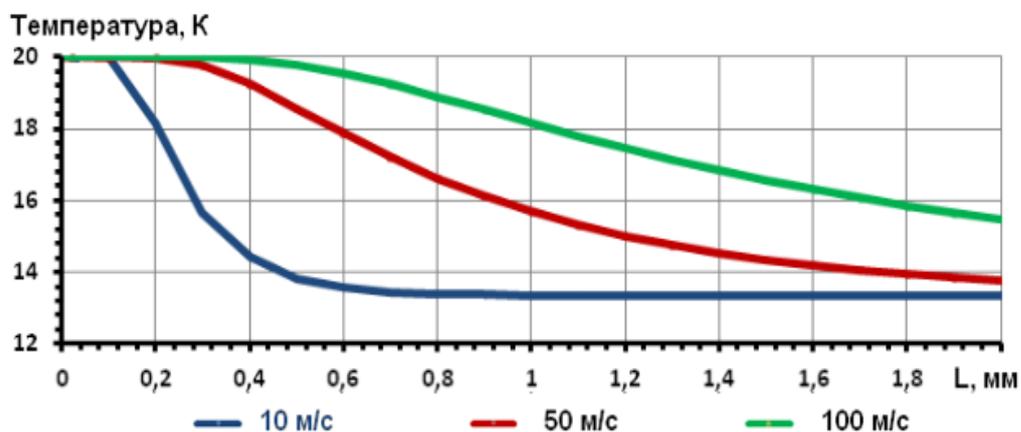


Рис.4. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.4. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 20 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

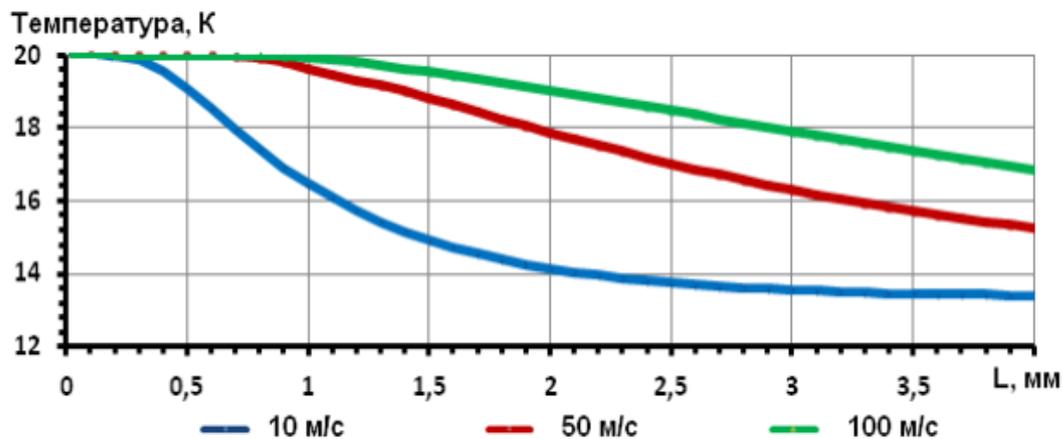


Рис.5. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 50 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.5. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 50 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

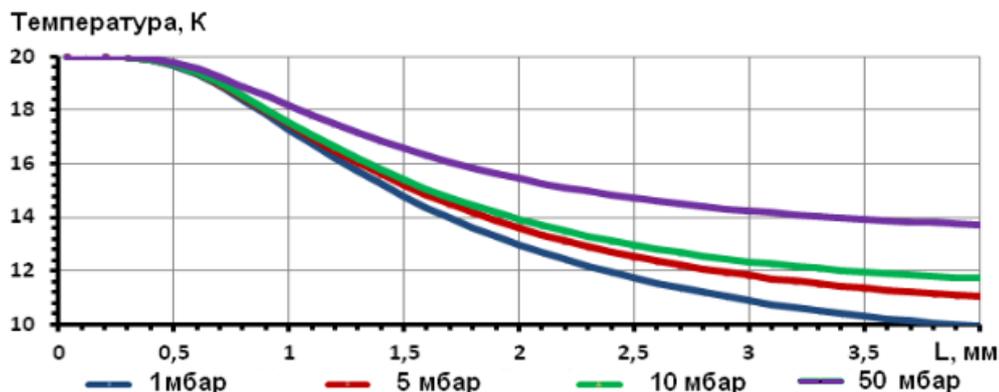


Рис.6. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с различным давлением

Fig.6. Temperature change of the internal part of hydrogen jet with diameter of 20 mkm with expiration speed of 100 m/s in the working chamber with different pressure

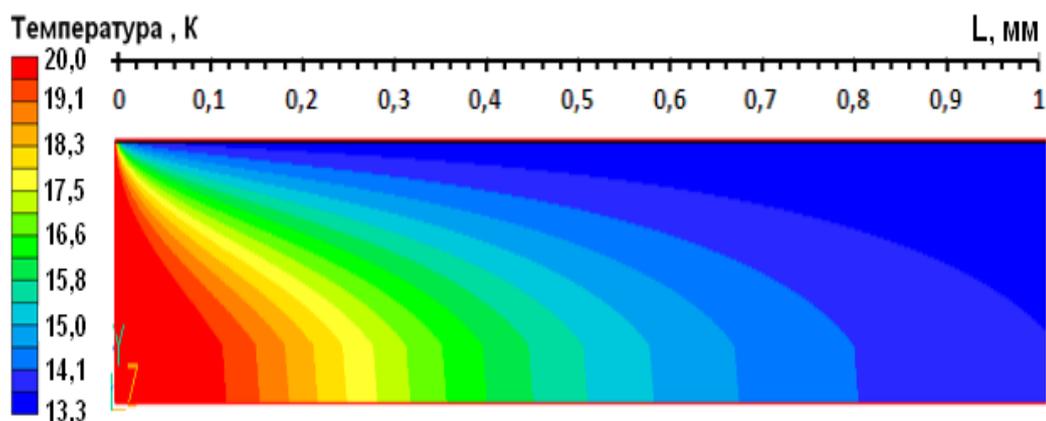


Рис.7. Изменение температуры поверхности и внутренней части 10 мкм струи дейтерия при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.7. Temperature change of surface and internal part of 10 mkm of deuterium jet with expiration speed of 100 m/s in the working chamber with pressure of 50 mbar

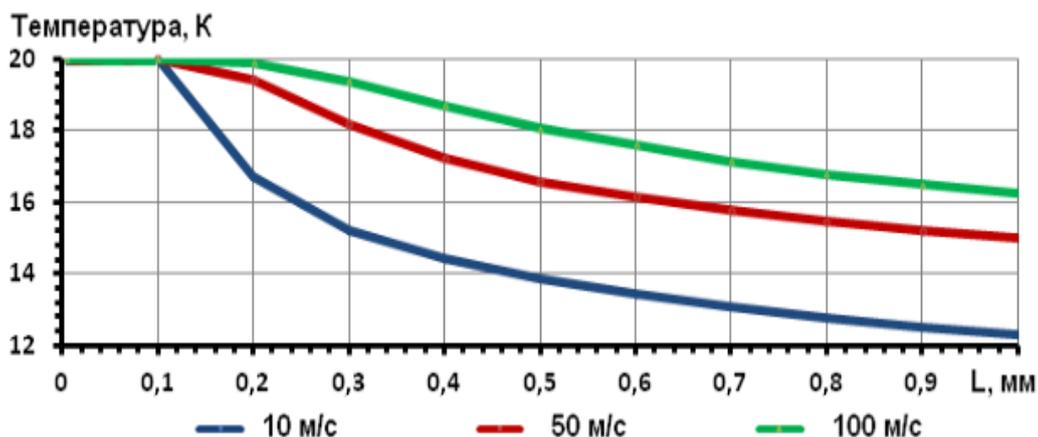


Рис.8. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 10 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.8. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 10 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

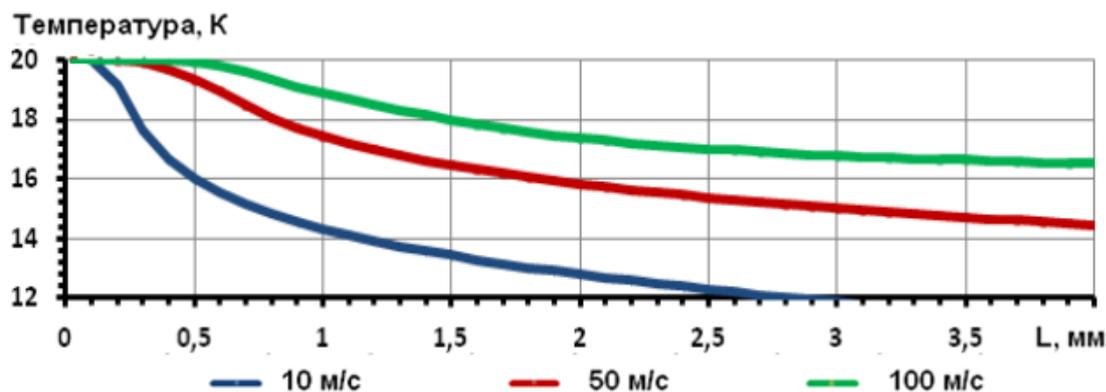


Рис.9. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 20 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.9. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 20 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

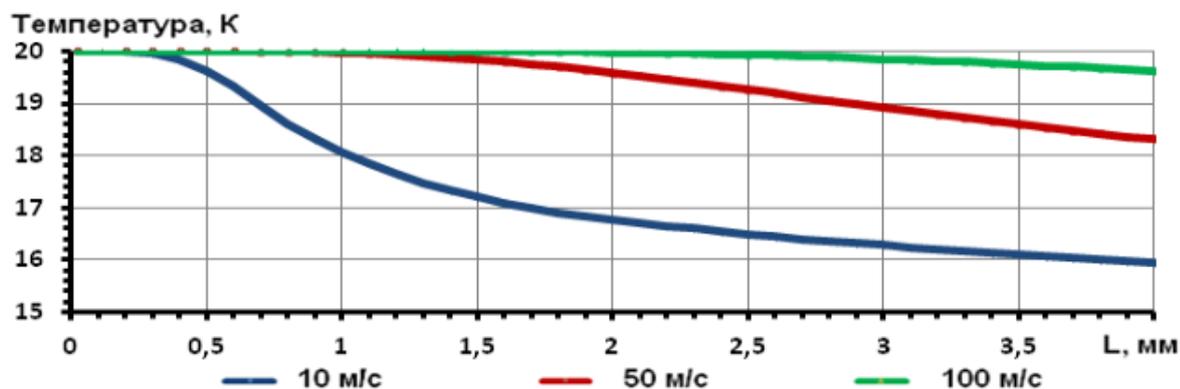


Рис.10. Изменение температуры внутренней части струи дейтерия диаметром 50 мкм при истечении с разной скоростью в рабочую камеру с давлением 50 мбар

Fig.10. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 50 mkm with different expiration speed in the working chamber with pressure of 50 mbar

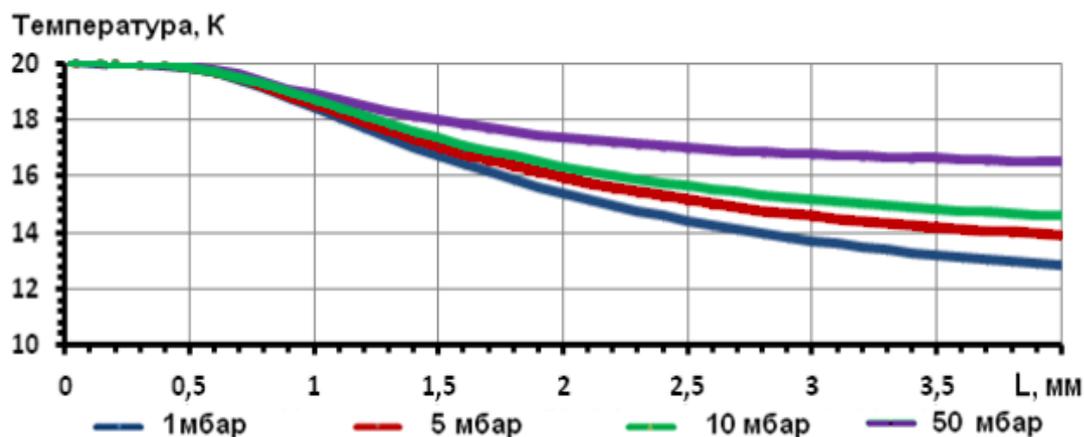


Рис.11. Изменение температуры внутренней части струи водорода диаметром 20 мкм при истечении со скоростью 100 м/с в рабочую камеру с различным давлением

Fig.11. Temperature change of the internal part of deuterium jet with diameter of 20 mkm at the expiration speed of 100 m/c in the working chamber with different pressure

Из результатов, представленных на рис. 2 - 11 видно, что замерзание тонких струй водорода и дейтерия при их истечении в рабочую камеру с низким давлением не происходит мгновенно. Время полного замерзания существенным образом зависит от диаметра струи, скорости её истечения и давления в рабочей камере. Чем меньше давление в рабочей камере, чем меньше диаметр струи и чем меньше скорость истечения – тем быстрее замерзают водородные и дейтериевые струи.

В соответствии с расчётами струи водорода диаметром 10 мкм при скорости истечения 10 м/с замёрзают на расстоянии 0,1 мм от точки ввода в рабочую камеру, а струи дейтерия с теми же параметрами замёрзают на расстоянии 0,9 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Чем больше скорость истечения, тем медленнее происходит замерзание струй. В соответствии с расчётами тонкие струи водорода при скорости истечения 100 м/с и давлении в рабочей камере 1 мбар замёрзают на расстоянии 1 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Струи дейтерия с теми же параметрами замёрзают на расстоянии 3 мм от точки ввода в рабочую камеру.

Из результатов численных расчётов следует, при одинаковых внешних параметрах замерзание струй дейтерия происходит за большее время, чем замерзание струй водорода. Полученный результат можно объяснить отличием теплофизических свойств водорода и дейтерия.

**Вывод.** Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение. С их помощью, зная давление в первой камере, можно определить параметры необходимые для устойчивого монодисперсного распада жидких струй водорода и дейтерия без их замерзания.

Для установок по получению криогенных монодисперсных мишеней одной из важных проблем является проблема получения стабильного потока мишеней. Наиболее сильное влияние на стабильность потока мишеней оказывают шлюзы и особенно первый шлюз, соединяющий камеру тройной точки с другими вакуумными камерами. Если значительно уменьшить давление в первой камере или совсем убрать первый шлюз и сразу направить капли во вторую вакуумную камеру, то можно значительно упростить конструкцию установки и уменьшить её размеры.

Для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй разработана модель истечения криогенной струи в область низкого давления.

В программной среде PHOENICS для установок по получению криогенных монодисперсных мишеней численным методом получены зависимости изменения температуры жидких струй водорода и дейтерия вдоль поверхности струи и по радиусу в зависимости от диаметра струи, скорости, начальной температуры струи и давления в рабочей камере.

Из полученных результатов следует, что при вводе тонких криогенных струй в среду с низким давлением они сразу не замерзают, а в течение некоторого времени остаются жидкими. Время полного замерзания существенным образом зависит от диаметра струи и скорости её истечения в рабочую камеру. Чем больше скорость истечения, тем медленнее происходит замерзание струй.

В соответствии с расчётами, тонкие струи водорода при скорости истечения 100 м/с и давлении в рабочей камере 1 мбар, замёрзают на расстоянии 1 мм от точки ввода в рабочую камеру. Струи дейтерия с теми же параметрами замёрзают на расстоянии 3 мм от точки ввода в рабочую камеру. Незамёрзшие струи могут быть разбиты на монодисперсные капли. Капли за счёт испарения охлаждаются и становятся стабильным потоком твёрдых монодисперсных мишеней.

Разработанная модель, программа для определения параметров устойчивого монодисперсного распада жидких криогенных струй и результаты численных расчётов могут быть использованы при создании установок по получению высокоскоростных криогенных монодисперсных мишеней.

#### **Библиографический список:**

1. Factory / С. Ekstrom // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P.1–3.
2. Криогенные корпускулярные мишени. Концепция и основная модель / А. В. Бухаров, А. Ф. Гиневский, В. П. Чернышев и др.– Препринт – № 17-17.М.: Изд-во МЭИ, 2002.–35 с.

3. Бухаров А. В. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике/ А.В. Бухаров, А.С. Дмитриев. – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 144 с.
4. Криогенные корпускулярные мишени. Генерация гранул водорода: расчет основных конструктивных элементов, экспериментальный стенд, тесты / А.В.Бухаров, В. Боргс, В.Н. Афонасьев и др. Препринт – № 9-05. М.: Изд-во ИТЭФ, 2005. – 58 с.
5. Weber C. Zum Zerfalleines Flüssigkeitsstrahles ( On the breakdown of a fluid jet ) / C. Weber // Z. Angew. Math. und Mech. – 1931. Technical Design Report for the PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab et al. // The European Physical J. A – Hadrons and Nuclei. – 2013. – V. 49. – № 2. – P. 25.
6. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment / A.V.Boukharov, A. N. Vasiliev, D. A. Morozov et al. // Atomic Energy. – 2012. – V. 112. – № 2. – P. 129–138.
7. FAIR CDR - An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons // Conceptual Design Report, 2001. – 695 p.
8. Trostell B. Vacuum Injection of Hydrogen Micro-Sphere Beams / B. Trostell // Nuc. Instr. and Met. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 41–52.
9. Ekstrom C. CELSIUS as an  $\eta$ -№ 11. – P. 136–154.
10. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V.Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Problems of atomic science and technology. Nuclear physics inv. – 2013. – № 6. – P. 205–208.
11. Бухаров А.В. Теплофизические проблемы криогенных корпускулярных мишеней/ А.В. Бухаров, А.Ф. Гиневский, А.Ю. Бурлакова // Вест. МЭИ. – 2015. – №3. – С. 35 – 41.
12. Бухаров А.В. Исследование поведения капиллярных сильноиспаряющихся струй жидкости в условиях вакуума / А.В. Бухаров, А.А. Семенов // Вест. МЭИ. – 2003. – № 4. – С.40–42.
13. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow - Julich Pellet Target / A. Boukharov, M. Büscher, V. Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. – 2009. – V.18. – Is.2. – P.505–510.
14. Экспериментальная установка для получения твёрдых гранул водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др. // Вест. МЭИ. – 2006. – № 2. – С. 16–24.
15. Эксперименты по получению гранул из твёрдого водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др. // Вест. МЭИ. – 2006. – № 3. – С. 34–40.
16. Official site of company CHAM/Products, 2013.–URL:[www.cham.co.uk](http://www.cham.co.uk).URL:[www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_docs/tr313/tr313.html](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr313/tr313.html).
17. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др. / под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
18. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справ. издание / Д.Ю. Гамбург, В.П.Семёнов, Н.Ф. Дубовкин и др. – М.: Химия, 1989. – 672 л.
19. Свойства жидкого и твёрдого водорода: Справочный обзор, № 1 / Б.Н. Есельсон, Ю. П. Благой, В.Н. Григорьев и др.– М.: Изд-во стандартов,1969.–136с.

#### References:

1. Technical Design Report for the PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab et al. // The European Physical J. A – Hadrons and Nuclei. – 2013. – V. 49. – № 2. – P. 25.
2. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment / A.V. Boukharov, A. N. Vasiliev, D. A. Morozov et al. // Atomic Energy. – 2012. – V. 112. – № 2. – P. 129–138.
3. FAIR CDR - An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons // Conceptual Design Report, 2001. – 695 p.
4. Trostell B. Vacuum Injection of Hydrogen Micro-Sphere Beams / B. Trostell // Nuc. Instr. and Met. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 41–52.
5. Ekstrom C. CELSIUS as an  $\eta$  Factory / C. Ekstrom // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. – 1995. – V. 362. – P. 1–3.
6. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni. Kontseptsiya i osnovnaya model' / A. V. Bukharov, A. F. Ginevskiy, V. P. Chernyshev i dr.– Preprint – № 17 17.М.: Изд-во МЭИ, 2002.–35 с. [Cryogenic corpuscular targets. Concept and main model/ A.V. Boukharov, A.F. Ginevsky, V.P. Chernyshev et al. – Preprint – № 17-17. М.: MPEI publishing house, 2002.–35 p. (In Russ.)]
7. Bukharov A. V. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni v energetike/ A.V. Bukharov, A.S. Dmitriyev. – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 144 с.[ Boukharov A.V., Cryogenic corpuscular targets in power / A.V. Boukharov, A.S. Dmitriyev. – М.: MPEI publishing house, 2013. – 144 p. (In Russ.)]
8. Kriogennyye korpuskulyarnyye misheni. Generatsiya granul vodoroda: raschet osnovnykh konstruktсионnykh elementov, eksperimental'nyy stand, testy / A.V.Bukharov, V. Borgs, V.N. Afonasyev i dr. Pre-print – № 9-05. М.: Изд-во ИТЭФ, 2005. – 58 с.[Cryogenic corpuscular targets. Generation of granules of hydrogen: calculation of the basic constructional elements, experimental stand, tests / A.V. Boukharov, V. Borgs, V.N. Afonasyev et al. Preprint – № 9-05. М.: ИТЭФ publishing house, 2005. – 58 p. (In Russ.)]

9. Weber C. Zum Zerfalleines Flüssigkeitsstrahles (On the breakdown of a fluid jet) / C. Weber // Z. Angew. Math. und Mech. – 1931. – № 11. – P. 136–154.
10. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V. Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Problems of atomic science and technology. Nuclear physics inv. – 2013. – № 6. – P. 205–208.
11. Bukharov A.V. Teplofizicheskiye problemy kriogennykh korpuskulyarnykh misheney/ A.V. Bukharov, A.F. Ginevskiy, A.YU. Burlakova // Vest. MEI. 2015. №3. S. 35 – 41. [Boukharov A.V. Heatphysical problems of cryogenic corpuscular targets / A.V. Boukharov, F. Ginevsky, A.Yu. Burlakova // Vestnik MEI. – 2015. – №3. – P. 35 – 41. (In Russ.)]
12. Bukharov A.V. Issledovaniye povedeniya kapillyarnykh sil'noispariyayushchikhsya struy zhidkosti v usloviyakh vakuuma / A.V. Bukharov, A.A. Semenov // Vest. MEI. 2003. № 4. S.40–42. [Boukharov A.V. Research of behavior capillary сильноиспаряющихся liquid streams in the conditions of a vacuum / A.V. Boukharov, A.A. Semyonov // Vestnik MEI. – 2003. – № 4. – P.40–42. (In Russ.)]
13. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow-Julich Pellet Target / A. Boukharov, M. Büscher, V. Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. 2009. V.18. Is.2. – P.505–510.
14. Eksperimental'naya ustanovka dlya polucheniya tvordykh granul vodoroda / A.V. Bukharov, M. Byusher, A.A. Semenov i dr. // Vest. MEI. 2006. № 2. S. 16–24. [Experimental installation for receiving firm granules of hydrogen / A.V. Boukharov, M. Büscher, A.A. Semyonov et al. // Vestnik MEI. 2006. № 2. pp. 16–24. (In Russ.)]
15. Experiments on receiving granules from solid hydrogen / A.V. Boukharov, M. Büscher, A.A. Semyonov et al. // Vestnik MEI. – 2006. – № 3. – С. 34–40. (In Russ.)]
16. Official site of company CHAM / Products, 2013. – URL: [www.cham.co.uk](http://www.cham.co.uk).
17. Spravochnik po fiziko-tekhnicheskim osnovam kriogeniki / M.P. Malkov, I.B. Danilov, A.G. Zel'dovich i dr. / pod red. M.P. Malkova. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 431 с. [The reference book on physics and technology bases of cryogenics / L. S. Malkov, I.B. Danilov, A.G. Zeldovich et al. / under the editorship of M.P. Malkov. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 431 p. (In Russ.)]
18. Vodorod. Svoystva, polucheniye, khraneniye, transportirovaniye, primeneniye. Sprav. izdaniye / D.YU. Gamburg, V.P. Semonov, N.F. Dubovkin i dr. – M.: Khimiya, 1989. – 672 l. [Hydrogen. Properties, receiving, storage, transportation, application. Help edition / D.Yu. Hamburg, V.P. Semyonov, N.F. Dubovkin et al. . – M.: Chemistry, 1989. – 672 p. (In Russ.)]
19. Svoystva zhidkogo i tvordogo vodoroda: Spravochnyy obzor, № 1 / B.N. Yesel'son, YU. P. Blagoy, V.N. Grigor'yev i dr. – M.: Izd-vo standartov, 1969.–136s. [Properties of liquid and solid hydrogen: The help review, № 1 / B.N. Eselson, Yu.P. Blagoy, V.N. Grigoriev et al. . – M.: Publishing house of standards, 1969.–136p. (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Бухаров Александр Васильевич** – доктор технических наук, профессор, кафедра низких температур.

**Гиневский Алексей Феликсович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра низких температур.

**Вишневецкий Евгений Владимирович** – аспирант, кафедра низких температур.

**Information about the authors**

**Alexander V. Bukharov** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Low Temperatures

**Alexey F. Ginevsky** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department of Low Temperatures.

**Evgeny V. Vishnevsky** - Postgraduate Student, Department of Low Temperatures.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.12.2018.

Принята в печать 25.01.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.12.2018.

Accepted for publication 25.01.2019.

**Для цитирования:** Глушаев А.В., Замарашкина В.Н., Малышева Т.А., Соколова Е.В. Криохирургический инструмент, охлаждаемый потоком недогретого жидкого азота. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (1):19-31. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-19-31

**For citation:** Glushaev A.V., Zamarashkina V.N., Malysheva T.A., Sokolova E.V. Cryogenic instrument refrigerating by liquid nitrogen in underheated conduction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1):19-31. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-19-31

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.593

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-19-31

### КРИОХИРУРГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ, ОХЛАЖДАЕМЫЙ ПОТОКОМ НЕДОГРЕТОГО ЖИДКОГО АЗОТА

Глушаев А.В.<sup>4</sup>, Замарашкина В.Н.<sup>2</sup>, Малышева Т.А.<sup>1</sup>, Соколова Е.В.<sup>3</sup>

<sup>1-4</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),  
<sup>1-4</sup>190001, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова 9, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: mta61@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: qwe\_zam@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail: katena-log@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail: lorencia48155@gmail.com

**Резюме. Цель.** Для проведения абляции опухолей успешно применяют криогенные хирургические инструменты. Длительное время процедуры криоабляции в России проводили при помощи криодеструкторов, охлаждаемых жидким азотом, которые способны отводить теплоту от объекта абляции с высокой плотностью теплового потока и быстро формировать зону криоабляции, при этом относительно дешевы и просты в эксплуатации. Однако эти инструменты оказались не пригодны для малоинвазивных операций, поэтому их вытесняют из практической медицины криохирургические инструменты охлаждаемые за счет дросселирования газообразного аргона. Это и обусловило цель исследования - выбор аппаратуры для организации локального переохлаждения патологической ткани. **Метод.** Для решения задачи оптимизации криогенного трубопровода был выбран метод поиска Парето-оптимального решения. Для решения данной задачи достаточно повысить давление в потоке жидкости направляемой в NCS при помощи жидкостного микронасоса. В роли критериев качества в данной задаче выбраны: мощность гидравлических потерь и мощность тепловых потерь. **Результат.** Получены следующие результаты: минимальное давление в сосуде, обеспечивающее движение жидкости в однофазном состоянии по магистрали длиной 1 м составляет 0,75 МПа; при таком давлении через магистраль диаметром 1 мм поддерживается расход жидкости до 6 кг/ч; теплоотводящая способность инструмента достигает 608 Вт. Тепловая нагрузка на систему охлаждения теплоотводящего устройства аппарата для СА носит нестационарный характер и формируется за счет аккумулированного в тканях пациента запаса теплоты. **Вывод.** Использование в криохирургической аппаратуре жидкого азота в недогретом состоянии позволяет преодолеть отмеченные недостатки жидкостных криодеструкторов.

**Ключевые слова:** криоабляция, жидкий азот, поток недогретой жидкости, теплота, тепловой поток

**POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING  
CRYOGENIC INSTRUMENT REFRIGERATING BY LIQUID NITROGEN  
IN UNDERHEATED CONDUCTION**

*Aleksey V. Glushaev*<sup>4</sup>, *Veronika N. Zamarashkina*<sup>2</sup>, *Tatyana.A. Malysheva*<sup>1</sup>, *Ekaterina V. Sokolova*<sup>3</sup>

<sup>1-4</sup>**Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics (ITMO University),**

<sup>1-4</sup>9 Lomonosov Str., St. Petersburg 9190001, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: mta61@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: qwe\_zam@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail:katena-log@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail: lorencia48155@gmail.com

**Abstract Objectives** Cryogenic surgical instruments have been successfully used to conduct tumor ablation. For a long time, cryoablation procedures in Russia were carried out using cryo-destructors cooled with liquid nitrogen, which are able to remove heat from the ablation object with high heat flux density and quickly form a cryoablation zone, while being relatively cheap and easy to operate. However, these instruments turned out to be unsuitable for minimally invasive surgeries; therefore, they are squeezed out of practical medicine and cryosurgical instruments are cooled by throttling argon gas. This led to the purpose of the study - the choice of equipment for the organization of local supercooling of pathological tissue. **Method.** To solve the problem of optimizing the cryogenic pipeline, a method was chosen for finding the Pareto-optimal solution. To solve this problem, it is sufficient to increase the pressure in the fluid flow directed to the NCS using a liquid micropump. In the role of quality criteria in this task, we selected: hydraulic loss power and heat loss power. **Result.** The following results were obtained: the minimum pressure in the vessel, which ensures the movement of the fluid in a single-phase state, according to the magi-line of 1 m length is 0.75 MPa; With this pressure, through a line with a diameter of 1 mm, the flow rate is maintained up to 6 kg / h; heat dissipation ability of the instrument reaches 608 watts. The thermal load on the cooling system of the heat-dissipating device of the device for CA is unsteady and is formed due to the heat reserve accumulated in the patient's tissues. **Conclusion.** The use of liquid nitrogen in the undersized cryosurgical equipment makes it possible to overcome the noted drawbacks of liquid cryodestructors.

**Keywords:** cryoablation, liquid nitrogen, underheated liquid flow, heat, heat flow

**Введение.** Технология разрушающего криохирургического (КХ) воздействия основана на локальном переохлаждении патологической ткани до температуры, при которой в клетках происходят необратимые повреждения [1,2]. После успешного разрушающего КХ воздействия в патологическом органе развивается процесс крионекроза. Крионекроз обеспечивает естественное отторжение и удаление патологической ткани без использования традиционных хирургических приемов [3-7]. Локальное переохлаждение тканей тела пациента для формирования в нем зоны крионекроза получило международное обозначение криодеструкция (cryoablation (CA)). Это название точнее отражает суть кримедицинской технологии, так как во время операции CA достигается только разрушение патологических клеток [8,9].

Ранее методику разрушающего криотерапевтического воздействия называли криохирургией. На практике это незначительное отличие в терминах приводило к ряду тяжелых последствий, так как хирургические манипуляции предполагают удаление патологического органа во время операции. Следуя такой логике, технологию СА использовали для механического удаления патологической ткани, что достаточно часто приводило к тяжелым негативным последствиям. До сегодняшнего дня существуют области медицины, где методика СА практически не используется из-за большого объема негативной информации, полученной при неправильном использовании криодеструкции. К таким областям медицины можно отнести гинекологию. Из-за специфики проведения криоабляции на слизистых поверхностях репродуктивных органов, механическое удаление замороженных новообразований (кондилом, папиллом, миом) может стать причиной тяжелых и длительных кровотечений. Замена определения «криохирургия» термином «криоабляция» имеет важное значение для предупреждения подобных эксцессов.

Основным разрушающим фактором СА является степень переохлаждения патологической ткани. Распространено мнение о том, что гарантированный крионекроз тканей обеспечивается при переохлаждении до температуры ниже  $-26^{\circ}\text{C}$  [10]. Неясно насколько обосновано это утверждение, так как температура кристаллизации эвтектического раствора NaCl в воде несколько выше  $-21,2^{\circ}\text{C}$ . Для постановки теплофизической задачи СА можно использовать минимальное значение температуры, то повысит разрушающее действие криогенного фактора.

**Постановка задачи.** Определяющее влияние на эффективность использования СА оказывает выбор аппаратуры для организации локального переохлаждения [12,13]. Все известные методики СА сформировались с использованием аппаратов охлаждаемых жидким азотом. Эти аппараты просты по конструкции и относительно дешевы, благодаря этому получили распространение в XX веке. Клиническая практика СА показала, что у аппаратов с азотной системой охлаждения (АСО) имеются существенные недостатки, которые не позволяют использовать их при проведении малоинвазивных операций. Для таких операций были разработаны СА аппараты с дроссельной системой охлаждения (ДСО).

В данный момент на рынке медицинской техники в России, Японии и странах Западной Европы обозначился явный лидер продаж криохирургического оборудования – это импортные устройства, которые используют для отвода тепловой нагрузки эффект дросселирования сжатого газа [14].

Большинство современных исследований в области технологий СА связано с аппаратами, использующими ДСО. Однако полный отказ от аппаратов АСО значительно уменьшает сферу применения технологии СА, так как ДСО обладают сравнительно низкой теплоотводящей способностью. Это объясняется тем, что при дросселировании криогенных газов поглощается сравнительно мало теплоты.

Очевидно, что наибольшей теплоотводящей способностью обладают аппараты, использующие для покрытия тепловой нагрузки теплоту фазового перехода жидкого криоагента [15]. Теплота парообразования жидкого азота составляет 199 кДж/кг. Испарение 1 кг жидкого азота позволяет переохладить до температуры крионекроза около 1 кг патологической ткани. Сравнивая жидкостные аппараты с дроссельными, нужно отметить, что эти системы имеют один существенный недостаток: большой диаметр трубопровода подачи жидкого криоагента от стационарного источника в контактный теплообменник. Этот недостаток был преодолен в портативных устройствах, но из-за малой емкости источника криоагента они имеют малый ресурс и не поддаются автоматизации. Достаточно очевидна потребность в поиске новых технологических решений, способных компенсировать недостатки аппаратов с АСО.

**Методы исследования.** Принцип действия системы охлаждения аппарата для криоабляции СА поясняет схема (рис. 1).

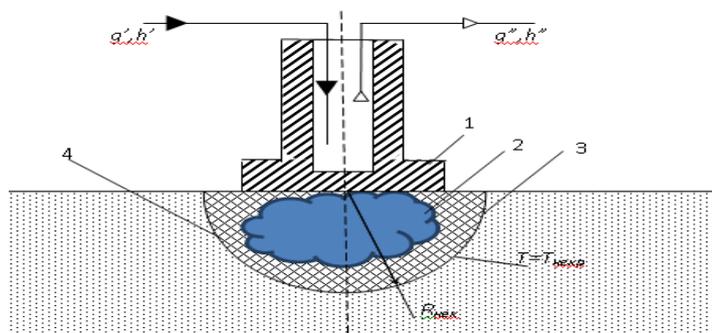


Рис. 1. Принципиальная схема азотной системы охлаждения криохирургических аппаратов  
Fig. 1. Principle diagram of the nitrogen cooling system of cryosurgical apparatus

Устройство для отвода теплоты 1, находится в тепловом контакте с объектом СА 2. Отвод теплоты от поверхности объекта 2 формирует в теле пациента изотермическую поверхность 3 с температурой равной температуре крионекроза  $T_{\text{некр}}$ .

Объем ограниченный поверхностью 3 больше объема паталогического объекта 2. Соотношение объемов  $V_2/V_3$  характеризует качество криооблации. В идеальном случае  $V_2/V_3=1$ . На практике такой результат недостижим, но так как только часть клеток в зоне ограниченной поверхностью 3 относится к объекту 2, надо стремиться к минимальному повреждению здоровых клеток.

В устройство отвода теплоты 1 подается поток жидкого азота или сжатого газа после дросселирования  $g'$ . Жидкая фракция потока  $g'$  за счет кипения отводит теплоту от устройства 1. При этом теплосодержание потока  $g'$  повышается от  $h'$  до  $h''$ . Пары рабочего вещества, поток  $g''$ , удаляются из полости устройства 1 по линии отвода паров.

Поток теплоты отведенной системой охлаждения составляет:

$$q_{SC} = g'(1 - x) \cdot r' \quad (1)$$

где  $r'$  – теплота парообразования рабочего вещества, кДж/кг,  $x$  – степень сухости потока рабочего вещества поступающего в устройство 1.

Мощность потока отводимой теплоты отводимого АСО или ДСО зависит от расхода вещества  $g'$ , степени сухости потока  $x$  и теплоты парообразования  $r'$ . Можно сравнить АСО или ДСО по этим параметрам.

Расход потока рабочего вещества  $g'$  зависит от допустимой скорости  $\omega'$ , плотности потока  $\omega'$  и площади поперечного сечения  $f$  трубопровода подачи:

$$g' = f\omega'\rho' \quad (2)$$

Допустимая скорость потоков криогенной жидкости и сжатого газа составляет 5 м/с. Плотность жидкого азота  $802 \text{ кг/м}^3$ , плотность сжатого аргона при давлении 40,0 МПа и температуре 293 К составляет  $770 \text{ кг/м}^3$ . При равной площади сечения трубопровода подачи материальный рабочий вещества в АСО и ДСО примерно одинаков.

Для потока сжатого до давления 40,0 МПа дроссельный эффект при расширении до давления 0,1 МПа равен 60 кДж/кг, а теплота парообразования аргона при давлении 0,1 МПа равна 161 кДж/кг. Минимальное расчетное значение степени сухости потока сжатого газа в ДСО:

$$x_{min} = \frac{q_T}{r'}. \quad x_{min} \geq 0,63. \quad (3)$$

Можно рассчитать удельную теплоотводящую способность для АСО и ДСО:

$$q_{SC} = (1 - x) \cdot r', \quad q_{NSC} = 199 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{с}}, \quad q_{TSC} = 60 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{с}} \quad (4)$$

Низкая степень сухости,  $x \rightarrow 0$ , обеспечивает АСО высокую теплоотводящую способность. При прочих равных условия теплоотводящая способность АСО в 3,3 раза больше аналогичного показателя ДСО.

Главная причина вытеснения аппаратов с АСО это большое сечение каналов подачи жидкости в теплоотводящее устройство. Это связано с тем, что в АСО поступает жидкий азот в состоянии насыщения. При движении по магистрали жидкость частично испаряется. Из-за малого давления потока и большой разности плотности жидкости и пара, незначительное испарение жидкости приводит к существенному снижению плотности потока. Необходимо оптимизировать процесс транспортирования жидкости по трубопроводу.

При движении криогенной жидкости по магистрали её температура увеличивается под действием теплопритока из окружающей среды и диссипативных потерь. Таким образом, возникает задача выбора параметров процесса прокачки жидкости по трубопроводам, при которой её прогрев и гидравлические сопротивления минимальны.

Для проведения исследования процесса транспортирования жидкого азота по магистралям была построена физическая (рис. 2) и математическая модели объекта исследования. На рис. 2 изображен трубопровод, разбитый на  $n$  элементарных участков.

На каждом из этих участков необходимо производить расчет: давления и температуры криоагента; теплофизических свойств криогенной жидкости ( $\rho_i$  и  $c_{pi}$  – плотность и теплоемкость на  $i$ -участке соответственно), т.к. свойства жидкости постоянно меняются в соответствии с новым состоянием; выполнять проверку условия реализации течения однофазного потока ( $T > T_s$ ), т.е. на каждом шаге необходимо вычислять температуру насыщения жидкости  $T_s$ ; огра-

значение расчета по давлению:  $p_i > p_{\text{атм}}$  – давление на  $i$ -участке должно быть больше атмосферного давления.

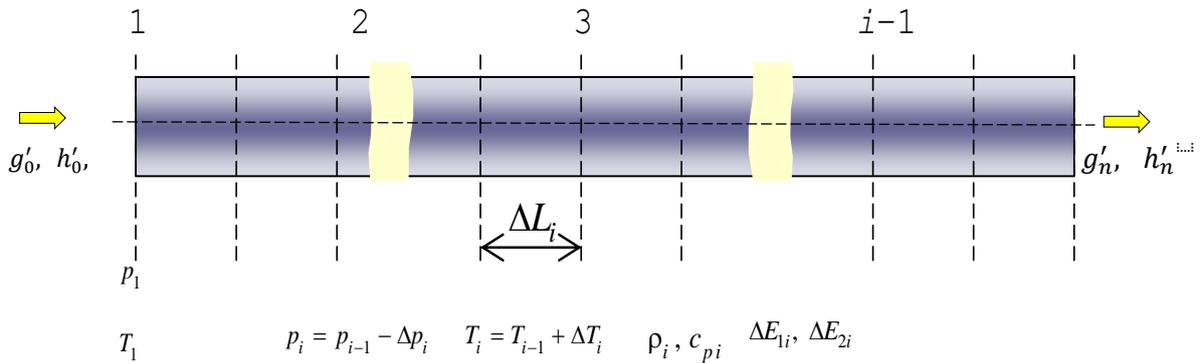


Рис.2. Физическая модель трубопровода Fig.2. Physical pipeline model

Математическая модель объекта построена на системе уравнений, которые описывают движение криогенной жидкости по магистрали [16].

Использовано уравнение движения: и неразрывности:

$$\frac{\partial(f\rho\omega)}{\partial\tau} + \omega \frac{\partial(f\rho\omega)}{\partial z} + (1 + \delta) \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

$$\frac{\partial(f\rho)}{\partial\tau} + \frac{\partial(f\rho\omega)}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Уравнение, учитывающие тепловое состояние жидкости (уравнение энергии):

$$\rho \frac{\partial h}{\partial\tau} + \omega\rho \frac{\partial h}{\partial z} + q_v = 0. \quad (7)$$

где  $f$  – площадь поперечного сечения трубы,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность криогенной жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\omega$  – скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\tau$  – время,  $\text{с}$ ;

$z$  – продольная (осевая) координата,  $\text{м}$ ;

$p$  – давление,  $\text{Па}$ ;

$\delta (\partial p / \partial z)$  – потери давления в потоке, обусловленные трением и деформированием профиля скоростей,

$q_v$  – объемный подвод теплоты из окружающей среды,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

При построении математической модели использована система уравнений, позволяющая вычислять теплофизические свойства криогенной жидкости:

$$p\nu = zRT \quad (8)$$

где  $\nu$  – удельный объем,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $R$  – удельная газовая постоянная,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – температура,  $\text{К}$ ;  $z$  – коэффициент сжимаемости:

$$z = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} B_i^* \rho^i \quad (9)$$

где  $B_i^*$  – вириальные коэффициенты, зависящие от температуры.

При аппроксимации экспериментальных данных было получено уравнение в следующем виде [17]:

$$z = 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \frac{\omega \rho^i}{\tau^j} \quad (10)$$

где  $r$  и  $s_i$  – границы изменения  $i$  и  $j$ ;  $b_{ij}$  – коэффициенты разложения;  $\tau' = T/T_{\text{кр}}$  приведенная температура,  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура,  $\text{К}$ ,  $\omega_\rho = \rho/\rho_{\text{кр}}$  – приведенная плотность, здесь  $\rho_{\text{кр}}$  – критическая плотность.

В качестве ограничений в рассматриваемой задаче выступают:

$$p_{out} = p_{in} - \sum \Delta p_i > p_e \quad (11)$$

$$T_{out} = T_{in} + \sum_i \Delta T_i < T_s \quad (12)$$

где  $p_{in}$ ,  $T_{in}$  – давление и температура на входе в криогенный трубопровод;  $p_{out}$ ,  $T_{out}$  – давление и температура на выходе из трубопровода;  $\sum \Delta p_i$  и  $\sum \Delta T_i$  – суммарные гидравлические потери и увеличение температуры по длине трубопровода;  $p_e$  – атмосферное давление.

Выбор таких ограничений позволяет исключить из рассмотрения варианты решения, в которых давления в магистрали ниже давления на выходе, так как в таком случае процесс транспортирования не возможен, и увеличения температуры криогенной жидкости до уровня температуры насыщения, так как в этом случае поток становится двухфазным, а значит – возрастает гидравлическое сопротивление трубопровода, увеличиваются потери криопродукта, и уменьшается проходное сечение трубопровода.

Кроме этого, двухфазный поток являет собой такое многообразие форм течения, которое невозможно описать единой математической моделью, так как совместное движение газа и жидкости по трубопроводу определяется распределением фаз по сечению трубы, что в свою очередь зависит от объемного содержания легкой фазы в потоке смеси, скорости течения, физических свойств обеих фаз и других факторов [18-22].

Методика численного решения основывается на переходе от дифференциалов к конечным разностям. Определяются давления  $p$  и температуры  $T$  в сечении трубопровода с заданным шагом по его длине (рис. 2). Весь трубопровод разбивается на  $n$  участков вдоль оси  $z$  и бесконечно малая величина  $dz$  заменяется конечной разностью  $\Delta z = z_{i+1} - z_i$ , где  $(i = 1 \dots n)$ . Дифференциал времени  $dt$  заменяется конечным временным шагом  $\Delta t$ .

Для решения задачи оптимизации криогенного трубопровода был выбран метод поиска Парето-оптимального решения [23-25]. Задача транспортировки криогенной жидкости по трубопроводу является многокритериальной [26]. В такого рода задачах не рекомендуется использовать только один критерий качества (стоимости, массогабаритной характеристики, производительности и т.п.), так как это приводит к серьёзному огрублению задачи и искажению результатов.

Метод поиска, так называемого Парето-оптимального решения заключается в систематическом просмотре многомерной области критериев качества с помощью последовательностей равномерно распределённых пробных точек, каждая из которых представляет собой набор параметров оптимизации [27]. Одно из достоинств данного метода – это возможность использования псевдокритериев, т.е. кроме функциональных ограничений в задачу можно добавить в рассмотрение псевдокритерий, причем его границы можно задать обосновано, основываясь на конкретных количественных характеристиках процесса. Но этот псевдокритерий не будет являться критерием, т.к. у него нет явной зависимости от качества конструкции. В роли критериев качества в данной задаче выбраны:

-мощность гидравлических потерь (Вт):

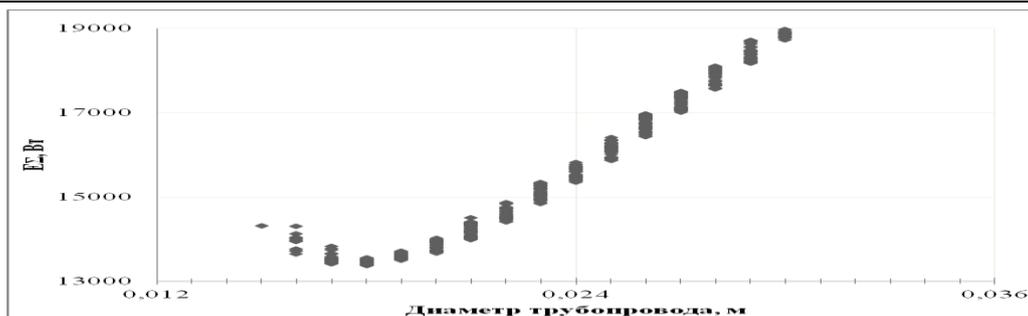
$$\Delta E_1 = \frac{\Delta p G}{\rho}, \quad (13)$$

и мощность тепловых потерь (Вт)

$$\Delta E_2 = c_p \Delta T G. \quad (14)$$

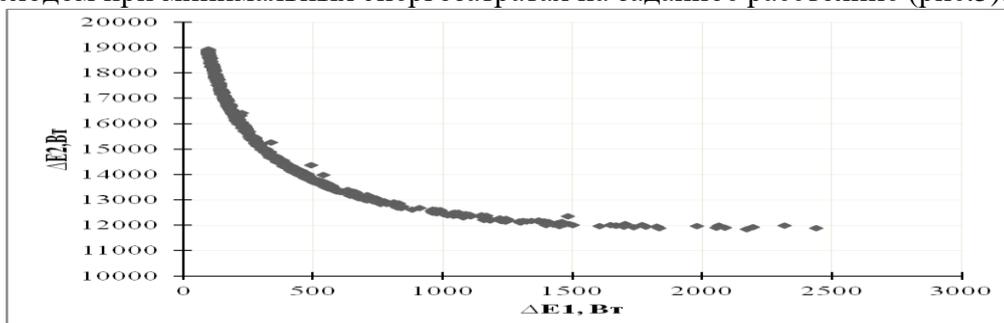
В ходе применения метода на типовых задачах было выявлено:

-существование диаметра соответствующего минимуму энергетических потерь (рис.3): выявить этот факт без проведения численного эксперимента было невозможно, т.к. в каждое из уравнений (1)–(10), явно или неявно входит диаметр трубопровода, что определяет научно-практическую ценность этого вывода и необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований;

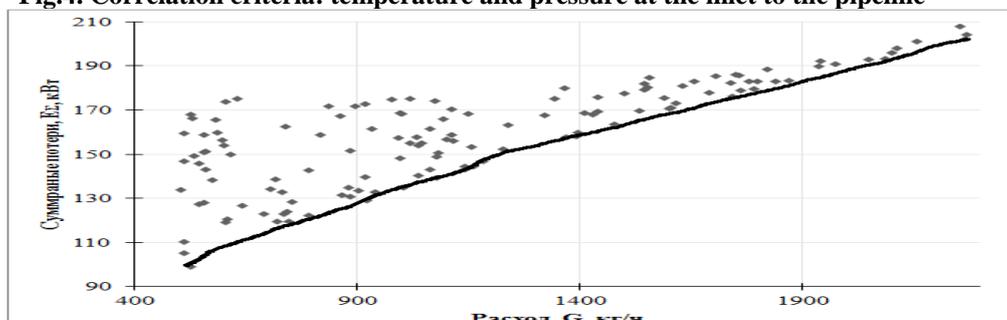


**Рис.3. Зависимость суммарных энергопотерь от диаметра трубопровода**  
**Fig.3. The dependence of the total energy loss from the diameter of the pipeline**

-температура и давления являются взаимозависимыми критериями, для исследования влияние этих критериев на величину суммарных энергопотерь был построен график корреляции критериев (рис. 4): наибольшая доля энергопотерь определяется второй составляющей – повышением температуры жидкого криопродукта при его транспортировании по магистрали;  
 -предложено, добавить в рассмотрение псевдокритерий – расход, т.е. свести решение поиска оптимальных решений к поиску компромиссной кривой, позволяющей выбирать Парето-оптимальное решение, при котором криогенная жидкость будет транспортироваться с максимальным расходом при минимальных энергозатратах на заданное расстояние (рис.5).



**Рис.4. Корреляция критериев: температуры и давления на входе в трубопровод**  
**Fig.4. Correlation criteria: temperature and pressure at the inlet to the pipeline**



**Рис. 5. Компромиссная кривая**  
**Fig. 5. Compromise curve**

Тепловая нагрузка на систему охлаждения теплоотводящего устройства аппарата для СА носит нестационарный характер и формируется за счет аккумулированного в тканях пациента запаса теплоты. Процесс переохлаждения ткани до температуры крионекроза имеет ступенчатый характер и состоит из нескольких этапов:

Переохлаждение от исходного состояния до температуры фазового перехода  $271 < T_i < 305 \text{ K}$ ,  $h_i = f(T_i)$ ;

Замораживание биологических тканей  $T_i \approx 271 \text{ K}$ ,  $\Delta h_i = -q^*$ ;

Переохлаждение тканей от температуры дефростации до температуры крионекроза  $T_{\text{нec}} < T_i < 271 \text{ K}$ ,  $h_i = f(T_i)$ ;

Переохлаждение тканей от температуры крионекроза до температуры устройства отвода теплоты  $T'' < T_i < T_{\text{нec}} 271 \text{ K}$ ,  $h_i = f(T_i)$ .

На каждом этапе выделяется некоторое количество теплоты, которое должна отвести NCS:

$$Q_{NCS} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (14)$$

Теплота переохлаждения всех участков тела от исходного состояния до минимальной температуры, которая достигается в момент завершения процедуры, может быть рассчитана с учетом значения энтальпии элементарных участков объекта в момент завершения процесса СА:

$$Q_{NCS} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \int_{r_{min}}^{r_{max}} (h_i^{305} - h_i^{\tau}) \rho_i \Delta V_i \partial r. \quad (15)$$

Используя математическую модель объекта СА в радиальных координатах и полагая, что радиус патологического объекта составляет 0,03 м, получим примерную тепловую нагрузку на NCS  $Q_{NCS} = 4700$  Дж. Полученное значение невелико, так как время отвода теплоты может быть относительно большим. Если такое количество теплоты отвести от объекта СА за 60 с, средняя мощность теплового потока к NCS составит  $q_{NCS} = 78$  Вт. Предположим, что максимальная теплоотводящая мощность NCS составляет 150 Вт. Для отвода такого потока теплоты через NCS нужно обеспечить расход жидкого азота не менее  $0,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с. В магистрали с внутренним диаметром  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м расчетная скорость потока жидкого азота составит 1,2 м/с.

Перевод жидкого азота в недогретое состояние. Жидкий азот хранится в криогенных сосудах в насыщенном состоянии. Из-за этого даже незначительный подвод теплоты приводит к испарению части жидкости.

Для подачи жидкости по магистрали с внутренним диаметром  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м необходимо перевести жидкость из насыщенного состояния в недогретое. В недогретом состоянии температура жидкости  $T'$  должна быть ниже температуры насыщения  $T''$ . Температура насыщения жидкости зависит от давления в паровом пространстве  $T'' = f(P'')$ .

Учитывая это для перехода в жидкости из насыщенного состояния в недогретое нужно либо понизить температуру жидкости за счет отвода теплоты, либо повысить давление в паровом пространстве.

Охлаждение криогенных жидкостей можно осуществлять несколькими способами: например, за счет внешнего источника холода, либо за счет испарения части криогенной жидкости при барботировании через него малорастворимого газа (гелия). Другим сравнительно простым в реализации и эффективным методом является охлаждение жидкостей путем вакуумирования парового пространства резервуара, а для выдачи охлажденной криогенной жидкости потребителю под требуемым давлением применяют два способа: выдавливание собственным паром и с помощью жидкостных насосов [28].

Необходимо отметить, что наиболее экономичным и энергоэффективным способом получения недогретой жидкости является технологическая схема, которая включает в себя механический вакуумный насос (для откачки парового пространства над зеркалом жидкости до давления около 0,06 МПа и перевода жидкости в недогретое состояние) и жидкостной насос (для выдачи недогретой криогенной жидкости под давлением потребителю) [29].

**Обсуждение результатов.** Перечисленные выше методы применимы к получению недогретой жидкости в промышленных масштабах, для решения данной задачи достаточно повысить давление в потоке жидкости направляемой в NCS при помощи жидкостного микронасоса (рис.6).

Жидкий азот 1 находится в криогенном сосуде 2. В сосуд погружен плунжерный насос 3. Плунжер насоса совершает возвратно поступательное движение и перемещает жидкий азот из сосуда 2 в магистраль 4. Жидкости давление в магистрали 4 может значительно превышать давление паров азота в сосуде 2. За счет повышения давления поток в магистрали 4 переходит в недогретое состояние. Например, при давлении в магистрали  $P_4=2,0$  МПа температура насыщения жидкого азота повысится до  $T'' = 115$  К.

Температура жидкого азота при сжатии в насосе не изменится  $T' = 78$  К. Поток жидкого азота недогрет на 37 К, это позволяет доставить жидкость до устройства отвода теплоты в

недогретом состоянии. Приток теплоты к потоку жидкости в магистрали 4 может быть компенсирован за счет теплоемкости недогретой жидкости. Теплота недогрева потока составляет:

$$Q_{un} = c_{LN} \cdot (T'' - T'), \quad Q_{un} = 74,4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (15)$$

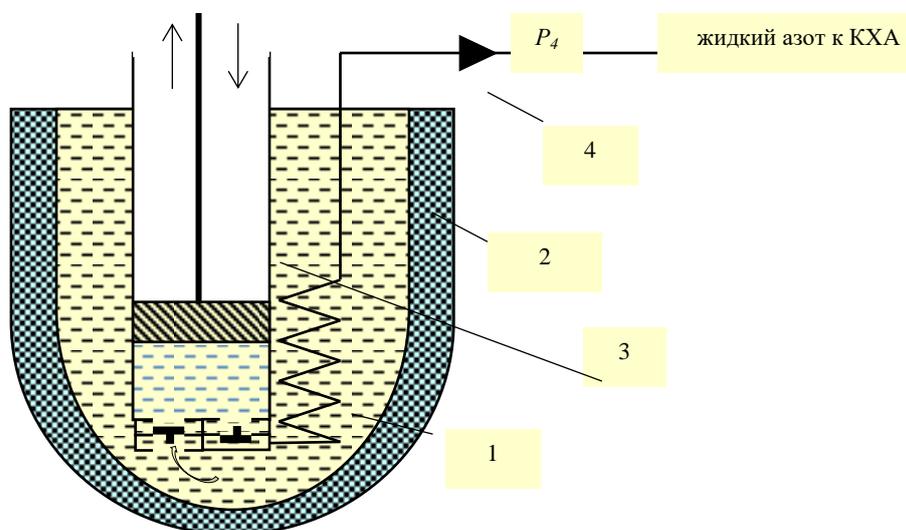


Рис. 6. Повышение давления жидкого азота с помощью плунжерного насоса  
 Fig. 6. Increasing the pressure of liquid nitrogen using a plunger pump

Теплота недогрева составляет более 30 % от теплоты парообразования азота при атмосферных условиях, что позволяет значительно упростить конструкцию теплового ограждения магистрали 4. Проведем расчет теплоотводящей способности такого устройства. Пусть подводной трубопровод не изолирован, тогда теплоприток из окружающей среды к криогенной жидкости можно определить как [30]:

$$q_{2-1} = \alpha(T_2 - T_1), \quad (16)$$

где  $T_2$ ,  $T_1$  – соответственно температура объекта охлаждения и газа – теплоносителя.

В условиях естественной конвекции величина коэффициента теплоотдачи в основном зависит от градиента температур:

$$\alpha = f(\Delta T_{2-1}) \quad (17)$$

Тогда теплоприток их окружающей среды составит:  $q_{2-1} = 15000 \text{ Вт/м}^2$ ;

Используя математическую модель, представленную уравнениями (1)–(10) получаем следующие результаты:

1. Минимальное давление в сосуде, обеспечивающее движение жидкости в однофазном состоянии по магистрали длиной 1 м составляет 0,75 МПа;
2. При таком давлении через магистраль диаметром 1 мм поддерживается расход жидкости до 6 кг/ч;
3. Теплоотводящая способность инструмента достигает 608 Вт.

Полученный результат теплоотводящей способности КХА на порядок выше характеристик серийных криохирургических инструментов, работающих с использованием жидкого азота, что свидетельствует о том, что использование недогретого криоагента обеспечивает качественное улучшение рабочих характеристик локальных криоохладителей.

**Вывод.** Снабжение АСО аппаратов для СА жидким азотом, сжатым до давления около 2 МПа, позволяет избавиться от традиционных недостатков хирургических приборов использующих жидкий азот. Диаметр магистрали подачи сжатого жидкого азота может быть уменьшен до  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, это позволяет использовать аппараты с АСО для малоинвазивных операций СА. Технология, основанная на использовании недогретого жидкого азота, вернет аппаратам с АСО их конкурентные преимущества и позволит расширить сферу применения таких приборов при проведении СА.

**Библиографический список:**

1. Sumida S. Mechanism of tissue injury in cryosurgery. In: 16th World Congress of the ISC. October 29–November 2, 2011; Hofburg, Vienna, Austria. Korpan N.N., Sumida S. (editors). Vienna: University Facultas Publisher; 2011; p. 55–56.
2. Беляев А.М., Прохоров Г.Г. Криогенные технологии в онкологии. Вопросы онкологии 2015; 61(3): 317–322.
3. Robilotto A.T., Baust J.M., Van Buskirk R.G., Gage A.A., Baust J.G. Temperature-dependent activation of differential apoptotic pathways during cryoablation in a human prostate cancer model. Prostate Cancer Prostatic Dis 2013; 16(1): 41–49, <https://doi.org/10.1038/pcan.2012.48>.
4. Xu K., Korpan N.N., Niu L. Modern cryosurgery for cancer. World Scientific Publishing; 2012, <https://doi.org/10.1142/8004>.
5. Wojciech R. The importance of cryosurgery in gynecological practice. Ginekol Pol 2011; 82(8): 618–622.
6. Govorov A.V., Vasilyev A.O., Pushkar D.U. Specifics of prostate cryoablation. Biomedical Engineering 2015; 49(1): 54–59, <https://doi.org/10.1007/s10527-015-9496-8>.
7. Berglund R.K., Jones J.S. Cryotherapy for prostate cancer. In: Interventional urology. Rastinehad A.R., Siegel D.N., Pinto P.A., Wood B.J. (editors). Springer International Publishing; 2016; p. 165–171, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23464-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23464-9_13).
8. Korpan N.N. Modern cryosurgery: present and future. In: 16th World Congress of the ISC. October 29–November 2, 2011; Hofburg, Vienna, Austria. Korpan N.N., Sumida S. (editors). Vienna: The University Publisher Facultas; 2011; p. 29–30.
9. Butorina A., Arkharov A., Matveev V. Dreams and reality of cryogenic technology in surgery. In: The 12th CRYOGENICS IIR International Conference. September 11–14, 2012; Dresden, Germany. Czech Republic; 2012; p. 467–474.
10. Erinjeri J.P., Clark T.W.I. Cryoablation: mechanism of action and devices. J Vasc Interv Radiol 2010; 21(8): S187–S191, <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2009.12.403>.
11. Шакуров А.В., Пушкарев А.В., Пушкарев В.А., Цыганов Д.И. Предпосылки для разработки нового поколения криохирургического оборудования (обзор) // Современные технологии в медицине. - 2017. Т. 9. № 2. с. 178-189.
12. Кондратенко Р.О. Разработка и создание аппаратуры для криохирургии и криотерапии: дисс. на соискание уч.степени канд.техн.наук по спец. 05.04.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 140 с.
13. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. Монография. - Москва: САЙНС-ПРЕСС, 2011 - 304 страницы.
14. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Новые технологии снабжения криохирургических инструментов жидким азотом // VIII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 15-17 ноября 2017 г.): Материалы конференции - 2017. - с. 112-114
15. Соколова Е.В. Использование недогретой криогенной жидкости для отвода теплоты от объекта криохирургического воздействия // Криотерапия в России: материалы X Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 18 мая 2017 г.) - 2018. - с. 83-88.
16. Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Расчет течения вязкой жидкости в канале с учетом изменения фазового состояния // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия - 2012. - № 4. - с. 87-91
17. Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криогенных продуктов: справочник-Санкт-Петербург: Государственный университет низких температур и пищевых технологий, 2009- 567 с.
18. Bankoff S.G. A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow// J. Heat Transfer. 1960. Vol.82, p.265-272
19. Козлов Б.К. Режимы и формы движения воздушно-водяной смеси в вертикальной трубе. Сб. «Гидродинамика и теплообмен в котлах высокого давления». Изд.АН СССР, 1955
20. Костюк В.В. Методы расчета процессов заполнения и охлаждения емкостей и магистралей криогенными жидкостями.- Новосибирск: Академия наук СССР Сибирское отделение Институт теплофизики,1990
21. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Изд-во МЭИ, 2000
22. Чисхолм Д. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ./ Великобритания.-М.:Недра,1986.-204 с.
23. Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Оптимизация криогенного трубопровода // Омский научный вестник - 2014. - № 3 (133). - с. 164-168

24. Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Решение задачи оптимизации криогенного трубопровода методом поиска Парето-оптимального решения // Вестник Международной академии холода - 2015. № 2. - с. 55-60
25. Логвиненко Е.В. Оптимизация криогенного трубопровода методом поиска Парето-оптимального решения // В сборнике: Альманах научных трудов молодых ученых Университета ИТМО-2015. - с. 110-112.
26. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.
27. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.
28. Архаров А.М., Архаров И.А., Тычкова С.О. К задаче об изменении температуры криогенных жидкостей при откачке их паров и хранении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – С. 41–45
29. Иванов В.И., Еремеев В.А. Исследование процесса получения переохлажденного сжиженного природного газа. Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 348 с.
30. Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Сидорова А.Ю. Моделирование процесса конвективного охлаждения тела на компьютере: Метод. указания для студентов спец.140401 всех форм обучения. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2011. – 38 с.

#### References:

1. Sumida S. Mechanism of tissue injury in cryosurgery. In: 16th World Congress of the ISC. October 29–November 2, 2011; Hofburg, Vienna, Austria. Korpan N.N., Sumida S. (editors). Vienna: University Facultas Publisher; 2011; p. 55–56.
2. Belyayev A.M., Prokhorov G.G. Kriogennyye tekhnologii v onkologii. Voprosy onkologii 2015; 61(3): 317–322. [Belyayev A.M., Prokhorov G.G. Cryogenic technologies in oncology. Voprosy onkologii 2015; 61(3): 317–322. (In Russ.)]
3. Robilotto A.T., Baust J.M., Van Buskirk R.G., Gage A.A., Baust J.G. Temperature-dependent activation of differential apoptotic pathways during cryoablation in a human prostate cancer model. Prostate Cancer Prostatic Dis 2013; 16(1): 41–49, <https://doi.org/10.1038/pcan.2012.48>.
4. Xu K., Korpan N.N., Niu L. Modern cryosurgery for cancer. World Scientific Publishing; 2012, <https://doi.org/10.1142/8004>.
5. Wojciech R. The importance of cryosurgery in gynecological practice. Ginekol Pol 2011; 82(8): 618–622.
6. Govorov A.V., Vasilyev A.O., Pushkar D.U. Specifics of prostate cryoablation. Biomedical Engineering 2015; 49(1): 54–59, <https://doi.org/10.1007/s10527-015-9496-8>.
7. Berglund R.K., Jones J.S. Cryotherapy for prostate cancer. In: Interventional urology. Rastinehad A.R., Siegel D.N., Pinto P.A., Wood B.J. (editors). Springer International Publishing; 2016; p. 165–171, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23464-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23464-9_13).
8. Korpan N.N. Modern cryosurgery: present and future. In: 16th World Congress of the ISC. October 29–November 2, 2011; Hofburg, Vienna, Austria. Korpan N.N., Sumida S. (editors). Vienna: The University Publisher Facultas; 2011; p. 29–30.
9. Butorina A., Arkharov A., Matveev V. Dreams and reality of cryogenic technology in surgery. In: The 12th CRYOGENICS IIR International Conference. September 11–14, 2012; Dresden, Germany. Czech Republic; 2012; p. 467–474.
10. Erinjeri J.P., Clark T.W.I. Cryoablation: mechanism of action and devices. J Vasc Interv Radiol 2010; 21(8): S187–S191, <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2009.12.403>.
11. Shakurov A.V., Pushkarev A.V., Pushkarev V.A., Tsyganov D.I. Predposylki dlya razrabotki novogo pokoleniya kriokhirurgicheskogo oborudovaniya (obzor) // Sovremennyye tekhnologii v meditsine. - 2017. T. 9. № 2. s. 178-189. [Shakurov A.V., Pushkarev A.V., Pushkarev V.A., Tsyganov D.I. Prerequisites for the development of a new generation of cryosurgical equipment (review) // Modern technologies in medicine. - 2017. V. 9. № 2. p. 178-189. (In Russ.)]
12. Kondratenko R.O. Razrabotka i sozdaniye apparatury dlya kriokhirurgii i krioterapii: diss. na soiskaniye uch.stepeni kand.tekhn.nauk po spets. 05.04.03. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2012. – 140 s. [Kondratenko R.O. Development and creation of equipment for cryosurgery and cryotherapy: Diss. for the degree of Cand.Tech.Science on spec. 04/05/03. M.: MSTU. N.E. Bauman, 2012. - 140 p. (In Russ.)]
13. Tsyganov D.I. Kriomeditsina: protsessy i apparaty. Monografiya. - Moskva: SAYNS-PRESS, 2011 - 304 stranitsy. [Tsyganov D.I. Cryomedicine: processes and devices. Monograph. - Moscow: SAINS-PRESS, 2011 - 304 pages. (In Russ.)]
14. Baranov A.YU., Sokolova Ye.V. Novyye tekhnologii snabzheniya kriokhirurgicheskikh instrumentov zhidkim azotom // VIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke» (Sankt-Peterburg, 15-17 noyabrya 2017 g.): Materialy konferentsii

- 2017. - с. 112-114 [Baranov A.Yu., Sokolova E.V. New technologies for supplying cryosurgical instruments with liquid nitrogen // VIII International Scientific and Technical Conference "Low-temperature and food technologies in the XXI century" (St. Petersburg, November 15-17, 2017): Conference materials - 2017. - с. 112-114(In Russ.)]
15. Sokolova Ye.V. Ispol'zovaniye nedogretoy kriogennoy zhidkosti dlya otvoda teploty ot ob'yekta kriokhirurgicheskogo vozdeystviya // Krioterapiya v Rossii: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 18 maya 2017 g.) - 2018. - s. 83-88. [Sokolova E.V. The use of underheated cryogenic liquid for removal of heat from the object of cryosurgical effects // Cryotherapy in Russia: materials of the X International Scientific Practical Conference (St. Petersburg, May 18, 2017) - 2018. - p. 83-88. (In Russ.)]
  16. Zaytsev A.V., Logvinenko Ye.V. Raschet techeniya vyazkoy zhidkosti v kanale s uchetom izmeneniya fazovogo sostoyaniya // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika. Astronomiya - 2012. - № 4. - s. 87-91 [Zaitsev A.V., Logvinenko E.V. Calculation of the flow of a viscous fluid in the channel taking into account changes in the phase state // Bulletin of St. Petersburg University. Series 1. Mathematics. Mechanics. Astronomy - 2012. - № 4. - p. 87-91(In Russ.)]
  17. Akulov L.A., Borzenko Ye.I., Zaytsev A.V. Teplofizicheskiye svoystva i fazovoye ravnesiye kriogennykh produktov: spravochnik-Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet nizkikh temperatur i pishchevykh tekhnologiy, 2009- 567 s [Akulov L.A., Borzenko E.I., Zaitsev A.V. Thermophysical properties and phase equilibrium of cryogenic products: Handbook, St. Petersburg: State University of Low Temperatures and Food Technologies, 2009- 567 p. (In Russ.)]
  18. Bankoff S.G. A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow// J. Heat Transfer. 1960. Vol.82, p.265-272
  19. Kozlov B.K. Rezhimy i formy dvizheniya vozdukhovodyanoy smesi v vertikal'noy trube. Sb. «Gidrodinamika i teploobmen v kotlakh vysokogo davleniya». Izd.AN SSSR, 1955 [Kozlov B.K. Modes and forms of movement of the air-water mixture in a vertical pipe. Sat "Hydrodynamics and heat transfer in high-pressure boilers." Ed.AN USSR, 1955. (In Russ.)]
  20. Kostyuk V.V. Metody rascheta protsessov zapolneniya i okhlazhdeniya yemkostey i magistralei kriogennymi zhidkostyami.- Novosibirsk: Akademiya nauk SSSR Sibirskoye otdeleniye Institut teplofizi-ki,1990 [Kostyuk V.V. Methods for calculating the processes of filling and cooling of tanks and highways with cryogenic liquids.- Novosibirsk: USSR Academy of Sciences Siberian Branch of the Institute of Thermal Physics, 1990(In Russ.)]
  21. Labuntsov D.A. Fizicheskiye osnovy energetiki. Izbrannyye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamike. M.: Izd-vo MEI, 2000 [Labuntsov D.A. Physical basis of energy. Selected works on heat transfer, fluid dynamics, thermodynamics. M.: MEI, 2000 (In Russ.)]
  22. Chisholm D. Dvukhfaznyye techeniya v truboprovodakh i teploobmennikakh: Per. s ang./ Velikobritaniya.-M.:Nedra,1986.-204 s. [Chisholm D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers: Trans. from English / United Kingdom. -M.: Nedra, 1986. - 204 p. (In Russ.)]
  23. Zaytsev A.V., Logvinenko Ye.V. Optimizatsiya kriogennoy truboprovoda // Omskiy nauchnyy vestnik - 2014. - № 3 (133). - с. 164-168 [Zaitsev A.V., Logvinenko E.V. Optimization of the cryogenic pipeline // Omsk Scientific Herald - 2014. - № 3 (133). - p. 164-168 (In Russ.)]
  24. Zaytsev A.V., Logvinenko Ye.V. Resheniye zadachi optimizatsii kriogennoy truboprovoda metodom poiska Pareto-optimal'nogo resheniya // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda - 2015. № 2. - s. 55-60 [Zaitsev A.V., Logvinenko E.V. Solving the problem of optimizing a cryogenic pipeline using the Pareto optimal solution search // Bulletin of the International Academy of Refrigeration - 2015. No. 2. - p. 55-60 (In Russ.)]
  25. Logvinenko Ye.V. Optimizatsiya kriogennoy truboprovoda metodom poiska Pareto-optimal'nogo resheniya // V sbornike: Al'manakh nauchnykh trudov molodykh uchenykh Universiteta ITMO-2015. - s. 110-112. [Logvinenko E.V. Optimization of the cryogenic pipeline using the Pareto-optimal solution search // In collection: Almanac of scientific works of young scientists of ITMO-2015 University. - p. 110-112. (In Russ.)]
  26. Sobol' I.M., Statnikov R.B. Vybora optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami. - M.: Nauka, 1981. - 111 s. [Sobol' I.M., Statnikov R.B. The choice of optimal parameters in problems with many criteria. - M.: Science, 1981. - 111 p. (In Russ.)]
  27. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nyye resheniya mnogokriterial'nykh zadach. - M.: Nauka, 1982. [Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto optimal solutions for multicriteria problems. - M.: Science, 1982. (In Russ.)]
  28. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Tychkova S.O. K zadache ob izmenenii temperatury kriogennykh zhidkostey pri otkachke ikh parov i khraneniya // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye. - 2010. - S. 41-45 [Arkharov A.M., Arkharov I.A., Tychkova S.O. On the problem of changing the temperature of cryogenic liquids when pumping out their vapors and storing // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Engineering. - 2010. - P. 41-45(In Russ.)]

29. Ivanov V.I., Yeremeyev V.A. Issledovaniye protsessa polucheniya pereokhlazhdenogo szhizhennogo prirodnogo gaza. Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO. Tom 1. – SPb.: Universitet ITMO, 2017. – 348 s. Ivanov V.I., Yeremeyev V.A. Issledovaniye protsessa polucheniya pereokhlazhdenogo szhizhennogo prirodnogo gaza. Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO. Tom 1. – SPb.: Universitet ITMO, 2017. – 348 s. Ivanov V.I., Ereemeev V.A. Study of the process of obtaining supercooled liquefied natural gas. Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University. Volume 1. - SPb .: ITMO University, 2017. - 348 p. (In Russ.)]
30. Baranov A.YU., Malysheva T.A., Sidorova A.YU. Modelirovaniye protsessa konvektivnogo okhlazhdeniya tela na komp'yutere: Metod. ukazaniya dlya studentov spets.140401 vsekh form obucheniya. – SPb.: SPbGUNIPT, 2011. – 38 s. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Sidorova A.Yu. Simulation of the process of convective body cooling on a computer: Method. instructions for students of special. 140401 of all forms of education. - SPb .: SPbGUNIPT, 2011. - 38 p. (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Глушаев Алексей Владимирович** - аспирант факультета низкотемпературной энергетики.

**Замарашкина Вероника Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, тьютор факультета низкотемпературной энергетики

**Мальшева Татьяна Алексеевна** - кандидат технических наук, доцент, доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники.

**Соколова Екатерина Владимировна** - старший преподаватель факультета низкотемпературной энергет

тики.

**Information about the authors:**

**Aleksey V. Glushaev**- Graduate student, Faculty of Cryogenic Engineering.

**Veronika N. Zamarashkina**- Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Tutor at the Faculty of Cryogenic Engineering.

**Malysheva Tatyana Alekseevna**- Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Assoc. Prof. at the Faculty of Software Engineering and Computer Engineering.

**Ekaterina V. Sokolova**- Senior Lecturer at the Faculty of Cryogenic Engineering.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 14.01.2019.

**Received** 14.01.2019.

Принята в печать 15.02.2019.

**Accepted for publication** 15.02.2019.

**Для цитирования:** Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А., Насрулаев А.М. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (1): 32-41. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-32-41

**For citation:** Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispahov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M. Thermoelectric system for extraction of foreign objects from human body. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 32-41. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-32-41

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-32-41

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Евдулов О.В.<sup>1</sup>, Магомедова С.Г.<sup>3</sup>, Миспахов И.Ш.<sup>2</sup>, Набиев Н.А.<sup>4</sup>, Насрулаев А.М.<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1-5</sup> 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru., <sup>2</sup> e-mail: igram.mispahov@yandex.ru,

<sup>3</sup> e-mail: saratmag05@yandex.ru., <sup>4</sup> e-mail: alternativa9372@mail.ru,

<sup>5</sup> e-mail: nasrulaevam @ yandex.ru

**Резюме. Цель.** Целью статьи является рассмотрение конструкции термоэлектрической системы (ТЭС) для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания, а также моделирование процессов теплообмена в ней. **Метод.** Предложена конструкция и физическая модель системы для извлечения инородных объектов из тела человека, в которой источником холода является термоэлектрический модуль (ТЭМ), размещенный на специальном механическом приспособлении, выполненном в виде зонда, обеспечивающего также съём теплоты с горячих спаев модуля. Разработана математическая модель ТЭС, реализованная на основе решения задачи о росте слоя льда с использованием метода решения нестационарного дифференциального уравнения Фурье, представленного в частных производных путем приведения его к уравнению с полными производными на основе использования расширенной версии подстановки Ламе-Клапейрона, и представления решения в виде степенного ряда, который описывает распределение температур в слое намораживаемого льда и удовлетворяет краевым условиям задачи. **Результат.** Получены данные об изменении температуры извлекаемого объекта и толщины слоя льда во времени при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ. Установлено, что продолжительность образования слоя льда между извлекаемым объектом и холодной поверхностью ТЭМ, являющимся исполнительным элементом системы, находится в небольших пределах, удовлетворяющих медицинским нормам, при этом скорость протекания процесса роста льда зависит от его мощности (увеличение холодопроизводительности ТЭМ с 1000 до 3000 Вт/м<sup>2</sup> снижает продолжительность образования слоя льда, толщиной 2 мм практически на 40 с, при этом температура извлекаемого объекта снижается с 269 К до 252 К). Указано, что подбор геометрических параметров ТЭМ и тока его питания должен ориентироваться на ограничения по эксплуатации прибора, а также медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилежащих тканей. **Вывод.** Предложен способ повышения эффективности системы, согласно которому используется предварительное охлаждение ТЭС внешним источником холода, а также применением форсированных режимов работы ТЭМ.

**Ключевые слова:** извлечение инородных объектов, примораживание, термоэлектрическая система, моделирование, теплофизические процессы, расчет

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THERMOELECTRIC SYSTEM FOR EXTRACTION OF FOREIGN OBJECTS  
FROM HUMAN BODY

Oleg V. Evdulov<sup>1</sup>, Sarat G. Magomedova<sup>3</sup>, Igramidin Sh. Mispahov<sup>3</sup>, Nabi A. Nabiyev<sup>4</sup>, Abdula M. Nasrulaev

<sup>1-5</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1-5</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru., <sup>2</sup>e-mail: igram.mispahov@yandex.ru

<sup>3</sup>e-mail: saratmag05@yandex.ru., <sup>4</sup>e-mail: alternativa9372@mail.ru,

<sup>5</sup>e-mail: nasrulaevam @ yandex.ru

**Abstract Objectives** The purpose of the article is to examine the design of the thermoelectric system (TPP) for the extraction of foreign objects from the human body by the method of freezing, as well as the simulation of heat transfer processes in it. **Method.** A design and a physical model of the system for the extraction of foreign objects from the human body are proposed, in which the source of cold is a thermoelectric module (TEM) placed on a special mechanical device made in the form of a probe, which also provides removal of heat from the hot junctions of the module. A mathematical model of thermal power plants was developed, implemented on the basis of solving the problem of ice layer growth using the method of solving the non-stationary Fourier differential equation, presented in partial derivatives by reducing it to an equation with full derivatives based on the use of an extended version of the Lamé-Clapeyron substitution, and power series, which describes the temperature distribution in the frozen ice layer and satisfies the boundary conditions of the problem. **Result.** Data were obtained on the change in temperature of the extracted object and the thickness of the ice layer over time at various values of the cooling capacity of TEM. It is established that the duration of the formation of an ice layer between the object to be extracted and the cold surface of the TEM, which is the executive element of the system, is within narrow limits that meet medical standards, while the speed of the ice growth process depends on its thickness (increasing the cooling capacity of the TEM from 1000 to 3000 W / m<sup>2</sup> reduces the duration of the formation of an ice layer, 2 mm thick, by almost 40 s, while the temperature of the extracted object decreases from 269 K to 252 K). It is indicated that the selection of geometric parameters of TEM and its power supply should focus on the limitations on the operation of the device, as well as medical norms and standards in order to avoid the process of frostbite of the adjacent tissues. **Conclusion.** A method is proposed for increasing the efficiency of the system, according to which the preliminary cooling of the TPP by an external source of cold is used, as well as the use of forced TEM operation modes.

**Keywords:** removal of foreign objects, freezing, thermoelectric system, modeling, thermal processes, calculation

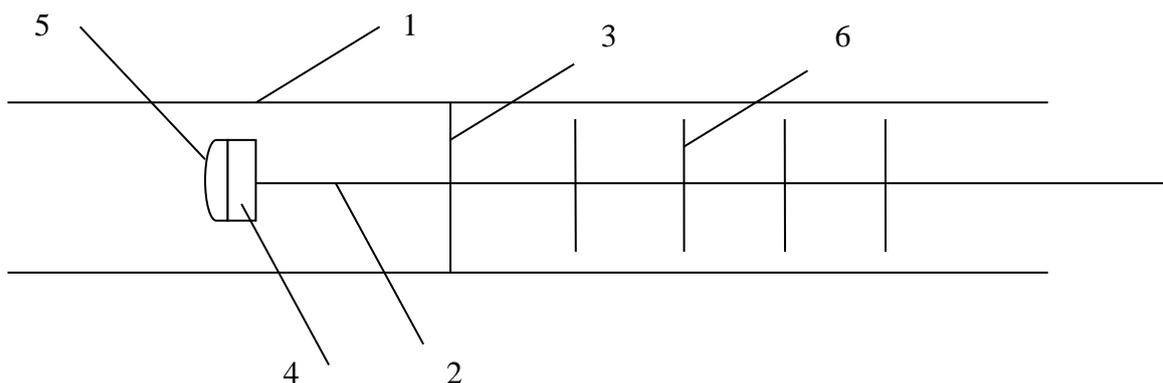
**Введение.** Одним из главных аспектов сохранения жизни и здоровья человека при той или иной чрезвычайной ситуации является оперативное и своевременное хирургическое вмешательство, которое в большинстве случаев включает в себя оперативное удаление инородных объектов из тела [1-3]. Данное обстоятельство определяется тем фактом, что попадание в тело человека инородных объектов вызывает дискомфорт, болезненные ощущения и в будущем может привести к воспалительному процессу, заражению и нагноению. Отдельного внимания заслуживают поражения человека при его ранении с оставшимися в ране частями пуль, шрапнели, осколками гранат, сколами холодного оружия и т.д. Наличие на перечисленных объектах микрофлоры приводит также к заражению, нагноению и некрозу ткани [4-7]. Поэтому разработка технических средств и процедур, связанных с извлечением инородных объектов из тела человека, является актуальной и практически значимой. В настоящее время для проведения операций по извлечению инородных объектов из тела человека используются механические приспособления (пинцеты, щипцы, иглы различной конфигурации и т.п.). К ним на сегодняшний день можно отнести такие технические средства, как щипцы типа BLAKESLEY,

STRUYSKEN, TAKANASHI (производитель ООО "НПФ ЭлМед", Россия), биопсийные щипцы и захваты PolyGrab (производитель компания Olympus, Япония), захваты и экстракторы компаний Medi-Globe GmbH (Германия), Gebrueder Zepf Medizintechnik GmbH & Co. (Германия), инструменты для эндохирургии компании RICHARD WOLF GmbH (Германия), щипцы, иглы и экстракторы компаний Hunan Injection High Technology Co., Ltd. (Китай), Jiangsu ATE Medical Technology Co., Ltd. (Китай), хирургические инструменты для извлечения инородных объектов компаний Changzhou JIUHONG Medical Instrument Co., Ltd. (Китай), Wilson Instruments Co. Ltd.» (Гонконг), захватные приспособления компании Mobile Instrument Svc, Co. (США). Использование данных механических приспособлений для извлечения инородных объектов из тела человека приводит к дополнительным повреждениям зон, контактирующих с инородным объектом, что добавляет болезненные ощущения при проведении процедур по их извлечению. Кроме этого, недостаточна вероятность успешного итога процесса извлечения инородного тела - возможно соскальзывание технического средства с объекта, сложность или невозможность его захвата, что сказывается на продолжительности и болезненности процедуры.

Поэтому представляет интерес разработка таких приспособлений и методик извлечения инородных объектов из тела человека, которые бы минимизировали дополнительные повреждения при их извлечении, а также болезненные ощущения, сопровождающие этот процесс. Перспективным является использование методики фиксации инородного объекта к зонду путем примораживания с использованием в качестве исполнительного элемента (охладителя) ТЭМ [8-10]. Применение такого технического средства даст возможность устранить указанные недостатки за счет преимуществ термоэлектрических средств примораживания (надежности и прочности сцепления, компактности, независимости от ориентации в пространстве, экологичности, возможности реверса теплового потока и др.), а также конструкционных и технологических мер по обеспечению эффективности, комфортности и безболезненности процедур, связанных с извлечением инородных объектов из тела человека [11-17].

**Постановка задачи.** Целью статьи является рассмотрение конструкции ТЭС для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания, а также моделирование процессов теплообмена в ней.

**Методы исследования.** Структурная схема ТЭС представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Структурная схема ТЭС для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания**

**Fig. 1. Structural scheme of thermal power plants to extract foreign objects from the human body by the method of freezing**

Прибор содержит манипулятор, изготовленный в виде полой трубки 1 из материала с низкой теплопроводностью (например, пластмасс, используемых в медицине), которая в общем случае может быть выполнена гибкой. Внутри трубки 1 размещен металлический стержень 2, который с помощью направляющих 3 может перемещаться по длине трубки 1. На торцевой поверхности стержня 2, обращенной к извлекаемому объекту, закреплен ТЭМ 4, на рабочую поверхность которой для лучшего сцепления с извлекаемыми объектами может быть нанесено губчатое вещество 5, перед процедурой смачиваемое жидкостью. Стержень 2, выполняющий также функции теплосъема с опорной поверхности ТЭМ 4 в радиальном направлении по отношению к трубке 1 может иметь ребрение 6.

Перед началом процедуры отдельные части системы тщательно дезинфицируются. Стержень 2 приводится в положение, при котором рабочая поверхность ТЭМ 4 будет максимально удалена от объекта, подлежащего к извлечению.

Затем прибор вводится в зону поражения в случае ранения человека, либо в естественное отверстие в случае извлечения инородных тел, например из носа, горла и т.п., на требуемую глубину так, чтобы стенки трубки 1 располагались на глубине, несколько большей расположения верхней поверхности инородного объекта.

Далее путем перемещения металлического стержня 2 по направляющим 3 рабочая поверхность ТЭМ 4 через губчатое вещество 5 приводится в соприкосновения с извлекаемым объектом. При подаче на ТЭМ 4 тока соответствующей полярности происходит примерзание объекта к его рабочей поверхности. Непосредственно извлечение инородного тела осуществляется путем перемещения металлического стержня 2 в обратном направлении. Ребрение 6 стержня 2 увеличивает эффективность теплосъема с опорного спая ТЭМ 4. Примораживание извлекаемого объекта требует изучения процесса образования льда на его контакте с холодными спаями (поверхностью) ТЭМ. Схема льдообразования рассмотрена на рис. 2.

Здесь  $x$  - пространственная координата,  $T_{ТЭМ}$  - температура холодной поверхности ТЭМ,  $T_{\phi}$  - температура фазового перехода воды в лед,  $T_o$  - температура в полости человека.

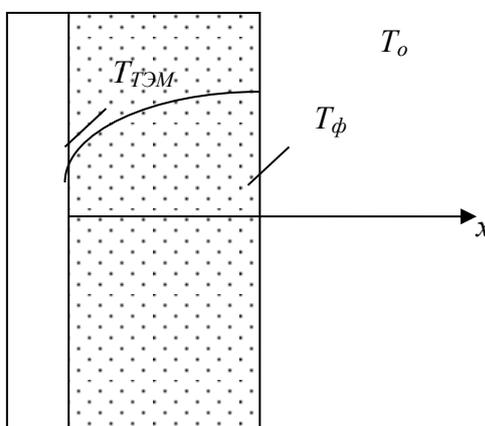


Рис. 2. Схема образование льда на поверхности извлекаемого объекта  
Fig. 2. Scheme of the formation of ice on the surface of the extracted object

В основе подхода лежит метод решения нестационарного дифференциального уравнения Фурье, представленного в частных производных путем приведения его к уравнению с полными производными на основе использования расширенной версии подстановки Ламе-Клапейрона, и представления решения в виде степенного ряда, который описывает распределение температур в слое намораживаемого льда и удовлетворяет крайним условиям задачи [18]. Для случая намораживания водного льда на плоской поверхности исходное дифференциальное уравнение Фурье имеет вид:

$$C_p(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где  $C_p(T)$  - удельная теплоемкость водного льда, зависящая от температуры Дж/(кг·К);  $\tau$  - время, с;  $x$  - пространственная координата, м;  $\rho$  - плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  - температура в слое намороженного льда. К;  $\lambda(T)$  - теплопроводность водного льда, зависящая от температуры; Вт/(м·К).

Краевые условия задачи записываются:

$$\begin{aligned} T(0, \tau) &= T_{ТЭМ} \\ T(x, 0) &= T_o \\ T(\xi, \tau) &= T_\phi. \end{aligned}$$

Условие теплового воздействия со стороны тела человека:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \alpha(T_o - T_\phi) + \rho L \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (2)$$

Применим к уравнению (1) подстановку Ламе-Клапейрона, т.е. будем искать выражение в виде:

$$T(x, \tau) = T(v), \quad v = \frac{x}{\sqrt{\tau}}, \quad \xi = \beta\sqrt{\tau}.$$

Результирующее уравнение для определения динамики роста слоя водного льда на поверхности плоской стенки с учетом зависимости теплофизических свойств льда от температуры:

$$\begin{aligned} T_{ТЭМ} &= T_\phi \left( \frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha(T_o - T_\phi)}{\lambda} \sqrt{\tau} \right) \beta + \left( \frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha(T_o - T_\phi)}{\lambda} \sqrt{\tau} \right)^2 \frac{\beta^2}{2T_\phi} - \\ &\frac{\rho C_1 T_\phi^2}{2K} \beta^3 \left( \frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha(T_o - T_\phi)}{\lambda} \sqrt{\tau} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности льда, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  - фактор роста толщины слоя льда, м/с<sup>0,5</sup>;  $\tau$  - время, с;  $L$  - теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг,  $C_1=7,97$  - размерная константа, Дж/кг·К,  $K=615,34$  - размерная константа, Вт/м [19].

Для определения искомой толщины слоя льда  $\xi$ , на заданный промежуток времени  $\tau$  необходимо из уравнения (3) найти значение фактора роста слоя льда  $\beta$ , умножение которого на квадратный корень от времени  $\sqrt{\tau}$  дает значение  $\xi$  т.е.

$$\xi = \beta\sqrt{\tau}$$

Окончательно

$$\xi = \frac{\alpha(T_o - T_\phi)}{\rho L} \tau + \frac{\lambda}{\rho L} \sqrt{\left( \frac{\alpha(T_o - T_\phi)}{\lambda} \tau \right)^2 - \frac{2\rho L(T_{ТЭМ} - T_\phi)}{\lambda} \tau}.$$

**Обсуждение результатов.** По разработанной модели, описываемой уравнениями (1)-(3) произведен численный эксперимент. Исходными данными являлись [20, 21]: температура в полости человека,  $T_o=310$  К; температура холодной поверхности ТЭМ,  $T_{ТЭМ}=250$  К; температура фазового перехода воды в лед,  $T_\phi=273$  К; толщина льда между извлекаемым объектом и холодной поверхностью ТЭМ для их прочного сцепления - 2 мм; теплофизические характеристики объектов и ТЭМ взяты из справочных данных [3, 8] для свинца (извлекаемый объект) и параметров человеческого организма.

Для прочного смораживания поднимаемого объекта с поверхностью ТЭМ должны соблюдаться следующие условия: температура поверхности извлекаемого объекта должна быть

ниже температуры кристаллизации воды, при этом необходимо полное промораживание поверхности извлекаемого объекта к поверхности ТЭМ для обеспечения их надежного сцепления. Получены данные об изменениях температуры извлекаемого объекта и толщины слоя льда во времени при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ. Они интерпретированы и представлены в виде графиков на рис.3 и 4.

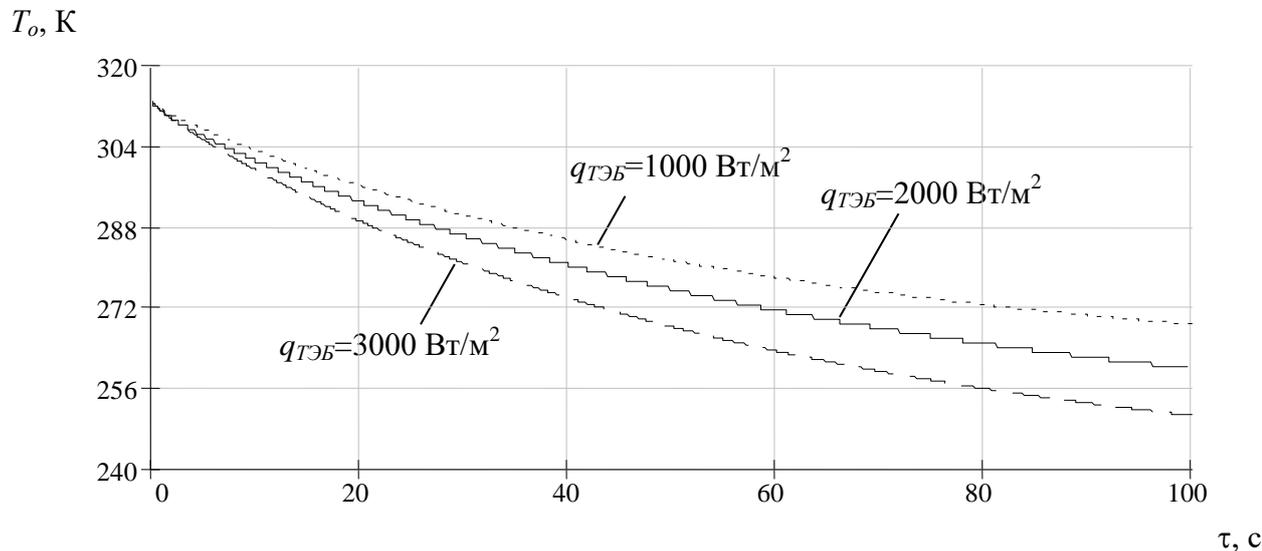


Рис. 3. Зависимость изменения температуры извлекаемого объекта от времени при различной холодопроизводительности ТЭМ  
Fig. 3. Dependence of temperature change of the extracted object on time at different cooling capacities of TEM

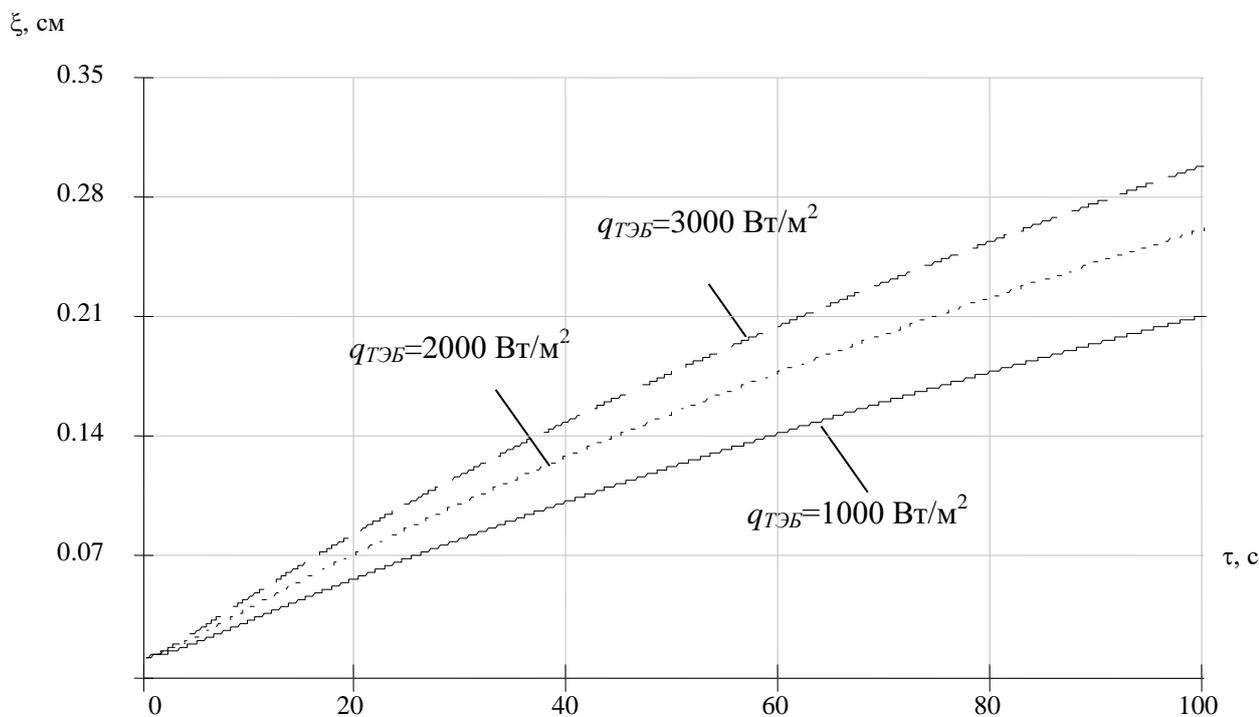


Рис. 5. Зависимость изменения толщины слоя льда от времени при различной холодопроизводительности ТЭМ  
Fig. 5. Dependence of the change in the thickness of the ice layer on time at different cooling capacities of TEM

По результатам найденных величин холодопроизводительности ТЭМ определяются ее электрические и геометрические параметры в соответствии со стандартными методиками расчета, изложенными, например, в [9].

В результате численного эксперимента установлено, что продолжительность образования слоя льда между извлекаемым объектом и холодной поверхностью ТЭМ находится в небольших пределах, удовлетворяющих медицинским нормам [5]. При этом скорость протекания процесса роста льда сильно зависит от мощности ТЭМ.

Так, увеличение холодопроизводительности модуля с 1000 до 3000 Вт/м<sup>2</sup> снижает продолжительность образования слоя льда, толщиной 2 мм практически на 40 с, при этом температура извлекаемого объекта снижается с 269 К до 252 К.

Данное обстоятельство очевидно, так как увеличение интенсивности охлаждения извлекаемого объекта ТЭМ приводит у ускорению процесса образования льда и увеличению его слоя.

При этом одновременно с увеличением мощности ТЭМ растет и значение его тока питания, а также габаритные размеры, что при существующих ограничениях, накладываемых условиями эксплуатации прибора, существенно влияет на его работу и конструктивное исполнение.

В случае увеличения тока питания требуется обеспечение надежного отвода теплоты от горячих спаев ТЭБ, при этом использование воздушного радиатора не всегда может быть эффективным.

В случае же увеличения габаритных размеров ТЭМ могут возникнуть сложности в механическом доступе к извлекаемому объекту, либо необходимым будет являться использование различного рода насадок на ТЭМ, увеличивающих тепловое сопротивление между холодной поверхностью последнего и объектом.

Данное обстоятельство также следует учитывать при конструкторских расчетах прибора.

Здесь также следует отметить некоторые ограничения по величине холодопроизводительности ТЭМ и температуры его холодной поверхности относительно продолжительности примораживания объекта.

Так, по медицинским стандартам [11] продолжительность охлаждения любой зоны человеческого организма до величины примерно при 265-267 К не должна превышать 5-6 мин. В этих условиях при подборе ТЭМ и тока ее питания следует ориентироваться на данные нормативы во избежание процесса обморожения прилежащих к извлекаемому объекту тканей.

Указанные обстоятельство можно учесть, используя предварительное охлаждение системы внешним источником холода (до проведения процедур), а также применяя форсированные режимы работы ТЭМ.

Например, до проведения процедур включая модуль в режиме максимальной холодопроизводительности, а затем, во время процесса извлечения инородного объекта из тела человека, переключая его в режим максимального холодильного коэффициента.

**Вывод.** В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. В настоящее время в практике оказания первой медицинской помощи, связанной с извлечением инородных объектов из тела человека эффективным является использование методики фиксации инородного объекта к зонду путем примораживания с использованием в качестве исполнительного элемента (охладителя) ТЭМ.

2. Предложена конструкция и физическая модель системы для извлечения инородных объектов из тела человека, в которой источником холода в котором является термоэлектрический модуль, размещенный на специальном механическом приспособлении, выполненным в виде зонда, обеспечивающего также съём теплоты с горячих спаев модуля.

3. Разработана математическая модель ТЭС, реализованная на основе решения задачи о росте слоя льда с использованием метода решения нестационарного дифференциального уравнения Фурье, представленного в частных производных путем приведения его к уравнению с полными производными на основе использования расширенной версии подстановки Ламе-Клапейрона, и представления решения в виде степенного ряда, который описывает распределе-

ние температур в слое намораживаемого льда и удовлетворяет краевым условиям задачи.

4. В результате численного эксперимента получены данные об изменении температуры извлекаемого объекта и толщины слоя льда во времени при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ.

5. Установлено, что продолжительность образования слоя льда между извлекаемым объектом и холодной поверхностью ТЭМ находится в небольших пределах, удовлетворяющих медицинским нормам, при этом скорость протекания процесса роста льда сильно зависит от мощности ТЭМ.

Увеличение холодопроизводительности ТЭМ с 1000 до 3000 Вт/м<sup>2</sup> снижает продолжительность образования слоя льда, толщиной 2 мм практически на 40 с, при этом температура извлекаемого объекта снижается с 269 К до 252 К).

6. Указано, что подбор геометрических параметров ТЭМ и тока его питания должен ориентироваться на ограничения по эксплуатации прибора, а также медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилежащих тканей.

7. Предложен способ повышения эффективности системы, согласно которому используется предварительное охлаждение ТЭС внешним источником холода, а также применением форсированных режимов работы ТЭМ.

#### **Библиографический список:**

1. Корнеев А. Первая медицинская помощь. Донецк: БАО. - 2013. - 240 с.
2. Первая медицинская помощь: Справочник / Под общ. ред. В. М. Баршая и Л. В. Димитровой. Ростов на Дону: Феникс. - 2001. - 346 с.
3. Левчук И.П., Третьяков Н.В. Медицина катастроф. - М.: ГЭОТАР-Медиа. -2011. - 246 с.
4. Сапин М. Р. Анатомия и физиология человека. М.: Просвещение. - 2000. – 256 с.
5. Глыбочко П.В., Николаенко В.Н. и др. Первая медицинская помощь: Учебник. Москва: Академия. - 2013. - 305 с.
6. Яромич И.В. Скорая и неотложная медицинская помощь. Минск: Вышэйшая школа. - 2010. - 289 с.
7. Неотложная хирургия органов брюшной полости / Под ред. В.В. Леватовича. М.: ГЭОТАР-Медиа. - 2007. - 247 с.
8. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества. - 2003. - 376 с.
9. Заяков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. - Одесса: Политехперіодика, 2009. - 175 с.
10. Sennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - vol. 65. - pp. 698-726.
11. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. 2007. №2. С. 21-29.
12. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. 2009. № 7. С. 14-19.
13. Sennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - №65.
14. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. – 2012.
15. Такенобу Кадзикава, Риодзи Фунаками Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии // Термоэлектричество. - 2016. - № 1. - С. 4-11.
16. Шучитангшу Чаттерджи Термоэлектричество по индийскому сценарию // Термоэлектричество. – 2016. - №6. - С. 7-15.
17. Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. Приборы для локального температурного воздействия на человеческий организм // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, Новочеркасск. - 2003. - №2. - С. 3-6.
18. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа. - 1967. - 600 с.
19. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат. - 1991.
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Магоматов Р.А.-М. Математическая модель термоэлектрической системы для локального теплового воздействия на руку человека // Термоэлектричество. - 2014. - № 1.
21. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Рагимова Т.А. Исследование термоэлектрической системы для локального замораживания тканей гортани // Термоэлектричество. 2015. № 2.

## References:

1. Korneyev A. Pervaya meditsinskaya pomoshch'. Donetsk: BAO. - 2013. - 240 s. [Korneev A. First aid. Donetsk: BAO. - 2013. - 240 p. (In Russ.)]
2. Pervaya meditsinskaya pomoshch': Spravochnik / Pod obshch. red. V. M. Barshaya i L. V. Dimitrovoy. Rostov na Donu: Feniks. - 2001. - 346 s. [First Aid: a Handbook / Pod obshch. ed. V.M. Barshay and L.V. Dimitrova. Rostov on Don: Phoenix. - 2001. - 346 p. (In Russ.)]
3. Levchuk I.P., Tret'yakov N.V. Meditsina katastrof. - M.: GEOTAR-Media. -2011. - 246 s [Levchuk I.P., Tret'yakov N.V. Emergency Medicine. - M.: GEOTAR-Media. -2011. - 246 s. (In Russ.)]
4. Sapin M. R. Anatomiya i fiziologiya cheloveka. M.: Prosveshcheniye. - 2000. - 256 s. [Sapin MR Anatomy and human physiology. M.: Enlightenment. - 2000. - 256 p. (In Russ.)]
5. Glybochko P.V., Nikolayenko V.N. i dr. Pervaya meditsinskaya pomoshch': Uchebnik. Moskva: Akademiya. - 2013. - 305 s. [Glybochko P.V., Nikolaenko V.N. and others. First Aid: A Textbook. Moscow: Academy. - 2013. - 305 s. (In Russ.)]
6. Yarovich I.V. Skoraya i neotlozhnaya meditsinskaya pomoshch'. Minsk: Vysheyshaya shkola. - 2010. - 289 s. [Yarovich I.V. Emergency and emergency medical care. Minsk: Higher School. - 2010. - 289 p. (In Russ.)]
7. Neotlozhnaya khirurgiya organov bryushnoy polosti / Pod red. V.V. Levatovicha. M.: GEOTAR-Media. - 2007. - 247 s. [Emergency surgery of the abdominal organs / Ed. V.V. Levatovich. M.: GEOTAR-Media. - 2007. - 247 p. (In Russ.)]
8. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. v.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernovtsy: Institute of Thermoelectricity. - 2003. - 376 p.
9. Zayakov V.P., Kinshova L.A., Moiseyev V.F. Prognozirovaniye pokazateley nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. - Odessa: Politekhperiodika, 2009. - 175 c. [Zayakov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices. - Odessa: Polytehperiodika, 2009. 175 p. (In Russ.)]
10. Sennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - vol. 65. - pp. 698-726.
11. Anatyshuk L.I. The current state and some perspectives of thermoelectricity // Thermoelectric. - 2007. - №2. - p. 21-29.
12. Bulat L.P. Prikladnyye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii // Kholodil'naya tekhnika. - 2009. - № 7. - S. 14-19. Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration equipment. 2009. № 7. pp. 14-19. (In Russ.)]
13. Siennoga Twaha, Jie Zhu, Yu Li An Extraordinary Review of Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - №65.
14. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. - 2012.
15. Takenobu Kajikawa, Ryoji Funahami Newest Developments in the Field of Thermoelectric Power Generation Technology in Japan // Thermoelectricity. - 2016. - № 1. - p. 4-11.
16. Shuchitangshu Chatterji Thermoelectricity in the Indian scenario // Thermoelectricity. - 2016. - №6. - p. 7-15.
17. Ismailov T.A., Aminov G.I., Yevdulov O.V., Yusufov SH.A. Pribory dlya lokal'nogo temperaturnogo vozdeystviya na chelovecheskiy organizm // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki, Novochoerkassk. - 2003. - №2. - S. 3-6. [Ismailov T.A., Aminov G.I., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A. Devices for local temperature effects on the human body // News of universities. North Caucasus region. Technical sciences, Novochoerkassk. - 2003. - №2. - p. 3-6. (In Russ.)]
18. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. - M.: Vysshaya shkola. - 1967. - 600 s. [Lykov A.V. Theory of heat conduction. - M.: Higher School. - 1967. - 600 p. (In Russ.)]
19. Grigor'yev I.S., Meylikhov Ye.Z. Fizicheskiye velichiny. Spravochnik. M.: Energoatomizdat. - 1991. [Grigoriev, I.S., Meilikhov, E.Z. Physical quantities. Directory. M.: Energoatomizdat. - 1991. (In Russ.)]
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Khazamova M.A., Magomadov R.A.M. Mathematical model of thermoelectric system for the local thermal effects on the human hand // Thermoelectricity. 2014. № 1.
21. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Ragimova T.A. Research of thermoelectric system for local freezing of laryngeal tissues // Thermoelectricity. 2015. № 2.

### Сведения об авторах:

**Евдулов Олег Викторович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Магомедова Сарат Гусеновна** – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Миспахов Играмидин Шарафидинович** – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Набиев Наби Абдулаевич** – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Насрулаев Абдула Магомедович** – соискатель, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Information about the authors:**

**Oleg V. Evdulov** – Cand.Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Sarat G.Magomedova** – Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Igramidin Sh. Mispakhov** - Cand.Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Nabi A. Nabiyev**– Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Abdula M. Nasrulaev** - Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию** 18.01.2019.

**Received** 18.01.2019.

**Принята в печать** 26.02.2019.

**Accepted for publication** 26.02.2019.

**Для цитирования:** Исмаилов Т.А., Ибрагимова А.М. Расчетная модель системы термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 42-52. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

**For citation:** Ismailov T.A., Ibragimova A.M. Calculation model of the system of thermal stabilization of the elements of radio electronic equipment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 42-52 (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 537.53.043

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-42-52

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

**Исмаилов Т.А.<sup>1</sup>, Ибрагимова А.М.<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1,2</sup> 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: dstu@dstu.ru, <sup>2</sup> e-mail: ibrasya@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка расчетной модели системы термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), основанной на совместном использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления и жидкостного метода теплоотвода, исследование теплофизических процессов происходящих при ее работе. **Метод.** Создана расчетная модель системы термостабилизации РЭА, основанной на использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления. Модель включает в себя описание процессов теплообмена при ламинарном движении жидкости в теплообменнике, определение продолжительности стабильной работы элементов РЭА в зависимости от скорости потока, холодопроизводительности термоэлектрической батареи (ТЭБ). **Результат.** Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы, в частности, зависимости изменения продолжительности поддержания стабильной температуры элемента РЭА от его мощности, температуры холодных спаев ТЭБ, рассеяние при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике. **Выводы.** Результаты расчетов определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элементов РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике. Данные параметры системы термостабилизации необходимо подбирать исходя из количества тепла, выделяемого в единицу времени элементом РЭА, длительности его работы, а также характеристик ТЭБ, используемой для охлаждения жидкости.

**Ключевые слова:** элемент РЭА, термостабилизирующая система, ТЭБ, модель, жидкостной теплообменник, плавящееся вещество, расчет, теплообмен, температура

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

CALCULATION MODEL OF THE SYSTEM OF THERMAL STABILIZATION OF THE ELEMENTS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Tagir A. Ismailov<sup>1</sup>, Asiyat M. Ibragimova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1,2</sup>70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: dstu@dstu.ru, <sup>2</sup>e-mail: ibrasya@mail.ru

**Abstract Objectives** The aim of the study is to develop a computational model of the system of thermal stabilization of elements of electronic equipment (REA), based on the joint use of working substances with a stable melting point and the liquid method of heat sink, the study of the thermophysical processes occurring during its operation. **Method** A computational model of the REA thermostabilization system based on the use of working substances with a stable melting point has been created. The model includes a description of the heat exchange processes during laminar fluid motion in a heat exchanger, determining the duration of stable operation of the REA elements, depending on the flow rate and cooling capacity of a thermoelectric battery (TEB). **Result** The graphs of dependences reflecting the main characteristics of the developed system were obtained, in particular, the dependence of the change in the duration of maintaining the stable temperature of the REA element on its power, the temperature of the cold junctions of the thermopile, scattering at different maximum flow rates of the heat exchanger. **Conclusions** The results of the calculations determine that the duration of complete penetration of the working substance, corresponding to the duration of stable operation of REA elements, can be within the required limits only if certain very specific conditions are met: using a sufficient amount of the working substance in the heat stabilizing system, corresponding to the temperature and flow rate of the liquid in the heat exchanger. These parameters of the thermal stabilization system must be selected based on the amount of heat emitted per unit of time by the REA element, the duration of its operation, and the characteristics of the thermopile used to cool the fluid.

**Keywords:** REA element, heat stabilizing system, TEB, model, liquid heat exchanger, melting substance, calculation, heat transfer, temperature

**Введение.** В настоящее время одним из распространенных методов отвода тепла от элементов РЭА с высокими тепловыделениями является принудительное жидкостное охлаждение [1-7]. При использовании этого метода отвод теплоты от элементов РЭА производится за счет прокачивания охлаждающей жидкости через каналы в узлах охлаждаемого прибора. При этом может использоваться как одноконтурное охлаждение, так и охлаждение с промежуточным однофазным теплоносителем [8].

Одним из главных недостатков данного метода отвода теплоты является невозможность поддержания температуры элемента РЭА на заданном уровне с высокой точностью вследствие большой ошибки термостатирования охлаждающей жидкости.

**Постановка задачи.** Для повышения точности термостабилизации элементов РЭА в [9] была предложена система термостабилизации проточного типа, основанная на использовании специальных рабочих веществ, имеющих стабильную температуру плавления [10-12].

Термостабилизирующая система (рис.1) включает в себя тонкостенный металлический контейнер 1 с рабочим веществом, имеющим стабильную температуру плавления, совпадающую с температурой статирования элемента РЭА 2, и размещенный в нем теплообменник 3, выполненный в виде металлической трубы, по которой протекает посредством нагнетателя 4 охлаждаемая ТЭБ 5 жидкость.

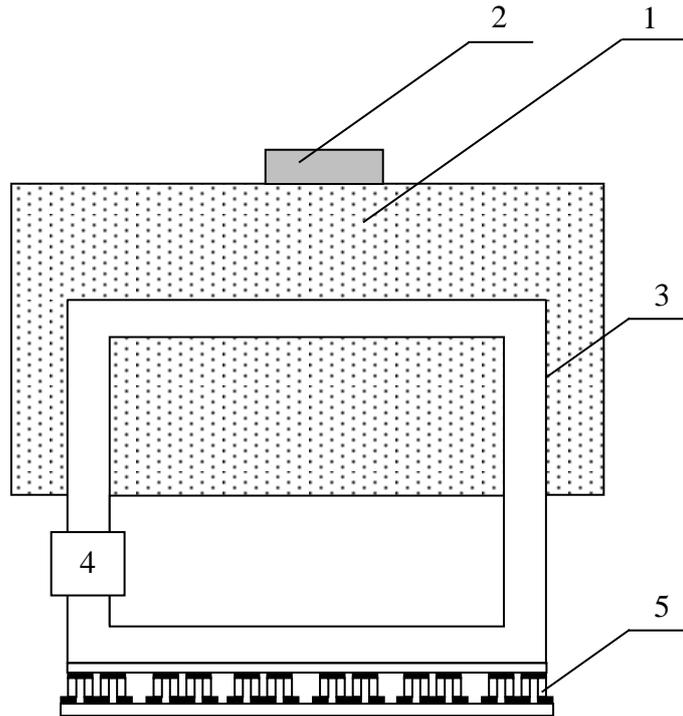


Рис.1. Структурная схема системы термостабилизации элементов РЭА

Fig.1. Structural diagram of the system of thermal stabilization of electronic equipment elements

**Методы исследования.** Задача расчета термостабилизирующей системы состоит в определении количества рабочего вещества, необходимого для поддержания рабочей температуры элемента РЭА на заданном уровне, параметров жидкостного теплообменника и ТЭБ.

Длительность поддержания стабильной температуры элемента РЭА в представленной на рис.1 термостабилизирующей системе определяется величиной рассеиваемой мощности, скрытой теплотой плавления использованного рабочего вещества, его количеством, параметрами жидкостного теплообменника, температурой и скоростью протекающей в теплообменнике жидкости.

Время поддержания стабильной температуры элемента РЭА с достаточной степенью точности оценивается формулой

$$t = \frac{q_{рв} \rho_{рв} V_{рв}}{W_{РЭА} - \alpha_{ж} S_{та\ell} (T_{ст\ell} - T_{ж\ell})}, \quad W_{РЭА} - \alpha_{ж} S_{та\ell} (T_{ст\ell} - T_{ж\ell}) > 0, \quad (1)$$

где  $q_{рв}$ ,  $\rho_{рв}$ ,  $V_{рв}$  – скрытая теплота плавления, плотность и объем рабочего вещества;  $W_{РЭА}$  – мощность, рассеиваемая элементом РЭА;  $\alpha_{ж}$  – коэффициент теплоотдачи жидкости;  $S_{та\ell}$  – площадь боковой поверхности теплообменника (металлической трубы), находящейся в контейнере с рабочим веществом;  $\ell$  – длина части металлической трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом;  $r$  – радиус металлической трубы;  $T_{ст\ell}$  – температура стенки теплообменника, находящейся в контейнере с рабочим веществом;  $T_{ж\ell}$  – температура жидкости, протекающей в части теплообменника, находящейся в контейнере с рабочим веществом.

Значение  $T_{ст\ell}$  принимается равным температуре плавления (кристаллизации) рабочего вещества  $T_{кр}$ , а  $T_{ж\ell}$  определяется из решения задачи о протекании жидкости по полой трубе с заданной температурой внешней стенки.

Допущение о равенстве температуры внешней стенки трубы теплообменника температуре плавления (кристаллизации) рабочего вещества справедливо для случая оребрения внутренней поверхности металлического контейнера и наличия развитой естественной конвекции в жидкой фазе рабочего агента.

Для определения  $T_{ж\ell}$  рассмотрим элементарный объем цилиндрической формы, имеющий длину  $dx$ , внутренний радиус  $r$  и наружный радиус  $r + dr$  (рис.2), тепловой поток  $Q_r$  в котором направлен от боковой поверхности к центру по нормали.

В данном случае тепловой поток распространяется в радиальном направлении в результате теплопроводности, а конвективный перенос энергии имеет осевую направленность.

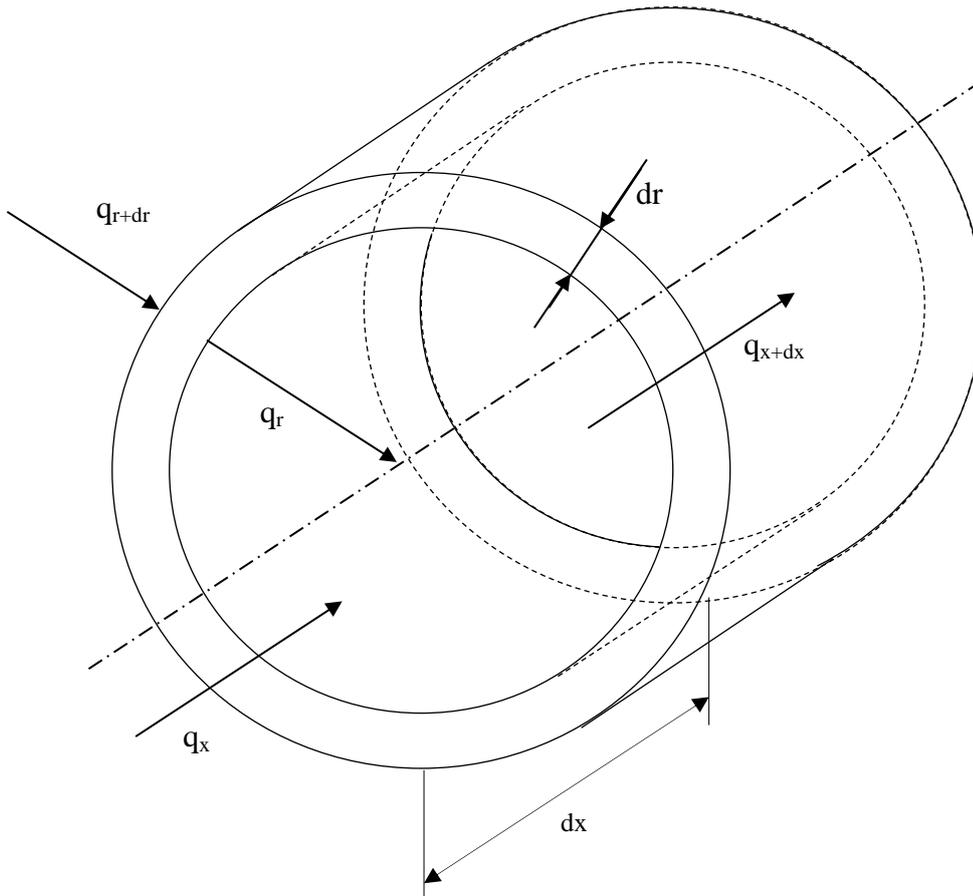


Рис.2. Элементарный объем участка жидкостного теплообменника  
 Fig.2. Elementary volume of the liquid heat exchanger section

Если учесть, что изменение теплового потока в радиальном направлении равно изменению теплового потока в осевом направлении трубы и приравнять результирующие тепловые потоки, обусловленные теплопроводностью и конвекцией при установившихся условиях, можно получить следующую систему уравнений, описывающую теплообмен в трубе для полностью развитого ламинарного течения жидкости [13]:

$$\begin{cases} \frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r} \right) = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial x}, & 0 < r < a \\ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_{ст\ell}}{\partial r} \right) = 0, & a < r < b \end{cases} \quad (2)$$

при граничных условиях:

$$T_{ст\ell}|_{r=b} = T_{кр} \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4)$$

$$T_{ж\ell}|_{r=a} = T_{ст\ell}|_{r=a} \quad (5)$$

$$A_{a\ell} \kappa_{ж} \left. \frac{\partial T_{ж\ell}}{\partial r} \right|_{r=a} = A_{b\ell} \kappa_{ст} \left. \frac{\partial T_{ст\ell}}{\partial r} \right|_{r=b} \quad (6)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность охлаждающей жидкости;  $c_{ж}$  – удельная теплоемкость жидкости;  $u$  – скорость потока жидкости;  $\kappa_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости;  $\kappa_{ст}$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы;  $a$  и  $b$  – внутренний и внешний радиусы трубы соответственно;  $A_{a\ell} = 2\pi a\ell$  – площадь внутренней поверхности стенки трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом;  $A_{b\ell} = 2\pi b\ell$  – площадь внешней поверхности стенки трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом ( $A_{b\ell} = S_{та\ell}$ ).

При допущении о постоянстве  $\partial T_{ж\ell} / \partial x$  первое дифференциальное уравнение в частных производных из системы (2) преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение, в котором скорость на любом радиальном расстоянии  $r$  является функцией скорости на оси трубы  $u_{max}$  [14, 15].

При полностью развитом ламинарном течении распределение скоростей в трубе является параболическим и может быть записано в безразмерном виде в зависимости от радиального расстояния следующим образом:

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2, \quad (7)$$

Решение системы уравнений (2) с условиями (3)-(7) в соответствие с рекомендациями [16] и выражается следующей зависимостью:

$$T_{ж\ell}(r, x) = (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр}, \quad (8)$$

где  $G = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} u_{max} \left[ -\frac{r^2}{4} + \frac{r^4}{16a^2} + \frac{A_{a\ell} \kappa_{ж}}{A_{b\ell} \kappa_{ст}} \frac{a^2}{4} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{3a^2}{16} \right]$ ;  $\bar{T}_{ж.вх\ell}$  – средняя массовая температура жидкости на входе в ту часть теплообменника, которая находится в контейнере с рабочим веществом.

Средняя массовая температура жидкости

$$\bar{T}_{ж\ell} = \frac{\int_V \rho_{ж} u T_{ж\ell}(r, x) dV}{\int_V \rho_{ж} u dV} = \frac{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр} dV}{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] dV}, \quad (9)$$

где  $V$  – объем части трубы, находящейся в контейнере с рабочим веществом.

Подставив (16) в (1), получим:

$$t = \frac{q_{рв} \rho_{рв} V_{рв}}{W_{р\Delta A} - \alpha_{ж} A_{b\ell} \left( T_{кр} - \frac{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вх\ell} - T_{кр}) \exp\left[-\frac{x}{G}\right] + T_{кр} dV}{\int_V \rho_{ж} u_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] dV} \right)}, \quad (10)$$

в котором,  $\alpha_{ж}$  может быть найдено из соотношения:

$$\alpha_{ж} = \frac{\kappa_{ж} Nu}{2a} \xi, \quad (11)$$

где  $Nu = 4,36$  - число Нуссельта;  $\xi = 1 + 1,8 \frac{2a}{R}$  - коэффициент, учитывающий изгиб трубы [17];  $R$  - радиус изгиба трубы.

Для стабильного функционирования системы необходимо использование ТЭБ с холодопроизводительностью, достаточной для снижения температуры протекающей жидкости с значения

$$\bar{T}_{ж.вых\ell} = \frac{\int_S \rho_{ж} u T_{ж\ell}(r, \ell) dS}{\int_S \rho_{ж} u dS} = \frac{\int_S \rho_{ж} u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вых\ell} - T_{кр}) \exp \left[ -\frac{\ell}{G} \right] + T_{кр} dS}{\int_S \rho_{ж} u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] dS},$$

представляющего собой среднюю массовую температуру жидкости при  $x = \ell$ , до заданной величины  $\bar{T}_{ж.вых\ell}$  (естественный теплообмен жидкости с окружающей средой не учитывается).

При постоянной температуре на холодном спае ТЭБ  $T_{ТЭБх}$  величина ее холодопроизводительности, необходимая для снижения температуры протекающей жидкости с  $\bar{T}_{ж.вых\ell}$  до  $\bar{T}_{ж.вл}$  может быть определена из соотношения:

$$Q_x = \alpha_{ж} A_{aL} (T_{ТЭБх} - \bar{T}_{жL}), \quad (12)$$

где  $A_{aL} = 2\pi aL$  - площадь внутренней поверхности стенки трубы теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом;  $L$  - длина части трубы теплообменника, расположенной вне контейнера с рабочим веществом;  $\bar{T}_{жL}$  - средняя массовая температура жидкости, протекающей по части теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом.

Значение  $\bar{T}_{жL}$  определяется из выражения

$$\bar{T}_{жL} = \frac{\int_{V_1} \rho_{ж} u T_{жL}(r, x) dV_1}{\int_{V_1} \rho_{ж} u dV_1} = \frac{\int_{V_1} \rho_{ж} u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] (\bar{T}_{ж.вых\ell} - T_{ТЭБх}) \exp \left[ -\frac{x}{G_1} \right] + T_{ТЭБх} dV_1}{\int_{V_1} \rho_{ж} u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] dV_1},$$

где  $V_1$  - объем части трубы, находящейся вне контейнера с веществом;  $T_{жL}(r, x)$  - температура жидкости протекающей по части теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом,  $G_1 = \frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\kappa_{ж}} u_{\max} \left[ -\frac{r^2}{4} + \frac{r^4}{16a^2} + \frac{A_{aL} \kappa_{ж}}{A_{bL} \kappa_{ст}} \frac{a^2}{4} \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{3a^2}{16} \right]$ ,  $A_{bL} = 2\pi bL$  - площадь внешней поверхности стенки трубы теплообменника, находящейся вне контейнера с рабочим веществом.

Дальнейшая последовательность расчета параметров ТЭБ (оптимальные геометрические размеры, электро- и теплофизические параметры ветвей, значения питающего тока, потребляемой электроэнергии и т. п.) известна и может быть определена из [18-22].

**Обсуждение результатов.** На основе рассмотренной расчетной модели термостабилизирующей системы проведен численный эксперимент, результаты которого представлены на рис.3-5.

Расчет производился при следующих исходных данных: в качестве рабочего вещества предполагалось использование азотнокислого никеля с  $q_{рв} = 155 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $\rho_{рв} = 2050$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_{рв} = 0,21 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $T_{кр} = 56,7$  °С; в качестве охлаждающей жидкости - воды с  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{ж} = 4180$  Дж/(кг·К),  $\kappa_{ж} = 0,615$  Вт/(м·К);  $\kappa_{ст} = 400$  Вт/(м·К);  $a = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 2,0 \cdot 10^{-3}$  м;  $\ell = 0,2$  м;  $L = 0,4$  м; для зависимостей, приведенных на рис.3  $\bar{T}_{ж.вх\ell} = 15$  °С.

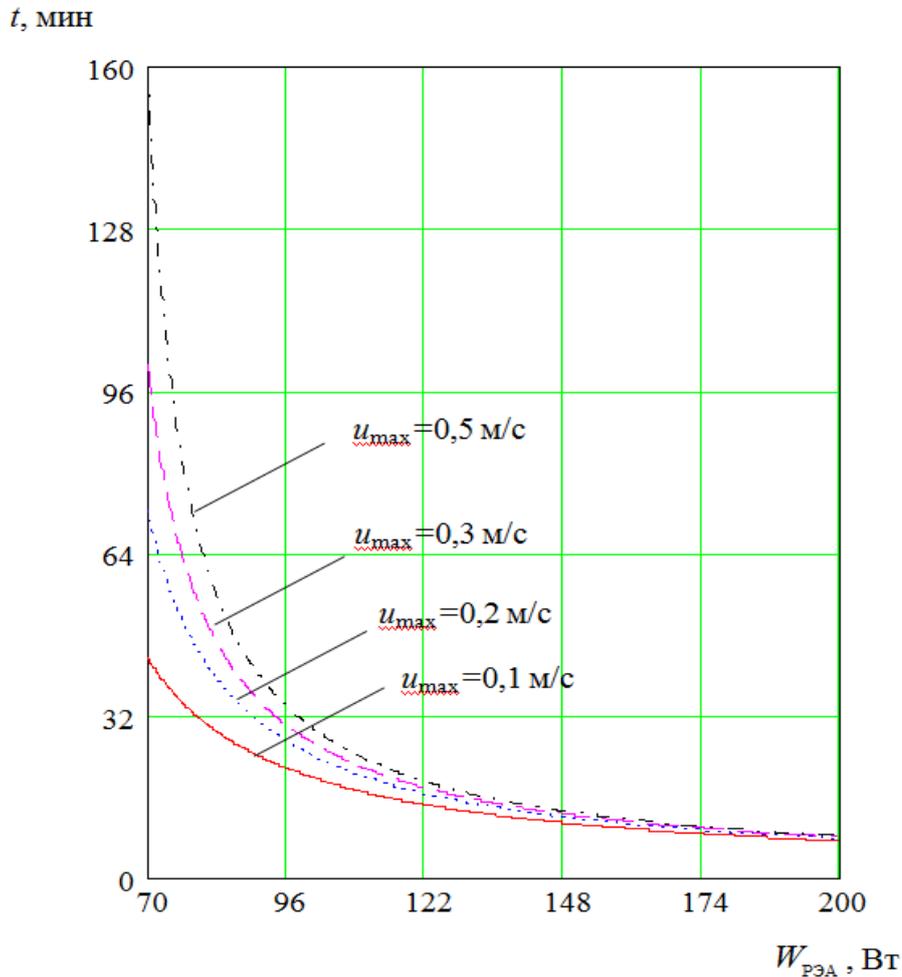
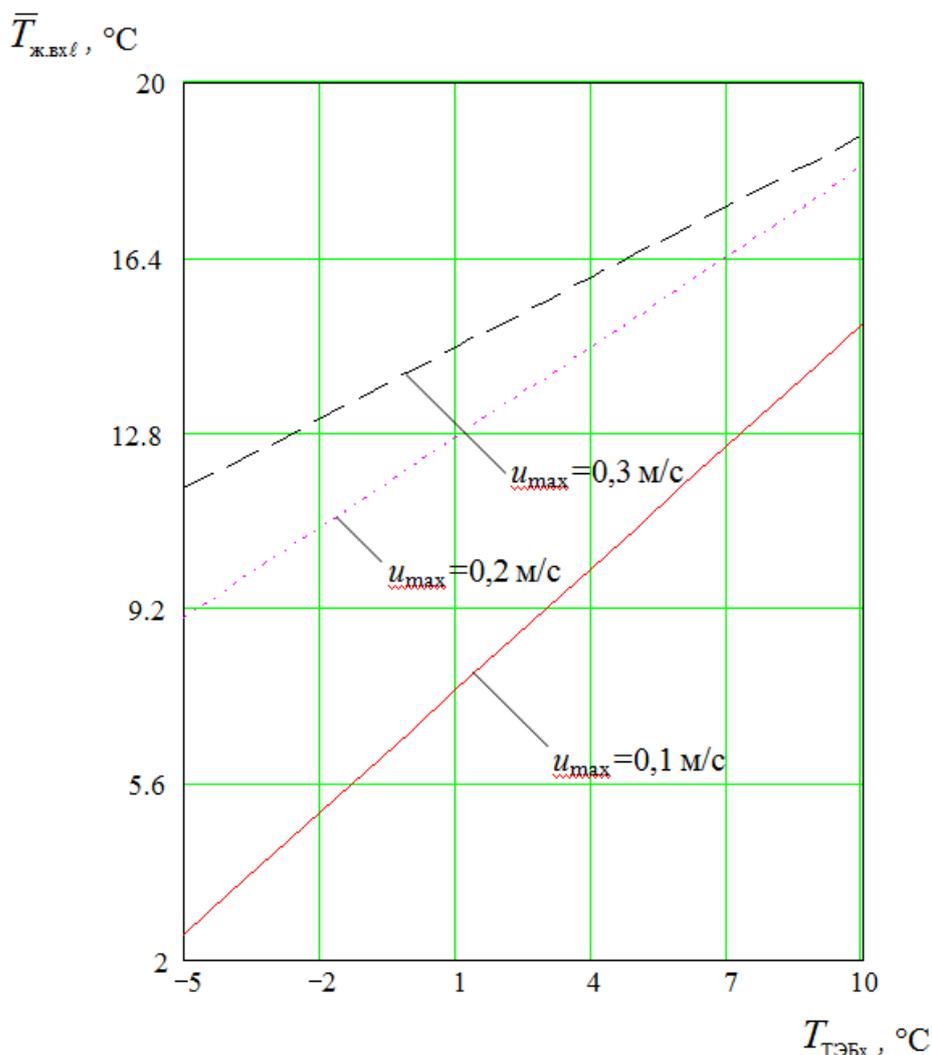


Рис.3. Изменение продолжительности поддержания стабильной температуры элемента РЭА от его мощности рассеяние при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике  
Fig.3. The change in the duration of maintaining a stable temperature of the CEA element from its power dissipation at various maximum flow rates of the fluid in the heat exchanger

Расчетные зависимости (прежде всего графики, изображенные на рис.3) определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элемента РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике.



**Рис.4. Изменение температуры жидкости на входе теплообменника от температуры холодных спаев ТЭБ при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике**  
**Fig.4. Temperature change of the fluid at the inlet of the heat exchanger from the temperature of the cold junctions of the thermopile at various maximum speeds of the fluid flow in the heat exchanger**

Данные параметры системы термостабилизации необходимо подбирать исходя из количества тепла, выделяемого в единицу времени элементом РЭА, длительности его работы, а также характеристик ТЭБ, используемой для охлаждения жидкости.

Последнее ограничение определяет, прежде всего, диапазон скоростей течения жидкости и максимальное понижение ее температуры.

Ведь при значительном увеличении скорости течения жидкости и понижении ее температуры необходимо использование более мощной ТЭБ с улучшенными энергетическими характеристиками (рис.4-5). Или же применение более громоздкого теплообменника (увеличение длины той его части, которая находится вне контейнера с рабочим веществом), что в подавляющем числе случаев является неприемлемым, вследствие увеличения габаритных размеров системы термостабилизации.

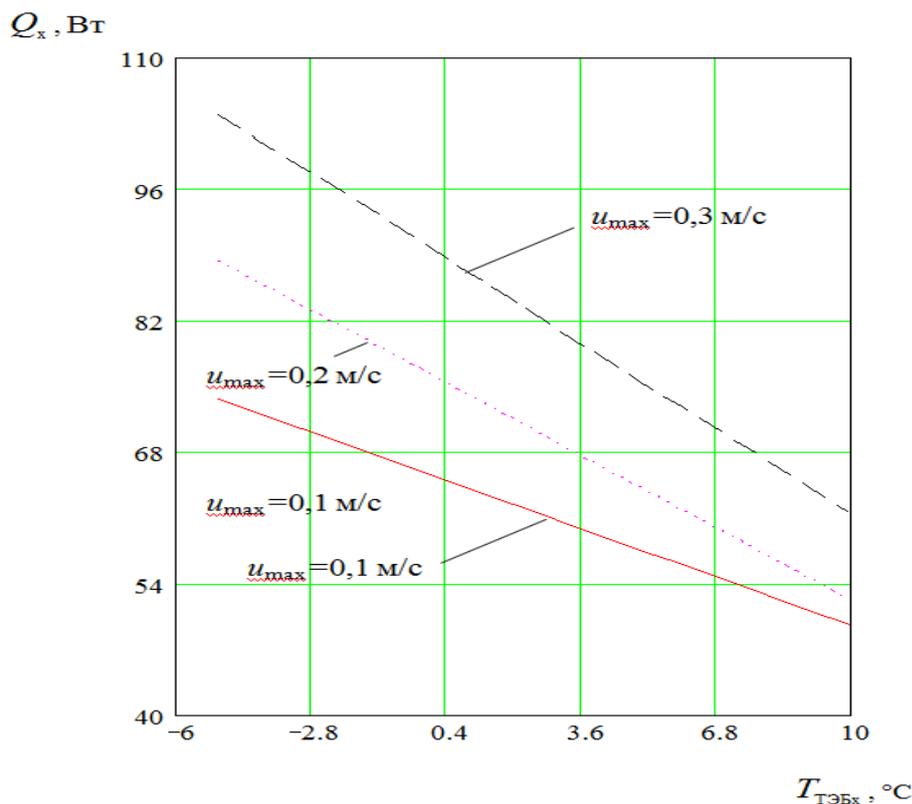


Рис.5. Изменение холодопроизводительности ТЭБ от температуры холодных спаев ТЭБ при различных максимальных скоростях течения жидкости в теплообменнике  
Fig.5. The change in the thermal performance of thermopile from the temperature of cold junctions of thermopile at various maximum flow rates in the heat exchanger

**Выводы.** Рассмотрена расчетная модель системы термостабилизации РЭА, основанная на использовании рабочих веществ со стабильной температурой плавления. Получены зависимости времени функционирования элемента РЭА при стабильной температуре от выделяемой им тепловой мощности для разных скоростей протекающей жидкости при использовании в качестве рабочего вещества азотнокислого никеля. Определена холодопроизводительность термоэлектрической батареи, обеспечивающей охлаждение протекающей жидкости.

Результаты расчетов показали, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы элемента РЭА, может находиться в необходимых пределах только при выполнении определенных вполне конкретных условий: использовании в термостабилизирующей системе достаточного количества рабочего вещества, соответствующей температуры и скорости протекания жидкости в теплообменнике.

#### Библиографический список:

1. Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. - Курск: Наукком, 2016. - 248 с.
2. Андреев П.Г., Наумова. И.Ю Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий. - Пенза: ПГУ, 2012. - 128 с.
3. Камышная Э. Н., Маркелов В. В., Соловьев В. А. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 22 с.
4. Кудрявцев Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов. - М.: МАИ, 2012. - 226 с.
5. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. О возможности регулирования тепловых режимов типичного элемента радиоэлектронной аппаратуры или электронной техники с локальным источником тепла за счет естественной конвекции // Микроэлектроника. - 2010. - Т.39, №6. - С. 452-467.
6. Улитенко А.И., Прадед В.В., Пушкин В.А. Компактная система охлаждения мощных газовых лазеров // Холодильная техника. - 2003. - № 10. - С. 21-24.

7. Hamouche A., Bessaih R. Mixed convection air cooling of protruding heat source mounted in horizontal channels // International communication in heat and mass transfer. - 2009. - v.36. - P. 44-51.
8. Дульнев Г.И. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
9. Патент РФ на изобретение №2180161 Устройство для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры с высокими тепловыделениями // О.В. Евдулов, Т.А. Исмаилов, Ш.А. Юсуфов, Г.И. Аминов (РФ), опубл. 27.02.2002, Бюл. №6.
10. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. №1 (36). С. 38-44.
11. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Евдулов Д.В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2008. №5. С. 52-59.
12. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Термоэлектричество. 2015. № 6. С. 74-87.
13. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Аминов Г.И., Юсуфов Ш.А. Приближенный расчет системы термостабилизации проточного типа для элементов радиоэлектронной аппаратуры, основанной на применении рабочих веществ со стабильной температурой плавления // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – СПб, 2003. - №1. - С. 65-71.
14. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. - СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. - 195 с.
15. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 2011. - 304 p.
16. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Теплообмен в приборостроении. - СПб.: ГУИТМО, 2004. - 560 с.
17. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высшая школа, 2001. - 550 с.
18. K. Nagase, A. Yamamoto Development of durability testing for thermoelectric power generation module // Journal of Kinzoku materials science and technology. - 2016.- №3. - P. 32-38.
19. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter // Journal of thermoelectricity. - 2014. - P.41-47.
20. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. - 2012. - 264 p.
21. Ssennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - №65. - P. 26-32.
22. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1979. - 385 с.

#### References:

1. Alekseyev V.A. Osnovy proyektirovaniya teplovykh akkumulyatorov kosmicheskikh apparatov. - Kursk: Naukom, 2016. - 248 s. [Alekseev V.A. Basics of designing spacecraft thermal accumulators. - Kursk: Science, 2016. - 248 p. (In Russ.)]
2. Andreyev P.G., Naumova. I.YU Zashchita radioelektronnykh sredstv ot vneshnikh vozdeystviy. - Penza: PGU, 2012. - 128 s. [Andreev PG, Naumov. I.Yu. Protection of radio-electronic means from external influences. - Penza: PGU, 2012. - 128 p. (In Russ.)]
3. Kamyshnaya E. N., Markelov V. V., Solov'yev V. A. Konstruktorsko-tehnologicheskiye raschety elektronnoy apparatury. - М.: MGTU im. N. E. Baumana, 2014. - 22 s. [Kamyshnaya E.N., Markelov V.V., Soloviev V.A. Design and technological calculations of electronic equipment. - М.: MSTU. N.E. Bauman, 2014. - 22 p. (In Russ.)]
4. Kudryavtsev N.S. Osnovy proyektirovaniya effektivnykh sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov. - М.: MAI, 2012. - 226 s. [Kudryavtsev N.S. Fundamentals of designing effective spacecraft thermal control systems. - М.: MAI, 2012. - 226 p. (In Russ.)]
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. O vozmozhnosti regulirovaniya teplovykh rezhimov tipichnogo elementa radioelektronnoy apparatury ili elektronnoy tekhniki s lokal'nym istochnikom tepla za schet yeste-stvennoy konveksii // Mikroelektronika. - 2010. - T.39, №6. - S. 452-467. [Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. On the possibility of regulating the thermal conditions of a typical element of electronic equipment or electronic equipment with a local heat source due to natural convection // Microelectronics. - 2010. - T.39, №6. - p. 452-467. (In Russ.)]
6. Ulitenko A.I., Praded V.V., Pushkin V.A. Kompaktnaya sistema okhlazhdeniya moshchnykh gazovykh lazerov // Kholodil'naya tekhnika. 2003. № 10. S. 21-24. [Ulitenko A.I., Great-grandfather V.V., Pushkin V.A. Compact cooling system of high-power gas lasers // Refrigeration. 2003. № 10. p. 21-24. (In Russ.)]
7. Hamouche A., Bessaih R. - 2009. - v.36. - P. 44-51.

8. Dul'nev G.I. Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature. M.: Vysshaya shkola, 1984. - 247 s. [Dulnev G.I. Heat and mass transfer in electronic equipment. M.: Higher School, 1984. - 247 p. (In Russ.)]
9. Patent RF na izobreteniyе №2180161 Ustroystvo dlya termostabilizatsii elementov radioelektronnoy apparatury s vysokimi teplovydeleniyami // O.V. Yevdulov, T.A. Ismailov, SH.A. Yusufov, G.I. Aminov (RF), publ. 27.02.2002, Byul. №6. [RF patent for invention №2180161 Device for thermal stabilization of elements of electronic equipment with high heat release // O.V. Evdulov, T.A. Ismailov, Sh.A. Yusufov, G.I. Aminov (RF), publ. 27.02.2002, Byul. №6. (In Russ.)]
10. Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Sistemy otvoda teploty ot elementov REA na baze plavyashchikh teplovykh akkumulyatorov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2015. №1 (36). S. 38-44. [Ismailov T.A., Evdulov D.V., Evdulov O.V. Heat removal systems from electronic components on the basis of melting heat accumulators // Herald of Dagestan State Technical University. Technical science. 2015. №1 (36). Pp. 38-44. (In Russ.)]
11. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Makhmudova M.M., Yevdulov D.V. Issledovaniye sistemy okhlazhdeniya elementov radioelektronnoy apparatury, rabotayushchikh v rezhime povtorno-kratkovremennykh teplovydeleniy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. 2008. №5. S. 52-59. [Ismailov T.A., Evdulov O.V., Makhmudova M.M., Evdulov D.V. Investigation of the cooling system of elements of electronic equipment operating in the mode of intermittent heat generation // News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics. 2008. №5. pp. 52-59. (In Russ.)]
12. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. Results of theoretical studies of the cooling system of electronic equipment elements operating in the mode of intermittent heat generation // Thermoelectric. 2015. № 6. pp. 74-87.
13. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Aminov G.I., Yusufov SH.A. Priblizhennyi raschet sistemy termostabilizatsii protochnogo tipa dlya elementov radioelektronnoy apparatury, osnovannoy na primeneniі ra-bochikh veshchestv so stabil'noy temperaturoy plavleniya // Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika. – SPb, 2003. - №1. - S. 65-71. [Ismailov T.A., Evdulov O.V., Aminov G.I., Yusufov Sh.A. Approximate calculation of a flow-type thermostabilization system for elements of electronic equipment based on the use of working substances with a stable melting point // Izvestiya Vuzov Rossii. Radio electronics. - SPb, 2003. №1. pp. 65-71. (In Russ.)]
14. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. - SPb.: SPbNIUITMO, 2012. - 195 s. [Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. - SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 p. (In Russ.)]
15. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P. Dewitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 2011. 304 p.
16. Kondrat'yev G.M., Dul'nev G.N., Platunov Ye.S., Yaryshev N.A. Teploobmen v priborostroyenii. - SPb.: GUITMO, 2004. - 560 s. [Kondratyev G.M., Dulnev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. Heat transfer in instrument making. - SPb.: GUITMO, 2004. - 560 p. (In Russ.)]
17. Kartashov E.M. Analiticheskiye metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel. - M.: Vysshaya shkola, 2001. - 550 s. [Kartashov E.M. Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. - M.: Higher School, 2001. - 550 p. (In Russ.)]
18. K. Nagase, A. Yamamoto. Development of durability testing for thermoelectric power generation module // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. №3. pp. 32-38.
19. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter // Journal of thermoelectricity. 2014. pp.41-47.
20. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012. 264 p.
21. Sennoga Twaha, Jie Zhu, Yu Li An Bo Review of the Thermoelectric Technology: Renewable and sustainable energy reviews. 2016. - №65. pp.26-32.
22. Anatyshchuk L.I. Thermocouples and thermoelectric devices. Directory. Kiev: Naukova Dumka, 1979. 385 p.

#### **Сведения об авторах.**

**Исмаилов Тагир Абдурашидович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, президент ДГТУ.

Ибрагимова Асият Магомедовна – соискатель кафедры теоретической и общей электротехники.

#### **Information about the authors.**

**Tagir A.Ismailov** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU.

**Asiyat M. Ibragimova** - Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.01.2019.

Принята в печать 26.02.2019.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.01.2019.

Accepted for publication 26.02.2019.

**Для цитирования:** Лобанов И.Ю. Моделирование теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с симметричными турбулизаторами на обеих сторонах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1):53-65. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-53-65

**For citation:** Lobanov I. E. Modeling of heat exchange at turbulent flow in flat channels with symmetric turbulizers on both parties. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(1): 53-65. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-53-65

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**УДК 532.517.4 : 536.24**

**DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-53-65**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С СИММЕТРИЧНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ НА ОБЕИХ СТОРОНАХ**

**Лобанов И.Е.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия,  
e-mail: lloobbaannooff@live.ru

**Резюме. Цель.** Моделирование теплообмена в плоских каналах, с симметрично расположенными на обеих его сторонах турбулизаторами в зависимости от поперечного сечения турбулизаторов и режимов течения теплоносителя. **Метод.** Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ), который был успешно апробирован в [23]. **Результат.** Получены результаты расчёта интенсифицированного теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами различных поперечных сечений (квадратного, прямоугольного, полукруглого, треугольного) в зависимости от определяющих параметров вполне удовлетворительно согласующиеся с существующим экспериментальным материалом, но имеющие перед последними неоспоримое преимущество, т.к. допущения, принятые при их выводе, охватывают гораздо более широкий диапазон определяющих параметров, чем ограничения, имеющиеся в экспериментах ( $Pr=0,7\div 100$ ;  $Re=10^3\div 10^6$ ;  $h/d_3=0,005\div 0,2$ ;  $t/h=1\div 200$ ). **Вывод.** По результатам расчётов на основе разработанной модели можно осуществлять оптимизацию интенсификации теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами различных поперечных сечений, а также управлять процессом интенсификации теплообмена. При интенсификации теплообмена в плоских каналах симметричными выступами квадратного, прямоугольного и треугольного поперечных сечений, т.е. сравнительно резких очертаний, в вихрях до выступов и за ними выработка турбулентности сопоставима с диссипацией энергии, что приводит к увеличенным гидравлическим потерям; для плоских каналов с выступами полукруглого поперечного сечения, т.е. сравнительно плавных очертаний, диссипация энергии гораздо меньше, поэтому и гидравлическое сопротивление в таких каналах меньше. Был проведён подробный анализ структуры вихревых зон (основных, угловых, вторичных и т.п.) между периодическими поверхностно расположенными в плоском канале турбулизаторами потока квадратного, полукруглого, треугольного и прямоугольного поперечных сечений в зависимости от геометрических и режимных параметров течения теплоносителя, выявлено влияние этих зон на теплообмен и гидравлическое сопротивление канала; дополнительным образом подтверждена оптимальность применения к абютированным турбулизаторов, где гидравлические потери много меньше, чем для турбулизаторов резких очертаний, что прямо или косвенно верифицируется существующим экспериментальным материалом [1—6].

**Ключевые слова:** математическая модель, плоский канал, турбулизатор, моделирование, теплообмен, турбулентный, течение, интенсификация, двусторонний, симметричный, низкорейнольдсовый, сетка, поперечное сечение, треугольное, прямоугольное, квадратное, полукруглое

## MODELING OF HEAT EXCHANGE AT TURBULENT FLOW IN FLAT CHANNELS WITH SYMMETRIC TURBULIZERS ON BOTH PARTIES

**Igor E. Lobanov**

Moscow Aviation Institute (National Research University),

4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia,

e-mail: lloobbaannooff@live.ru

**Abstract. Objectives.** Mathematical modeling of heat transfer in flat channels with turbulators symmetrically located on both its sides, depending on the cross section of the turbulators. **Methods.** The calculation was carried out on the basis of a theoretical method based on solving the Reynolds equations factorized by the finite-volume finite-volume method, closed using the Menter shear stress transfer model, and the energy equation on multi-scale intersecting structured grids (FCOM), which was successfully tested in [23]. **Results.** The article results of calculating the intensified heat exchange in flat channels with double turbulators of different cross sections (square, rectangular, semicircular, triangular) depending on the determining parameters were quite satisfactorily consistent with the existing experimental material, but having an indisputable advantage over the latter, since the assumptions made in their derivation cover a much wider range of defining parameters than the limitations found in the experiments ( $Pr=0.7\div 100$ ,  $Re=10^3\div 10^6$ ,  $h/d_E=0.005\div 0.2$ ,  $t/h=1\div 200$ ). **Conclusion.** According to the results of calculations on the basis of the developed model, it is possible to optimize heat transfer intensification in flat channels with double turbulators of different cross sections, as well as control the heat transfer intensification process. As shown by the calculated data, with the intensification of heat transfer in the flat channels, symmetrical protrusions of square, rectangular and triangular cross sections, i.e. relatively sharp outlines, in the vortices up to the protrusions and behind them the production of turbulence is comparable to energy dissipation, which leads to increased hydraulic losses; for flat channels with protrusions of a semicircular cross section, i.e. relatively smooth outlines, the energy dissipation is much smaller, therefore, the hydraulic resistance in such channels is less. A detailed analysis of the structure of the vortex zones (main, angular, secondary, etc.) between periodic surface flow turbulators of square, semicircular, triangular and rectangular cross sections depending on the geometric and regime parameters of the coolant flow was carried out, the effect of the above vortex zones heat transfer and hydraulic resistance of the channel; additionally confirmed the optimality of application to abraded turbulators, where hydraulic losses are much smaller than for sharp turbulators, which is directly or indirectly verified by existing experimental material [1–6].

**Keywords:** mathematical model, flat channel, turbulence, modeling, heat exchange, turbulent flow, intensification, two-sided, symmetrical, low-grade, grid, cross section, triangular, rectangular, square, semicircular

**Введение.** В современных теплообменных аппаратах и теплообменных устройствах широкое применение получили теплообменные устройства с каналами, имеющими некруглое поперечное сечение, в частности, плоские каналы, в которых теплообмен осуществляется частично, т.е. не через полную омываемую поверхность. Основным методом интенсифицирования теплообмена в плоских каналах является установка поверхностных турбулизаторов, как на одной, так и на обеих его поверхностях. Он лишён соответствующих недостатков, присущих методу развитию поверхности теплообмена [1, 2], поскольку не требует существенного увеличения внешних размеров плоских каналов, и поэтому применим в любых плоских каналах, а изготовление турбулизаторов на поверхностях плоских каналов не связано со значительными технологическими затруднениями. Плоский канал разбивается на нескольких секций, с расположенным в середине турбулизатором различного поперечного сечения, входного и выходного гладкого участков.

Основное внимание уделяется локальным и интегральным характеристикам конвективного теплообмена в плоском канале с двусторонними симметрично расположенными турбулизаторами различных поперечных сечений. Для внешнего обтекания прямоугольных выступов сходный подход был применён, например, в [21]; для труб с турбулизаторами сходный принцип исследования был применён в [23].

**Постановка задачи.** Резюмируя, можно кратко поставить задачу исследования: на осно-

ве апробированного метода (ФКОМ) рассчитать характеристики течения и теплообмена для плоских каналов с турбулизаторами различных поперечных сечений (квадратного, полукруглого, треугольного, прямоугольного) для соответствующего диапазона определяющих параметров ( $Pr=0,72$ ;  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ ;  $h/d_3=0,056 \div 0,102$ ;  $t/d_3=0,28 \div 2,04$ ) с последующим анализом.

**Методы исследования.** Анализ структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными в плоском канале турбулизаторами потока квадратного, полукруглого, треугольного и прямоугольного поперечных сечений

Исследование линий тока в трубах с турбулизаторами подробно рассматривается в работах [7-19]. Следовательно, необходимо сделать сходный анализ, позволяющий выяснить характер изменения локальных и осреднённых параметров течения и теплообмена в зависимости от геометрических и режимных характеристик в плоских каналах с двусторонними симметричными турбулизаторами различных поперечных сечений [15-20]. Реализация вышеизложенного метода ФКОМ позволила получить расчётные значения локальных значений гидравлического сопротивления и теплообмена в плоских каналах с двойными симметричными турбулизаторами различных поперечных сечений в зависимости от геометрических характеристик турбулизаторов и режимов течения теплоносителя.

Характерные случаи для рассматриваемого диапазона геометрических и режимных параметров ( $h/d_3=0,056 \div 0,102$ ;  $t/d_3=0,28 \div 2,04$ ;  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) были исследованы экспериментально [1-4]. Теперь следует проанализировать различие структуры вихревых зон для плоских каналов с турбулизаторами различных поперечных сечений при прочих равных условиях.

Для небольших чисел Рейнольдса ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,28$ ;  $Re=10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) различие между основным вихрём, образующимся за турбулизатором различного поперечного сечения состоит в том, что вихрь за квадратным турбулизатором более вытянут по потоку, заполняя пространство между турбулизаторами под небольшим углом (для прямоугольного турбулизатора угол совсем мал), доходя почти до всей высоты до следующего турбулизатора. Для треугольного турбулизатора угол наклона основного вихря уже довольно велик, поэтому до следующего турбулизатора он доходит только примерно до четверти высоты. Для турбулизатора полукруглого поперечного сечения основной вихрь развивается примерно от полувисоты турбулизатора и доходит до следующего до примерно трети высоты.

При бóльших шагах между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,56$ ;  $Re=10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) образуются чётко выраженные отрывы и присоединения потока. В отличие от квадратного турбулизаторов, точка присоединения потока располагается гораздо ближе по потоку, а для полукруглого — отрыв потока происходит не на верхней кромке, а на половине высоты турбулизатора. Для прямоугольного турбулизатора точка присоединения потока располагается далее всего по потоку.

При ещё бóльших шагах между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,84$ ;  $Re=10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) структура вихревых зон качественно не изменяется, но точка присоединения будет располагаться гораздо ближе по потоку. Влияние угловых вихрей в этих условиях очень незначительное.

При бóльших высотах турбулизаторов ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=1,02$ ;  $Re=10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) реализуется основной вихрь полукруглого типа. Отличительной особенностью данного течения является то, что отрыв потока для полукруглого турбулизатора происходит уже близко к верхней кромке турбулизатора. Отражение основного вихря от последующего турбулизатора для треугольного турбулизатора будет гораздо меньшим, чем для квадратного; для прямоугольного турбулизатора это отражение ещё больше.

Для этих же высот турбулизаторов и при больших шагах между турбулизаторами ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=2,04$ ;  $Re=10^3$ ;  $Pr=0,72$ ) для треугольных турбулизаторов уже происходит некоторый выход вихря в основное ядро потока. Для полукруглых турбулизаторов отрыв потока происходит близко к верхней кромке. Орыв и присоединение потока происходит, как характерные для открытых впадин.

При более высоких числах Рейнольдса ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,28$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) срыв потока для полукруглых турбулизаторов происходит практически рядом с верхней кромкой турбу-

лизатора. Для треугольного турбулизатора центр основного вихря расположен примерно посредине между турбулизаторами, в то время как для квадратных и полукруглых этот центр смещён к последующему турбулизатору, а для прямоугольных турбулизаторов вышеупомянутое смещение ещё более смещено к следующему турбулизатору.

При больших шагах между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,56$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) основной вихрь приобретает полуоткрытый характер, угловые вихри становятся более выраженными, чем при меньших числах Рейнольдса. Для турбулизаторов треугольного поперечного сечения выход основного вихря в ядро потока становится заметным.

При дальнейшем увеличении относительного шага между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,84$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) небольшой выход основного вихря в ядро потока имеет место и для турбулизатора квадратного поперечного сечения, а для треугольного он становится ещё большим; для прямоугольного турбулизатора срыв потока происходит уже на передней кромке, что обуславливает начало развития обратного вихря уже над турбулизатором. Для полукруглого турбулизатора отрыв потока происходит уже на его верхней кромке.

Для турбулизаторов больших относительных высот ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=1,02$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ), наряду с основным вихрем уже отчётливо проявляются угловые вихри, особенно для квадратных и прямоугольных турбулизаторов. Для прямоугольных турбулизаторов уже видны небольшой обратных вихрь над турбулизатором, а для квадратных срыв потока имеет место уже на передней кромке турбулизатора. Для треугольных турбулизаторов выход основного вихря в ядро потока уже становится явным. Для полукруглых турбулизаторов угловые вихри минимальны, что обуславливает меньшую деформацию основного вихря.

Для этих турбулизаторов с большими относительными высотами ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=2,04$ ;  $Re=10^4$ ;  $Pr=0,72$ ), но при большем шаге между турбулизаторами срыв потока с передних кромок для квадратных турбулизаторов приводит к образованию вихря над турбулизатором; для прямоугольных турбулизаторов эти надтурбулизаторные вихреобразования ещё более выражены. Для полукруглых турбулизаторов угловые вихри растут и становятся несколько большими, чем для треугольных. Для треугольных турбулизаторов происходит дальнейший выход основного вихря в ядро основного потока.

При наибольших исследованных числах Рейнольдса ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,28$ ;  $Re=2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) для квадратных турбулизаторов будут расти угловые вихри в закрытой впадине, которые будут в сильной степени деформировать основной вихрь. Для полукруглых турбулизаторов угловые вихри не так велики, как для квадратных, поэтому деформация основного вихря не столь велика. Для прямоугольных турбулизаторов вторичные вихри уже настолько велики, что достигают половины шага между турбулизаторами. Для треугольных турбулизаторов угловые вихри мало деформируют основной вихрь.

Для более широких шагов между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,56$ ;  $Re=2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) происходит дальнейший рост угловых вихрей, которые деформируют основной вихрь в полуоткрытой впадине. Срыв потока для полукруглого турбулизатора происходит с верхней кромки турбулизатора. Имеет место небольшой выход основного вихря в ядро потока для треугольных турбулизаторов.

При дальнейшем увеличении относительного шага между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$ ;  $t/d_3=0,84$ ;  $Re=2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) точка присоединения потока сдвигается в сторону, противоположную потоку; вихреобразования над квадратными и прямоугольными турбулизаторами становятся заметными. Выход основного вихря в ядро потока для треугольных турбулизаторов становится ещё более ощутимым.

Для турбулизаторов больших относительных высот ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=1,02$ ;  $Re=2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) при таких числах Рейнольдса для квадратных турбулизаторов вторичные угловые вихри становятся больше половины высоты турбулизатора, ощутимо деформируя основной вихрь; для прямоугольных турбулизаторов угловые вихри ещё больше, чем для квадратных. Срыв потока для полукруглых турбулизаторов происходит с верхней кромки, а для квадратных и прямоугольных турбулизаторов – с передней кромки, а не с задней, как при меньших числах Рей-

нольдса. Для треугольных турбулизаторов выход основного вихря в ядро потока уже ощутимо заметно. У полукруглых турбулизаторов деформация основного вихря за счёт развития угловых вихрей выражена в меньшей степени.

Для этих же высот турбулизаторов, но с большими относительными шагами ( $h/d_3=0,102$ ;  $t/d_3=2,04$ ;  $Re=2 \cdot 10^4$ ;  $Pr=0,72$ ) для квадратных и прямоугольных турбулизаторов вторичный вихрь развит уже настолько, что обуславливает выход основного вихря в ядро потока, поскольку срыв потока идёт уже с передней кромки турбулизатора.

Особенно это заметно для квадратного турбулизатора, поскольку для прямоугольного турбулизатора вышеупомянутый надтурбулизаторный вихрь вытянут по верху турбулизатора, а для квадратного турбулизатора он увеличивается в направлении поперёк потока; последнее увеличивает гидравлическое сопротивление такого рода каналов по сравнению со случаями, когда надтурбулизаторные вихри не образуются. Для треугольных турбулизаторов вытеснение основного вихря в ядро потока в данном случае наиболее выражено; выход в ядро потока основного вихря для треугольных турбулизаторов сопоставим с соответствующим случаем для квадратных турбулизаторов.

Следует отметить следующую тенденцию: при ещё большем увеличении числа Рейнольдса выход основного вихря в ядро потока для квадратных турбулизаторов будет опережать соответствующий выход для треугольных турбулизаторов. Для полукруглых турбулизаторов выход основного вихря в ядро потока минимален, влияние угловых вихрей на деформацию основного вихря также наименее выражено, что обуславливает наименьшее увеличение гидравлического сопротивления по сравнению с другими видами поперечных сечений турбулизаторов. Общий анализ распределения вихревых зон между квадратными турбулизаторами в плоских каналах обуславливает то, что при высоких турбулизаторах и при более высоких числах Рейнольдса незначительное повышение относительного числа Нуссельта приводит к значительным повышениям относительного гидравлического сопротивления, поскольку увеличивается значение возвратных течений, даже натекающих собственно на турбулизатор.

Применение турбулизаторов полукруглого поперечного сечения обуславливает уменьшение влияния возвратных вихрей, чем для других профилей турбулизаторов, особенно для квадратных и прямоугольных, в которых деформирование основного вихря большее. При применении турбулизаторов треугольного поперечного сечения основные вихри за ними более всего выходят в ядро потока, даже по сравнению с квадратными и прямоугольными турбулизаторами, что обуславливает увеличение теплообмена и, особенно, гидравлического сопротивления для треугольных турбулизаторов; данная тенденция будет сохраняться вплоть до достижения относительно больших чисел Рейнольдса, при которых будет иметь место генерация вторичных вихрей над квадратными и прямоугольными турбулизаторами, что обусловит вытеснение основного вихря в ядро потока.

**Обсуждение результатов.** Таким образом, гидравлическое сопротивление, а также в меньшей степени, теплообмен в трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения меньше, при прочих равных условиях, чем в трубах с турбулизаторами других поперечных сечений — квадратного, прямоугольного, треугольного, — что обуславливает более рациональное соотношение между интенсифицированным теплообменом и гидравлическим сопротивлением в плоских каналах с двойными симметрично расположенными поверхностными турбулизаторами потока.

**Относительные гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  для плоских каналов с полукруглыми турбулизаторами.** Значения относительного коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами приводятся на рис. 1-11 в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ . В целях унификации на рис. 1-11 относительное гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta-\Delta-\square}$  выделено зелёным цветом, а относительный теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta-\Delta-\square}$  — красным.

Как видно из рис. 1, для условий  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,28$  гидравлическое сопротивление в плоских каналах с квадратными турбулизаторами потока выше, чем для полукруглых примерно

на 15% для чисел Рейнольдса  $Re=6 \cdot 10^3 \div 1,1 \cdot 10^4$ , для крайних значений чисел Рейнольдса данное превышение составляет порядка 5%, а для промежуточных значений чисел Рейнольдса оно занимает промежуточные значения.

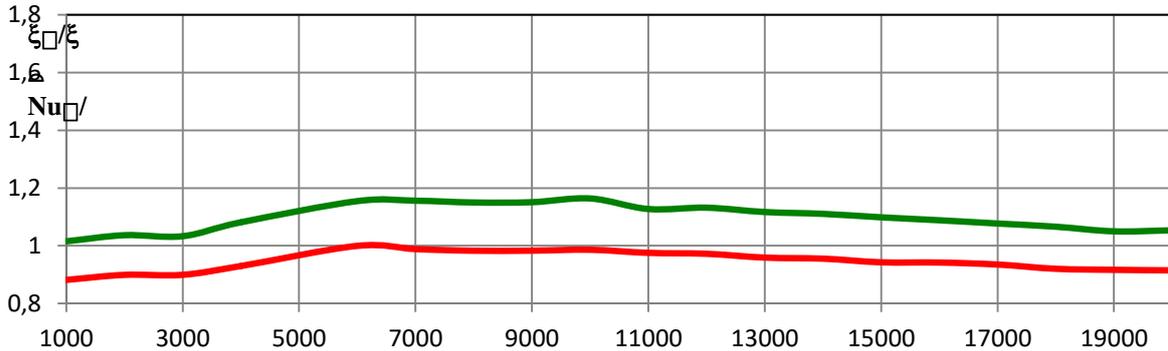


Рис. 1. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$   
 Fig. 1. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  and  $Pr = 0,72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Теплообмен изменяется почти таким же образом, как и гидравлическое сопротивление, но его уровень для плоских каналов с квадратными турбулизаторами ниже, чем с треугольными на (2,5÷10)%.

Для значений  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,56$  (рис. 2) соответствующее превышение гидравлического сопротивления на 15% имеет место при более низких числах Рейнольдса  $Re=2 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4$ , после чего оно становится около 10%; относительный теплообмен при 15%-ном превышении гидросопротивлении остаётся почти на том же уровне, а при  $Re > 9 \cdot 10^3$  снижается практически на 5%.

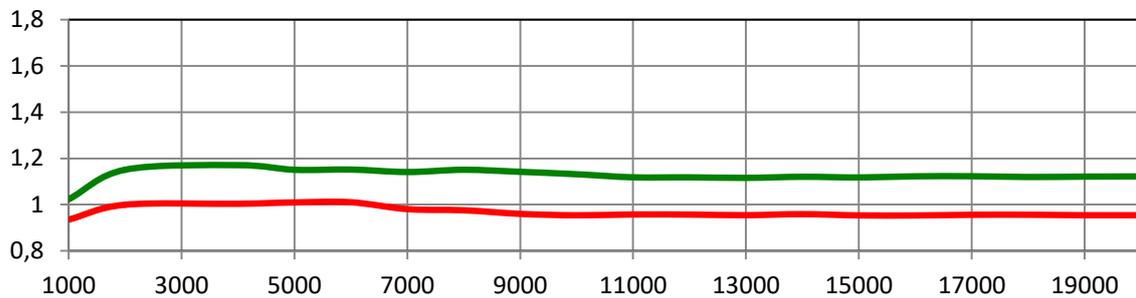


Рис. 2. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,56$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$   
 Fig. 2. Relative hydraulic resistance coefficient  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,56$  and  $Pr = 0,72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Для значений  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,84$  (рис. 3) относительное гидравлическое сопротивление увеличивается с ростом числа Рейнольдса, достигая порядка (15÷17)%; относительный теплообмен снижается примерно на (2÷3)%.

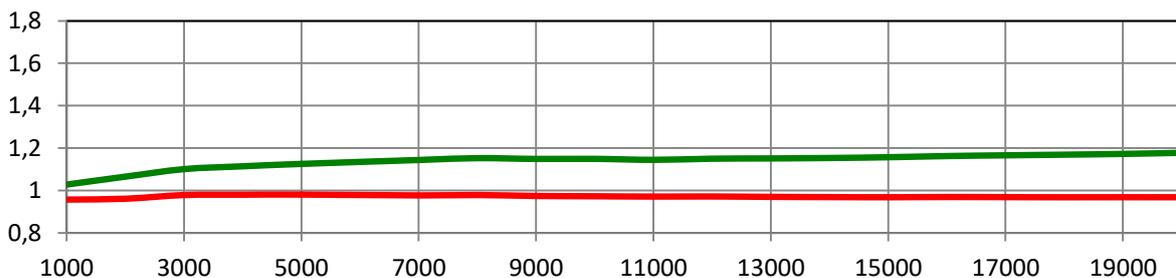
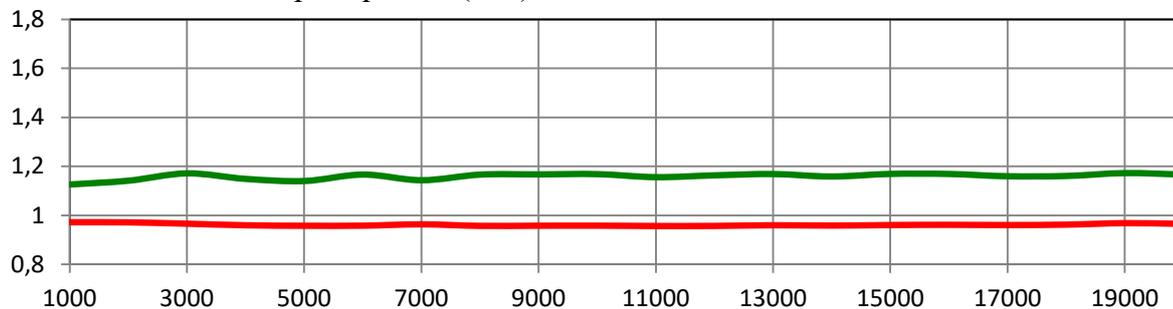


Рис. 3. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

**Fig. 3. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulizers at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$**

При более высоких турбулизаторах потока с  $h/d_3=0,102$  и  $t/d_3=1,02$  (рис. 4) для всех рассмотренных чисел Рейнольдса гидравлическое сопротивление в плоских каналах с квадратными турбулизаторами потока выше, чем для полукруглых примерно на  $(14 \div 16)\%$ ; относительный теплообмен снижается примерно на  $(3 \div 4)\%$ .



**Рис. 4. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=2,04$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$**

**Fig. 4. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulizers at  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=2,04$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$**

Для высоких турбулизаторов потока с  $h/d_3=0,102$  и с более широким шагом между турбулизаторами  $t/d_3 = 2,04$  (рис. 5) гидравлическое сопротивление в плоских каналах с квадратными турбулизаторами потока неуклонно повышается с увеличением числа Рейнольдса примерно на  $(15 \div 45)\%$ ; соответствующее повышение теплообмена тоже происходит почти монотонным образом, достигая порядка  $4\%$ .



**Рис. 5. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$**

**Fig. 5. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulizers at  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$**

**Относительные гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  для плоских каналов с треугольными турбулизаторами.** Значения относительного коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с треугольными турбулизаторами приводятся на рис. 23—27 в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ . Как видно из рис. 6, для условий  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,28$  относительное гидравлическое сопротивление в плоских каналах с квадратными турбулизаторами потока с ростом числа Рейнольдса по сравнению с треугольными турбулизаторами сначала увеличивается вплоть до  $Re=5 \cdot 10^3$  примерно до  $13\%$ , а затем неуклонно снижается: при значении  $Re=1,3 \cdot 10^4$  гидравлические сопротивления становятся равными, а при  $Re=2 \cdot 10^4$  гидравлическое сопротивление канала с треугольными турбулизаторами становятся больше примерно на  $12,5\%$ .

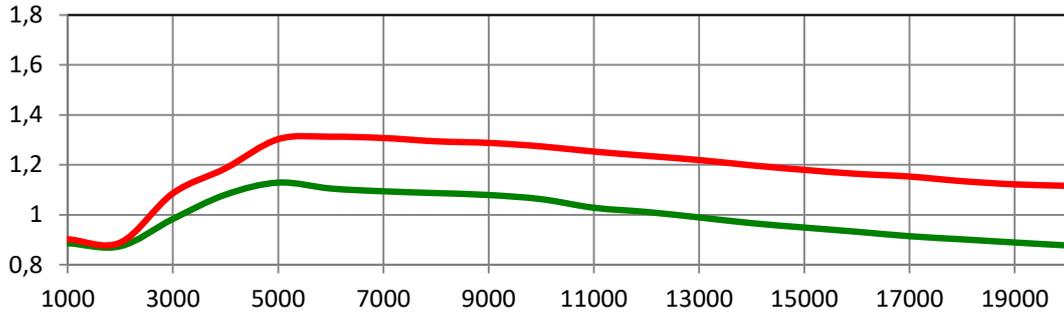


Рис. 6. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$   
 Fig. 6. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Относительный теплообмен изменяется сходным по отношению к числу Рейнольдса образом: сначала превалирование теплообмена в плоских каналах с квадратными турбулизаторами достигает немногим более 30%, а затем снижается вплоть до 11,5%.

При увеличении шага между турбулизаторами, т.е. для условий  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,56$ , изменение относительного теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  и относительного гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  происходит практически одинаковым образом: вплоть до  $Re=4 \cdot 10^3$  имеет место их увеличение почти до 30%, после чего имеет место их снижение, которое приводит к тому, что при  $Re=10^4$  относительные гидравлическое сопротивление и теплообмен для канала с квадратными турбулизаторами становятся меньше, чем с треугольными приблизительно на 10%; в дальнейшем, после  $Re > 10^4$ , данная разность стабилизируется и сохраняется вплоть до  $Re=2 \cdot 10^4$ . Дальнейшее увеличение шага между турбулизаторами ( $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,84$ ) (рис. 7) приводит к тому, что относительное гидравлическое сопротивление в каналах с квадратными турбулизаторами снижается по сравнению с треугольными на (2÷5)%.

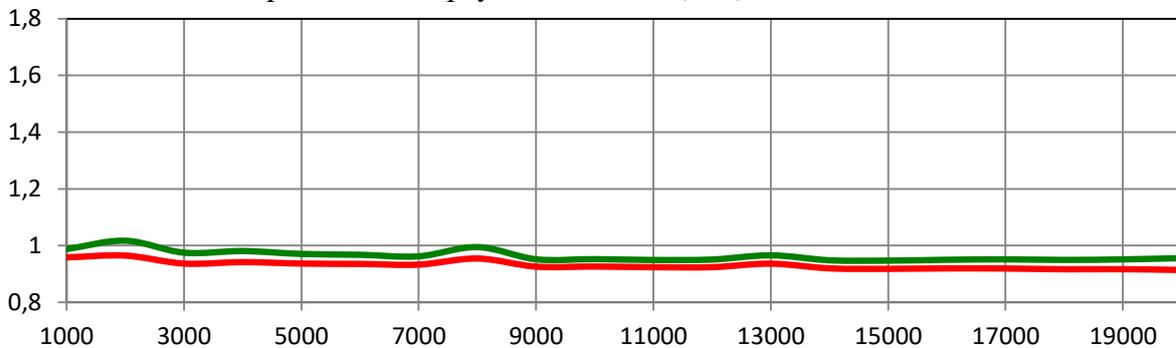


Рис. 7. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$   
 Fig. 7. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Относительный теплообмен снижается практически так же, как и относительное гидросопротивление, но несколько больше — на (6,5÷8,5)%. Для более высоких турбулизаторов с  $h/d_3=0,102$  и  $t/d_3=1,02$  относительные гидравлическое сопротивление и теплообмен в плоских каналах с квадратными и треугольными турбулизаторами потока ( $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$ ) изменяются примерно одинаковым образом: с увеличением числа Рейнольдса они немного уменьшаются на (7,5÷10,5)%. Для высоких турбулизаторов потока с  $h/d_3=0,102$  и с более широким шагом между турбулизаторами  $t/d_3=2,04$  (рис. 8) относительное гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$ , начиная с  $Re=5 \cdot 10^3$ , неуклонно увеличивается с единицы, достигая к  $Re=2 \cdot 10^4$  увеличения примерно в 5%; относительный теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  почти для всех чисел Рейнольдса меньше единицы приблизительно на 4,5%.

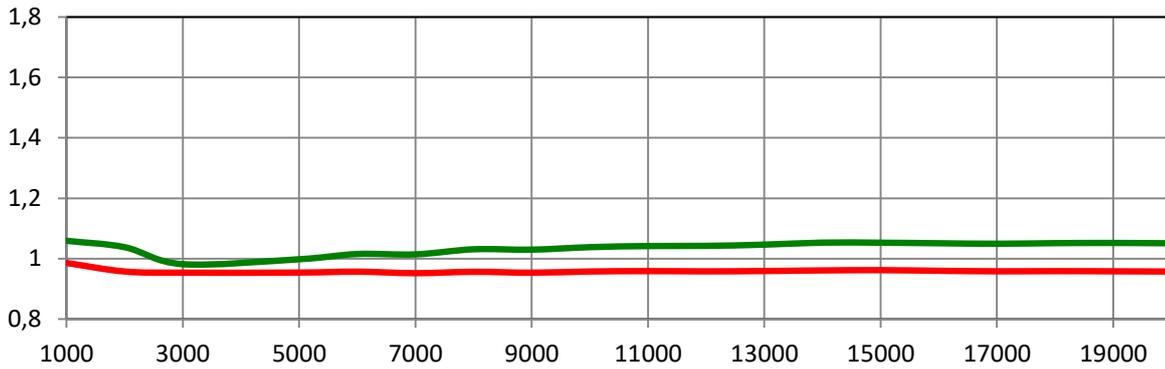


Рис. 8. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ .

Fig. 8. The relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\Delta}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\Delta}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

**Относительные гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  для плоских каналов с прямоугольными (ширина равна двум высотам) турбулизаторами.** Значения относительного коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  в плоских каналах с прямоугольными турбулизаторами приводятся на рис. 9-11 в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$ . При  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,28$  относительные теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  и гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  в плоских каналах с квадратными и прямоугольными турбулизаторами потока (рис. 9) с ростом числа Рейнольдса изменяются почти одинаково вплоть до  $Re=5 \cdot 10^3$ : до  $Re=4 \cdot 10^3$  эти значения незначительно увеличиваются примерно на 15%, а затем резко увеличиваются до 70%, после чего относительное гидравлическое сопротивление вплоть до значения  $Re=9 \cdot 10^3$  незначительно увеличивается до значений 75,5%, а затем неуклонно снижается, достигая при  $Re=2 \cdot 10^4$  уровня 50%.

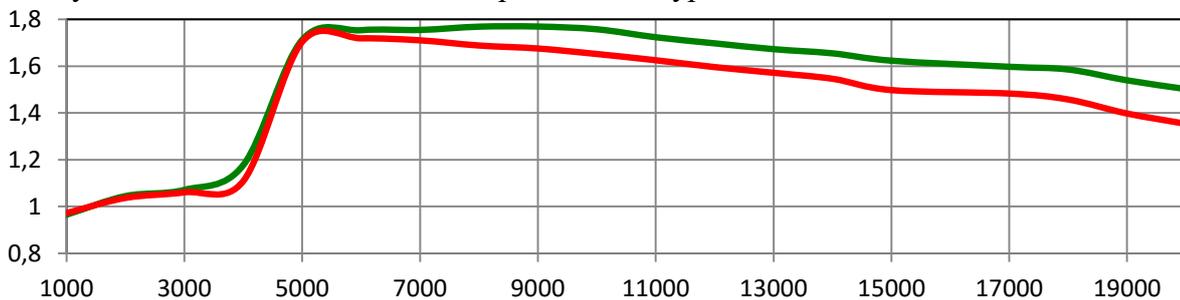


Рис. 9 Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Fig. 9 Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  in flat channels with semicircular turbulators at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,28$  and  $Pr = 0.72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Относительный теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  начинает почти неуклонно снижаться сразу же после отметки  $Re=5 \cdot 10^3$  и к отметке  $Re=2 \cdot 10^4$  достигает значения 35%. При увеличении шага между турбулизаторами, при  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,56$ , относительное гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  с ростом числа Рейнольдса сначала увеличивается и это увеличение при  $Re=6 \cdot 10^3$  достигает значения немногим более 15%, а затем снижается до  $Re=10^4$ , достигая 10%-ного увеличения. При повышении числа Рейнольдса относительное гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  медленно, но неуклонно увеличивается, достигая при  $Re=2 \cdot 10^4$  увеличения около 16%. Относительный теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  изменяется несколько по-другому: он сначала увеличивается, достигая к  $Re=4 \cdot 10^3$  увеличения в 10,5%, после чего он вновь сначала падает и достигает единицы при  $Re=1,1 \cdot 10^4$ , а затем незначительно увеличивается вплоть до значения приблизительно 2,5% в отметке  $Re=2 \cdot 10^4$ . При дальнейшем увеличении шага между турбулизаторами, т.е. при  $h/d_3=0,056$  и  $t/d_3=0,84$  (рис. 10), относительные гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмен  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  почти монотонным образом увеличиваются при увеличении числа Рей-

нольдса практически от единицы, достигая к  $Re=2 \cdot 10^4$  увеличения в 18,5% для относительного гидравлического сопротивления и увеличения в 4,5% для относительного теплообмена.

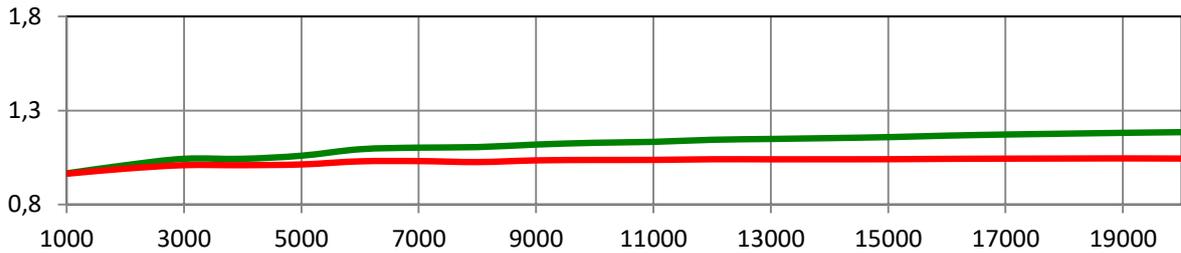


Рис. 10. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Fig. 10. Relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  in flat channels with semicircular turbulizers at  $h/d_3=0,056$ ,  $t/d_3=0,84$  and  $Pr = 0,72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Для относительно более высоких турбулизаторов с  $h/d_3=0,102$  и  $t/d_3=1,02$  относительное гидравлическое сопротивление в плоских каналах с квадратными и прямоугольными турбулизаторами потока  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  сначала заметно увеличивается вплоть до  $Re=3 \cdot 10^3$  примерно до 18%-ного уровня, а затем это увеличение происходит довольно слабым образом, достигая к  $Re=2 \cdot 10^4$  уровня в 21%. Значения относительного теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  почти для всех чисел Рейнольдса колеблются в районе превышения единицы на (3÷4)%.

Для турбулизаторов с более широким шагом между турбулизаторами  $t/d_3=2,04$  и большой относительной высоты  $h/d_3=0,102$  (рис. 11) относительное гидравлическое сопротивление  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  более заметно увеличивается с единицы примерно до отметки  $Re=6 \cdot 10^3$ , достигая практически 24%-ного увеличения, после чего увеличение происходит менее заметно, достигнув к  $Re=2 \cdot 10^4$  значения 28%.

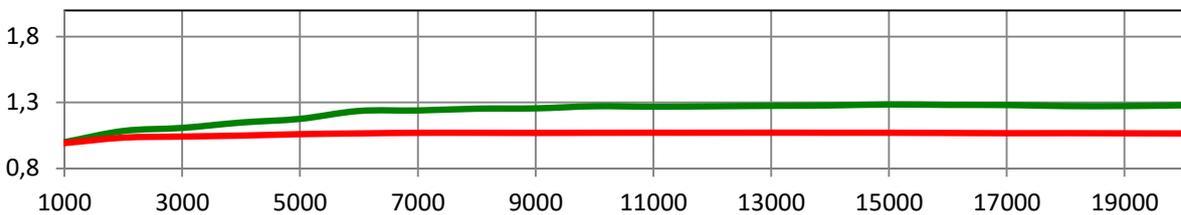


Рис. 11. Относительные коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  и теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  в плоских каналах с полукруглыми турбулизаторами при  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  и  $Pr=0,72$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Fig. 11. The relative coefficient of hydraulic resistance  $\xi_{\square}/\xi_{\square}$  and heat exchange  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  in flat channels with semicircular turbulizers at  $h/d_3=0,102$ ,  $t/d_3=1,02$  and  $Pr = 0,72$  depending on the Reynolds number  $Re=10^3 \div 2 \cdot 10^4$

Увеличение относительного теплообмена  $Nu_{\square}/Nu_{\square}$  для этих условий происходит довольно медленно: до отметки  $Re=7 \cdot 10^3$  имеет место увеличение относительного теплообмена до 7%, после чего это увеличение практически стабилизируется. Общее сравнение полученных в данной статье расчётных данных с опытным материалом, приведенным в [22], показывает их вполне удовлетворительную корреляцию между собой. В работе [22] разница между гидросопротивлениями в плоских каналах с двойными симметричными турбулизаторами различных поперечных сечений достигает порядка трети, что независимым образом подтверждается полученными в рамках данной статьи расчётными данными.

**Вывод.** 1. Сгенерирована модель расчёта для интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении для плоского канала, с симметрично расположенными на обеих его сторонах турбулизаторами различного поперечного сечения (квадратного, прямоугольного, треугольного, полукруглого) в зависимости от геометрических параметров канала и режимов течения теплоносителя. Ранее подобное было реализовано только для квадратных турбулизаторов в [22], где отмечалась потенциальная возможность применения метода для других видов турбули-

затов.

2. Получены результаты расчёта интенсифицированного теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами различных поперечных сечений (квадратного, прямоугольного, полукруглого, треугольного) в зависимости от определяющих параметров вполне удовлетворительно согласующиеся с существующим экспериментальным материалом, но имеющие перед последними неоспоримое преимущество, т.к. допущения, принятые при их выводе, охватывают гораздо более широкий диапазон определяющих параметров, чем ограничения, имеющиеся в экспериментах ( $Pr=0,7\div 100$ ;  $Re=10^3\div 10^6$ ;  $h/d_3=0,005\div 0,2$ ;  $t/h=1\div 200$ ).

3. При интенсификации теплообмена в плоских каналах симметричными выступами квадратного, прямоугольного и треугольного поперечных сечений, т.е. сравнительно резких очертаний, в вихрях до выступов и за ними выработка турбулентности сопоставима с диссипацией энергии, что приводит к увеличенным гидравлическим потерям; для плоских каналов с выступами полукруглого поперечного сечения, т.е. сравнительно плавных очертаний, диссипация энергии гораздо меньше, поэтому и гидравлическое сопротивление в таких каналах меньше.

4. Проведён подробный анализ структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными в плоском канале турбулизаторами потока квадратного, полукруглого, треугольного и прямоугольного поперечных сечений в зависимости от геометрических и режимных параметров течения теплоносителя, выявлено влияние вышеуказанных вихревых зон теплообмен и гидравлическое сопротивление канала; подтверждена оптимальность применения к абьютированным турбулизаторам, где гидравлические потери много меньше, чем для турбулизаторов резких очертаний, что прямо или косвенно верифицируется существующим экспериментальным материалом [1-6].

#### Библиографический список:

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп, и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
3. Han J.C., Park J.S., Ibrahim M.Y. Measurement of heat transfer and pressure drop in rectangular channel with turbulence promoters // NASA Contractor Rep. 4015. Texas AEM University College Station. Texas, 1986. 200 p.
4. Han J.C., Park J.S. Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators // Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. V. 31. № 1. P. 183195.
5. Павловский В.Г., Дедусенко Ю.М. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в коротком плоскопараллельном канале с искусственно шероховатыми стенками // Инженерно-физический журнал. 1969. Т. XVII. № 6. С. 1098—1101.
6. Павловский В.Г. Определение тепловой эффективности турбулизации воздушного потока в гидродинамическом начальном участке плоскопараллельного канала // Депон. ВИНТИ АН СССР. 1969. № 630.
7. 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 академика РАН А.И.Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 57—60.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Труды VI Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2008. Секция № 1. Конвективный тепломассообмен. Доклад № 1.27. С. 1—10.
12. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А.Исаев, А.С.Мякочин, А.А.Низовитин, И.Е.Лобанов, О.А.Бояркина // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 2010. С. 84-87.
13. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей /С.А.Исаев, П.А. Баранов, М.А.Готовский, А.С.Мякочин, А.А.Низовитин, И.Е.Лобанов // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 66.
14. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей /С.А.Исаев, П.А. Баранов, М.А.Готовский, А.С.Мякочин, А.А.Низовитин, И.Е.Лобанов // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: сборник докладов. М., 2011. Секция 2. Доклад № 20. С. 1—34.
15. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 64—66.
16. 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.
17. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 7. С. 45—58.

18. Лобанов И.Е. Математическое моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока полукруглого и квадратного поперечного сечения // *Отраслевые аспекты технических наук*. 2012. № 9. С. 11—30.
19. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. — М.: МАИ, 2005. 632 с.
20. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 405 с.
21. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // *Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4*. — New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. P. 425—432.
22. Лобанов И.Е. Математическое моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока полукруглого, квадратного и треугольного поперечного сечения // *Электронный научный журнал "Исследования технических наук"*. 2016. Выпуск 2 (20). Апрель—Июнь. С. 3-20.
23. Лобанов И.Е. Математическое низкорейнольдсовое моделирование теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с симметрично расположенными на обеих сторонах турбулизаторами // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. Том 45. № 2. С 70-93. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-70-93.

#### References:

1. *Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z. Kopp, i dr. M.: Energoatomizdat, 1998. 408 s. [Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z. Kopp, i dr. M.: Energo-atomizdat, 1998. 408 s. Effective heat exchange surfaces / E.K. Kalinin, G.A. Dreytser, I.Z. Kopp, et al. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 408 p. (In Russ.)]*
2. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 220 s. [Kalinin, E.K., Dreytser, G.A., Yarho, S.A. Intensification of heat transfer in the channels. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 220 p. (In Russ.)]
3. Han J.C., Park J.S., Ibrahim M.Y. Promotors // *nasa Contactor Rep.* 4015. Texas AEM University College Station. - Texas, 1986. 200 p.
4. Han J.C., Park J.S. Developing heat transfer with rib turbulators // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1988. V. 31. No. 1. R. 183195.
5. Pavlovskiy V.G., Dedusenko YU.M. Teploobmen i gidravlicheskiye soprotivleniye v korotkom plo-skoparallel'nom kanale s iskusstvenno sherokhovatyimi stenkami // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1969. T. XVII. № 6. С. 1098—1101. [Pavlovsky V.G., Dedusenko Yu.M. Heat transfer and hydraulic resistance in a short plane-parallel channel with artificially rough walls // *Engineering Physics Journal*. 1969. T. XVII. № 6. С. 1098-1101. (In Russ.)]
6. Pavlovskiy V.G. Opredeleniye teplovoy effektivnosti turbulizatsii vozdushnogo potoka v gid-rodinamicheskom nachal'nom uchastke ploskoparallel'nogo kanala // *Depon. VINITI AN SSSR*. 1969. № 630. [Pavlovsky V.G. Determination of thermal efficiency of air flow turbulization in the hydrodynamic initial section of a plane-parallel channel // *Depon. VINITI Academy of Sciences of the USSR*. 1969. No. 630. (In Russ.)]
7. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskiimi 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 protrusions // *Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: Proceedings of the XIV School-Seminar of Young Scientists and Specialists under the supervision of Academician of RAS A.I. Leontiev*. M.: MEI, 2003. T. 1. S. 57-60. (In Russ.)]
8. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskiimi 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. S. 28—35. (In Russ.)]
9. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschot konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskiimi raspolozhennymi poverkhnostnyimi turbulatorami 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 located surface flow turbulators // *High Temperature Thermal Physics*. 2005. T. 43. No. 2. P. 223-230. (In Russ.)]
10. Kalinin E.K., Lobanov I.Ye. Problemy issledovaniya teploobmennyykh protsessov pri techeniyakh od-nofaznykh sred na etape uspehnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya // *Tezisy dokladov i soob-shcheniy 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 in flows of single-phase media at the stage of successful development of numerical simulation // *Abstracts of reports and communications of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*. Minsk, 2008. V. 1. S. 101-103. (In Russ.)]
11. Kalinin E.K., Lobanov I.Ye. Problemy issledovaniya teploobmennyykh protsessov pri techeniyakh od-nofaznykh sred na etape uspehnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya // *Trudy VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu*. Minsk, 2008. Sektsiya № 1. Konvektivnyy teplomas-soobmen. Doklad № 1.27. S. 1—10. [Kalinin, E.K., Lobanov, I.E. Problems of research of heat exchange processes in flows of single-phase media at the stage of successful development of numerical simulation // *Works of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*. Minsk, 2008. Section No. 1. Convective heat and mass exchange. Report number 1.27. S. 1-10. (In Russ.)]
12. Vikhrevaya intensivatsiya konvektivnogo teploobmena pri turbulentnom techenii vozdukh i masla v trubakh i kanalakh s periodicheskimi elementami diskretnoy sherokhovatosti / S.A.Isayev, A.S. Mya-kochin, A.A. Nizovitin, I.Ye.Lobanov, O.A.Boyarkina // *Trudy Pyatoy Rossiyskoy natsional'noy kon-ferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. Tom 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozh-nyy 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.Isayev, A.S. Mya-Cochin, A.A. Nizovitin, I.E. Lobanov, O.A. Boyarkina // *Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Exchange*. In 8 volumes. Volume 6. Heat transfer intensification. Radiation and complex heat transfer. M.: MEI, 2010. S. 84-87. (In Russ.)]
13. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob'yomnymi i poverkhnostnyimi vikhregeneratorami dlya ne-odnorodnykh teplonositeley / S.A.Isayev, P.A. Baranov, M.A.Gotovskiy, A.S.Myakochin, A.A.Nizovitin, I.Ye.Lobanov // *Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh: Chetvor-taya mezhdunarodnaya konferentsiya: tezisy dokladov*. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2011. S. 66. [Intensification of heat transfer in pipes with volumetric and surface vortex generators for non-uniform heat carriers / S.A.Isayev, P.A. Baranov, M.A.Gotovskiy, A.S.Myakochin, A.A.Nizovitin, I.E. Lobanov // *Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows: Fourth International Conference: Abstracts of Reports*. M.: Publishing House MEI, 2011. P. 66. (In Russ.)]
14. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob'yomnymi i poverkhnostnyimi vikhregeneratorami dlya ne-odnorodnykh teplonositeley / S.A.Isayev, P.A. Baranov, M.A.Gotovskiy, A.S.Myakochin, A.A.Nizovitin, I.Ye.Lobanov // *Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh: Chetvor-taya mezhdunarodnaya konferentsiya: sbornik dokladov*. M., 2011. Sektsiya 2. Doklad № 20. S. 1—34. [Intensification of heat exchange in pipes with volumetric and surface vortex generators for non-uniform heat carriers / S.A.Isayev, P.A. Baranov, M.A.Gotovskiy, A.S.Myakochin, A.A.Nizovitin, I.E.Lobanov // *Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows: Fourth International Conference: collection of reports*. M., 2011. Section 2. Report number 20. P. 1—34. (In Russ.)]
15. Lobanov I.Ye. Teoreticheskoye issledovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdur periodicheskimi, po-verkhnostno raspolozhennymi turbulatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Iz-vestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*. 2011. № 4. S. 64—66. [Lobanov I.E. Theo-

- retical study of the structure of the vortex zones between periodic, surface-located turbulizers of a rectangular cross-section flow // *Izvestia Vuzov. Aviation technology*. 2011. No. 4. P. 64–66. (In Russ.)]
16. Lobanov I.Ye., Kalinin E.K. Teoreticheskoye issledovaniye, sopostavleniye s eksperimentom liniy toka i sostavlyayushchikh kineticheskoy energii turbulentnykh pul'satsiy v vikhrevykh strukturakh v tru-bakh s turbulizatorami // *Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk*. 2011. № 12. S. 4-15. [Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and components of the kinetic energy of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulizers // *Sectoral Aspects of Technical Sciences*. 2011. № 12. pp. 4-15. (In Russ.)]
17. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno ras-polozhennymi turbulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2012. T. 24. № 7. S. 45–58. [Lobanov I.E. Modeling the structure of the vortex zones between periodic surface-distributed turbulators of a flow of rectangular cross section // *Mathematical modeling*. 2012. V. 24. No. 7. P. 45–58. (In Russ.)]
18. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi po-verkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka polukruglogo i kvadratnogo poperechnogo secheniya // *Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk*. 2012. № 9. S. 11–30. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of the structure of the vortex zones between periodic surface-located turbulizers of semicircular and square cross-section flow // *Sectoral Aspects of Technical Sciences*. 2012. № 9. S. 11-30. (In Russ.)]
19. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchono stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. — M.: MAI, 2005. 632 s. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat exchange in turbulent flow in canals: Thesis for the degree of doctor of technical sciences. - M.: MAI, 2005. 632 p. (In Russ.)]
20. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym tep-loobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskoye proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom I. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniym osnovnykh analiticheskikh i chislennykh metodov. — M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. 405 s. [Lobanov I.E., Stein L.M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (The general theory of intensified heat exchangers for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of the intensified heat exchange at a turbulent flow in the channels with using basic analytical and numerical methods. - M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009. 405 p. (In Russ.)]
21. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // *Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4*. - New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. P. 425-432.
22. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka polukruglogo, kvadratnogo i treugol'nogo poperechnogo secheniya // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Issledovaniya tekhnicheskikh nauk"*. 2016. Vypusk 2 (20). April–Iyun'. S. 3–20. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of the structure of the vortex zones between periodic surface-located turbulizers of a semicircular, square and triangular cross-section flow // *Electronic scientific journal "Research in Technical Sciences"*. 2016. Issue 2 (20). April June. Pp. 3-20. (In Russ.)]
23. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye nizkoreynol'dsovoye modelirovaniye teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s simmetrichno raspolozhennymi na obeikh storonakh turbulizatorami // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*. 2018. Tom 45. № 2. S 70-93. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-70-93. [Lobanov I.E. Mathematical low-rate modeling of heat exchange in turbulent flow in flat channels with turbulators symmetrically located on both sides // *Herald of Daghestan State Technical University. Technical science*. 2018. Volume 45. No. 2. C 70-93. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2018-45-2-70-93. (In Russ.)]

**Сведения об авторе:**

**Игорь Евгеньевич Лобанов** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ) – 204.

**Information about the author.**

**Igor' E.Lobanov** - Dr. Sci. (Technical), Leading researcher, Problematic scientific-research Laboratory – 204

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 24.01.2019.

Принята в печать 02.03.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

Received 24.01.2019.

Accepted for publication 02.03.2019.

**Для цитирования:** Хурамушина Р.А., Ямалов А.И. Влияние состава сжиженного природного газа и технологических характеристик хранилищ стартового оборудования на время наступления явления ролловера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1):66-78. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

**For citation:** Khuramshina R.A., Yamalov A.I. The impact of liquefied natural gas composition and technological characteristics of the starting storage of the equipment at the time of occurrence of the phenomenon of rollover. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(1):66-78.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.7.036

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРАНИЛИЩ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВРЕМЯ НАСТУПЛЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ РОЛЛОВЕРА

**Хурамушина Р.А.<sup>2</sup>, Ямалов А.И.<sup>1</sup>**

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

<sup>1</sup>e-mail: azatyamalov@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru,

**Резюме. Цель.** Способы предотвращения наступления ролловера в хранилище сжиженного природного газа. **Метод.** В статье рассматриваются современные методы математического моделирования и программного обеспечения при решении задач в нелинейной постановке. Проведен нормативный анализ существующих методов транспортировки СПГ. **Результат.** С помощью математической программы ANSYS смоделирован процесс ролловера в хранилище сжиженного природного газа. В программном комплексе ANSYS было произведено 3d моделирование процесса тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа. При моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,7 %. По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от концентрации компонентных слоев, от заполнения и геометрии резервуара. Эти факторы приводят к увеличению испарения сжиженного природного газа 0,04 %. **Вывод.** Метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам. Применение программного комплекса ANSYS вычислительной гидрогазодинамики при процессе тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа необходима при расчете повышенной точности.

**Ключевые слова:** математическая модель, сжиженный природный газ, программный комплекс ANSYS, газодинамика, процесс тепло и массообмена, страфицированная жидкость, хранилище сжиженного природного газа, ролловер, двухтопливные двигатели

## POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

### THE IMPACT OF LIQUEFIED NATURAL GAS COMPOSITION AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE STARTING STORAGE OF THE EQUIPMENT AT THE TIME OF OCCURRENCE OF THE PHENOMENON OF ROLLOVER

Regina A. Khuramshina<sup>2</sup>, Azat I. Yamalov<sup>1</sup>

Ufa State Petroleum Technological University,

1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: azatyamalov@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

**Abstract Objectives** Ways to prevent the onset of rollover in the liquefied natural gas storage.

**Method.** The article deals with modern methods of mathematical modeling and software when solving problems in a nonlinear formulation. A regulatory analysis of existing methods of LNG transportation has been carried out. **Result.** Using the mathematical program ANSYS, the rollover process in the liquefied natural gas storage was modeled. In the ANSYS software package, 3d modeling of the process of heat and mass transfer of the stratified liquid in the liquefied natural gas storage was performed. When simulating a rollover phenomenon, the time to its occurrence was 30 minutes, which differs from the experimental value by 1.7%. Based on the results of the calculations, it can be determined that the time to the onset of rollover depends on the concentration of the component layers, on the filling and geometry of the reservoir. These factors lead to an increase in evaporation of liquefied natural gas of 0.04%. **Conclusion.** The method of numerical experiment allows to determine the distribution of pressure, temperature, density, concentration in the object under study, without resorting to real experiments. The use of the ANSYS software package of computational fluid dynamics in the process of heat and mass transfer of the stratified liquid in the liquefied natural gas storage is necessary when calculating the increased accuracy.

**Keywords:** mathematical model, liquefied natural gas, ANSYS program complex, gas dynamics, heat and mass transfer process, stratified liquid, liquefied natural gas storage, rollover, dual-fuel engines

**Введение** Природный газ является сегодня и останется на обозримую перспективу жизненно важным компонентом в обеспечении глобальных потребностей из-за своих преимуществ перед другими видами ископаемого топлива и в силу постоянной растущей в нем потребности. Большая часть газа доставляется потребителям по трубопроводам в газообразной форме. В некоторых случаях транспортировка сжиженного природного газа в танкерах предпочтительнее, чем другие способы доставки. Использование СПГ потребует существенного обновления судов, работающих в Арктике. Но это в любом случае придется делать, учитывая значительный возраст арктического флота России. СПГ позволит снизить риск разливов судового остаточного топлива, уменьшить выбросы в воздух загрязняющих веществ. Активные действия в этой области позволят усилить позиции российских производителей на быстро развивающемся мировом рынке СПГ топлива, продолжить освоение самых современных технологий мирового судостроения.

Переход на использование СПГ в качестве бункерного топлива позволит решить еще одну важнейшую экологическую проблему – аварийных разливов судового топлива, особенно при наличии ледового покрова. При использовании СПГ в системах хранения на стартовом комплексе существует возможность протекания негативного явления, получившего название «ролlover», возникающего при дозаправке емкости хранилища новой дозой СПГ, физические параметры которой отличаются от имеющейся, с возникновением через некоторое время перемешивания новой и имеющейся в хранилище порций СПГ с резким увеличением давления в газовой подушке. Данный рост давления может привести к разрушению хранилища и разливу компонента, а при возникновении искры и к пожару на стартовом комплексе космодрома.

Время наступления процесса перемешивания СПГ с резким увеличением давления после дозаправки хранилища по проведенным оценкам [4, 6] и экспериментальным данным [7] может составлять от нескольких часов до десятков часов. Определение времени наступления ролловера является важным вопросом безопасности при хранении СПГ на стартовых комплексах. Из-за разных технологических систем хранения, в случае малого времени до протекания явления, необходимо применение специальных средств для исключения последствий ролловера, которые должны предусматриваться при проектировании данной системы.

На изменение кондиционности СПГ могут влиять: расслоение СПГ в емкостях хранилища в результате периодического пополнения их, в том числе при обратном сливе из баков потребителя продуктом, имеющим иную плотность и состав по сравнению с остатком СПГ в резервуарах; попадание примесей из газов подготовки к заправке емкостей хранилища, заправочных трубопроводов и баков потребителя; попадание примесей из газов наддува баков потребителя.

Одним из важных факторов опасности СПГ являются его низкая температура кипения, что не позволяет обеспечить его хранение без потерь, а также изменение состава (плотности) и температуры кипения СПГ при хранении за счет испарения более легкого компонента (метана). Данные факторы при пополнении хранилищ, имеющих остатки топлива, новой порцией СПГ, с плотностью и температурой, отличающейся от аналогичных параметров в остатке топлива, могут приводить к образованию стратифицированных макро слоев СПГ в хранилище [3,4]. При последующем протекании тепло- и массообменных процессов в слоях СПГ возможно возникновение режима интенсивного перемешивания (явление «ролловер») с практически мгновенным испарением больших масс СПГ и резким повышением давления в хранилище. Все это способствует и разрушению хранилища и интенсификации неблагоприятных технологических процессов [5]. Схематическая картина механизмов ролловера указанного явления кратко проиллюстрирована на рис. 1.



**Рис. 1. Перемешивание слоев при закачке продукта в резервуар с процессами тепло- и массообмена**

**Fig. 1. Mixing of layers during the injection of the product into the tank with the processes of heat and mass transfer**

Заметим, что физическая модель процесса отличается тем, что при загрузке резервуара свойства продукта, уже хранящегося в изотермическом резервуаре (ИР), отличаются от свойств СПГ, закачиваемого в резервуар. В ИР, оборудованных системой нижнего налива, СПГ, имеющий большую плотность, образует нижний слой. СПГ, имеющий меньшую плотность, формирует верхний слой, который располагается над поверхностью нижнего, не перемешиваясь с ним. Перегреваясь относительно температуры насыщения за счет внешнего теплопритока через днище и стенки, продукт в нижнем слое при этом не имеет возможности компенсировать теплоприток за счет испарения, т.к. поверхность теплообмена закрыта нижним слоем. Однако имеют место процессы тепло- и массообмена двух слоев между собой и верхнего слоя с парогазовой фазой. В конечном итоге, в определенный момент времени после загрузки и образования стратификации, за счет описанных выше процессов плотности слоев выравниваются с последующей резкой интенсификацией процессов испарения продукта (суть явления ролловер). Математическое моделирование явления ролловера целесообразно проводить на базе уравнений математической физики, характеризующих взаимосвязанные нелинейные процессы пере-

носа теплоты, массы и импульса. В частности, моделирование тепловой части задачи будем проводить с использованием уравнения энергии в энтальпийной форме.

**Постановка задачи.** Имеется сферический резервуар, объемом 100000 м<sup>3</sup>. Резервуар наполовину заполнен сжиженным природным газом, который представляет собой многокомпонентное рабочее тело, находящееся в жидком агрегатном состоянии. После закачки в резервуар дополнительного объема СПГ он становится заполнен полностью. При этом в начальный момент времени можно выделить два слоя СПГ: нижний слой и верхний слой. Рабочее тело в этих слоях отличается компонентным составом, а также давлением и температурой. Параметры рабочего тела в верхнем и нижнем слое представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Параметры компонентов рабочего тела**  
**Table 1. Parameters of the working body components**

Компонента (растворенного вещества) Component (solute)	Количество молей вещества Moles of substance	
	Нижний слой Bottom layer	Верхний слой Top layer
Метан Methane	0,6226	0,6362
Этан Ethane	0,2185	0,2416
Пропан+примеси Propane + impurities	0,1589	0,1222
Начальные свойства СПГ LNG Initial Properties		
T, К	118,997	114,355
P, МПа	0,15	0,131
ρ, кг/м <sup>3</sup>	541,0316	536,9516

Требуется смоделировать явление ролловера, происходящее в резервуаре в течение 30 минут.

**Методы исследования.** Физические свойства всех компонент рабочего тела задавались в соответствии с данными работы [6]. Принималось, что все теплофизические свойства компонент постоянны, что допустимо при условии небольших перепадов температуры внутри расчетной области. Физические свойства всех компонент приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Физические свойства компонентов рабочего тела**  
**Table 2. Physical properties of the components of the working fluid**

Химическая компонента Chemical component	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg / m <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/кгК Specific heat, j / kg·K	Удельная теплопроводность, Вт/м·К Heat conductivity, W / m·K	Вязкость, кг / м·с Viscosity, kg / m·s	Молярная масса, кг/моль Molar mass, kg / mol
CH <sub>4</sub>	415,2	5477	0,6	2,1	16,043
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	561,0	2990	0,6	87,8	30,070
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +примеси+impurities	493,1	2230	0,6	0,01	44,090

При определении осреднённых свойств гомогенного потока в контрольном объёме V, ограниченном замкнутой поверхностью A, система уравнений механики сплошной среды записывалась в интегральной декартовой форме в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \iint_A [F - G] \cdot dA = \int_V H dV, \quad (1)$$

где вектора W, F и G определяются следующим образом

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v + p j \\ \rho w + p k \\ \rho E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Вектор  $H$  содержит источниковые члены.

где  $\rho$ ,  $v$ ,  $E$ ,  $p$  – плотность, скорость, полная энергия на единицу массы и давление среды в контрольном объеме;

$\tau$  – тензор вязких напряжений;

$q$  – плотность теплового потока.

Полная энергия  $E$  связана с полной энтальпией  $H$  следующим соотношением

$$E = H - p / \rho, \quad (3)$$

$$\text{где } H = h + |v|^2 / 2. \quad (4)$$

Для каждого из компонентов многокомпонентного рабочего тела решалось отдельное уравнение переноса массы в виде

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i C_i) + \nabla \cdot (\rho_i \vec{v} C_i) = -\nabla \cdot \vec{g}_i + \omega_i, \quad (5)$$

где  $C_i$  – локальная массовая концентрация  $i$ -го компонента;

$\vec{g}_i$  – диффузионный поток  $i$ -го компонента;

$\omega_i$  – скорость образования  $i$ -го компонента в химических реакциях.

В уравнении (5) члены слева направо учитывают: нестационарность процесса переноса массы вещества, перенос массы вещества за счет конвекции, перенос массы вещества диффузией, источник массы вещества, обусловленный наличием химических реакций. Последний член в правой части уравнения (5) принимался равным нулю.

Диффузионный поток массы  $\vec{g}_i$  вычислялся по закону Фика. Для моделирования диффузии массы выражение для диффузионного потока может быть записано в следующем виде (для турбулентных потоков)

$$\vec{g}_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}, \quad (6)$$

где  $D_{i,m}$  – коэффициент ламинарной диффузии массы для  $i$ -го компонента;

$\mu_t$  – турбулентная вязкость;

$Sc_i$  – турбулентное число Шмидта;

$Y_i$  – массовая концентрация  $i$ -го компонента;

$D_{T,i}$  – коэффициент термической диффузии (коэффициент Соре);

$T$  – статическая температура.

В данной математической модели коэффициент  $D_{i,m}$ , который представляет собой коэффициент ламинарной диффузии массы для каждого  $i$ -го компонента, был заменен на один бинарный коэффициент  $D$ .

Такой подход гарантирует то, что сумма диффузионных потоков будет равна нулю. Значение коэффициента  $D$  вычислялось в предположении, что число Льюиса равно единице.

$$D = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (7)$$

где  $k$  – удельная теплопроводность смеси;

$\rho$  – плотность смеси;

$c_p$  – удельная теплоёмкость смеси.

Турбулентное число Шмидта записывается следующим образом:

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}, \quad (8)$$

где  $D_t$  – коэффициент турбулентной диффузии массы;  
 $\rho$  – плотность смеси.

В рамках данной работы рассматриваются течения с большими числами Рейнольдса. По этой причине с целью моделирования турбулентных эффектов вышеописанная математическая модель была дополнена гибридной моделью турбулентности TransitionSST, которая показывает достаточно достоверные результаты для большинства задач, связанных с естественной конвекцией.

Модель турбулентности TransitionSST представляет собой гибридную модель, которая была получена путем модификации модели турбулентности SSTk- $\omega$ . Известно [6], что модель турбулентности SSTk- $\omega$  основана на осреднении по Рейнольдсу и относится к классу моделей вихревой вязкости. Она решает два уравнения переноса скалярной величины: одно для турбулентной кинетической энергии  $k$  и одно для частоты турбулентных пульсаций  $\omega$ .

Модель турбулентности TransitionSST была получена путем дополнения модели SSTk- $\omega$ , ещё двумя уравнениями: одно уравнение для перемещаемости и одно для критерия начала перехода в членах числа Рейнольдса по толщине потери импульса. Эмпирические коэффициенты модели турбулентности были подобраны таким образом, чтобы обеспечить достоверные результаты во всем диапазоне чисел Рейнольдса, особенно при моделировании обтекания тел потоками газа с низкой начальной турбулизацией.

Уравнение переноса для перемещаемости  $\gamma$  имеет следующий вид

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right]. \quad (9)$$

Переходные источниковые члены в уравнении (9) имеют следующий вид

$$P_{\gamma 1} = C_{a1} F_{length} \rho S [\gamma F_{onset}]^{c_{\gamma 3}}; \quad (10)$$

$$E_{\gamma 1} = C_{e1} P_{\gamma 1} \gamma, \quad (11)$$

где  $S$  – величина сдвиговых напряжений;

$F_{length}$  – эмпирическая функция, отвечающая за длину переходной области течения:  $C_{a1} = 2,0$ ;  $C_{e1} = 1,0$  – эмпирические константы.

Уравнение переноса для переходного числа Рейнольдса по толщине потери импульса  $Re_{\theta t}$  имеет следующий вид

$$\frac{\partial(\rho Re_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j Re_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial Re_{\theta t}}{\partial x_j} \right]. \quad (12)$$

Присутствующие в уравнении (22) эмпирические константы имеют следующие значения

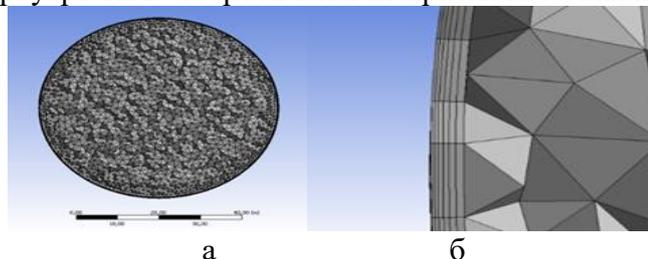
$$c_{\theta t} = 0.03, \quad \sigma_{\theta t} = 2.0. \quad (13)$$

Выбор эмпирических функций для переменных  $Re_{\theta t}$ ,  $F_{length}$  и  $Re_{\theta c}$  подробно описывается в работе [7]. Известно, для того чтобы решить дискретные аналоги уравнений Навье-Стокса и всех дополнительных моделей необходимо задать граничные условия, которые определяют поведение всех уравнений на границах расчётной области.

В рамках данной работы сферическая расчётная область ограничивалась поверхностью, представляющей собой твердую стенку для которой задавались следующие параметры: для уравнений количества движения – условие прилипания (принималось, что на поверхности нормальная и касательная компоненты вектора скорости потока равны нулю ( $u_x = 0$ ,  $u_y = 0$ ,  $u_z = 0$ )); для уравнения энергии – условие адиабатичности (данное условие является граничным условием второго рода; предполагается, что тепловые потоки в стенку равны нулю, теплообмен

между пространством резервуара и окружающей средой отсутствует; для уравнений переноса химических компонентов концентрации всех компонентов на поверхности определялись путем интерполяции из ячеек вверх по потоку.

**Обсуждение результатов.** Для решения поставленной задачи была построена неструктурированная расчетная сетка размерностью 830000 ячеек, которая показана на рис. 2. Для достоверного моделирования градиентов физических величин в пограничном слое на поверхности твердой стенки резервуара был построен слой из призматических ячеек толщиной в 6 ячеек.



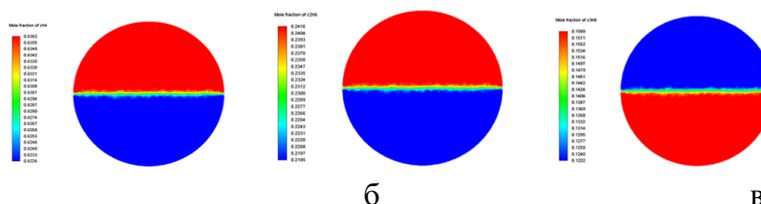
а – общий вид; б – призматическим слоем укрупнено

**Рис. 2. Расчетная сетка (сечение по плоскости OXY)**

**a - general view; b - prism layer enlarged**

**Fig. 2. Calculated grid (section along the OXY plane)**

Выбор начального приближения может оказать значительное влияние на устойчивость расчета, а также на скорость его сходимости. Неправильный выбор может вызвать неустойчивость расчёта, особенно в начальный момент итерационного процесса. Это в свою очередь будет требовать проведения итерационного процесса с меньшими значениями критерия Куранта – Фридрихса – Леви. Что выразится, в конечном счете, в большем потребном числе итераций и, следовательно, в увеличении необходимых расчётных ресурсов. В рамках данной работы предполагалось, что заполнение резервуара происходит много быстрее, чем время протекания ролловера. В связи с этим в качестве начального приближения принималось такое состояние, в котором параметры рабочего тела внутри резервуара соответствуют параметрам в табл. 1. То есть имеется нижний слой и верхний слой. Концентрация всех компонентов в нижнем и верхнем слое в начальный момент времени показана на рис. 3.



а – концентрация  $\text{CH}_4$ ; б – концентрация  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; в – концентрация  $\text{C}_3\text{H}_8$  + примеси

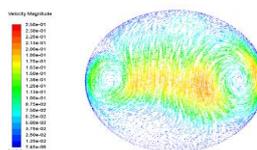
**Рис. 3 Мольные концентрации всех химических компонент в начальный момент времени**

**a - concentration of  $\text{CH}_4$ ; b —  $\text{C}_2\text{H}_6$  concentration; в - concentration of  $\text{C}_3\text{H}_8$  + impurity**

**Fig. 3 Mole concentrations of all chemical components at the initial moment of time**

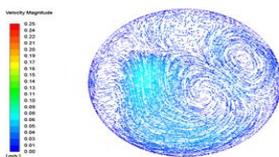
В ходе расчетов были получены все нестационарные распределения компонент рабочего тела внутри резервуара, а также нестационарные поля всех физических величин

На рис. 4 – б приведено поле векторов скорости в плоскости сечения OXY в моменты времени. Приведены поля мольных концентраций всех компонент в плоскости сечения OXY в моменты времени

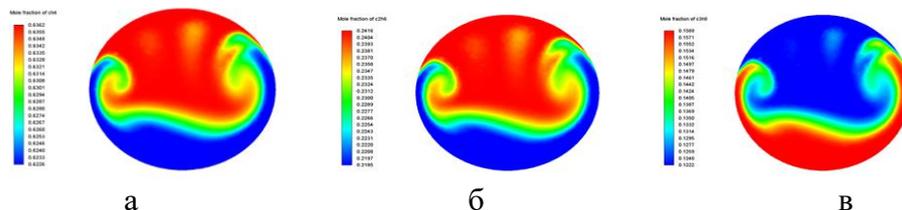


**Рис. 4. Поле векторов скорости в момент времени 180 с**

**Fig. 4. Field of velocity vectors at time instant 180 s**



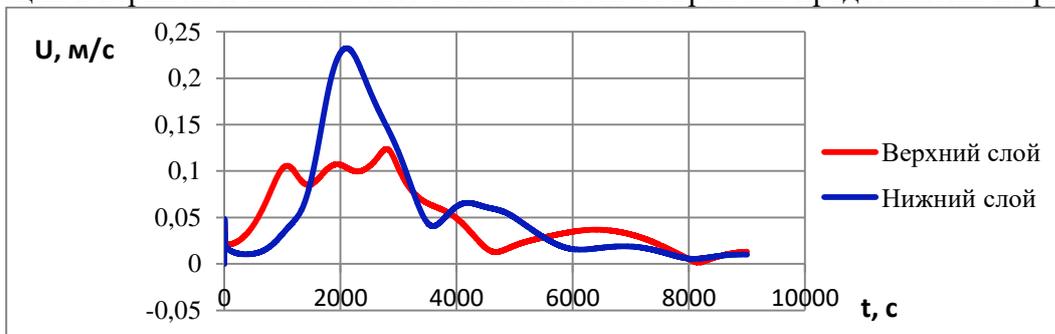
**Рис.5. Поле векторов скорости в момент времени 720 с**  
**Fig.5. The field of velocity vectors at the moment of time 720 s**



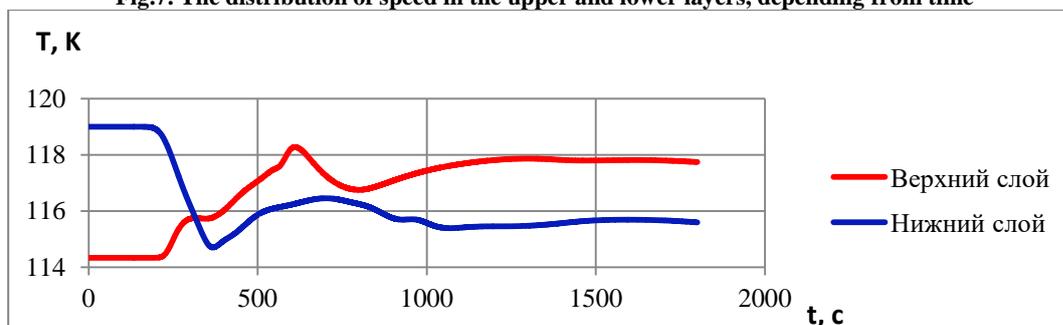
**а – концентрация  $\text{CH}_4$ ; б – концентрация  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; в – концентрация  $\text{C}_3\text{H}_8$  включая примеси**  
**Рис. 6. Молярные концентрации всех химических компонент**  
**a - concentration  $[\text{CH}]_4$ ; b - concentration  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; c - concentration  $\text{C}_3\text{H}_8$  including impurities**

**Fig. 6. The molar concentrations of all chemical components**

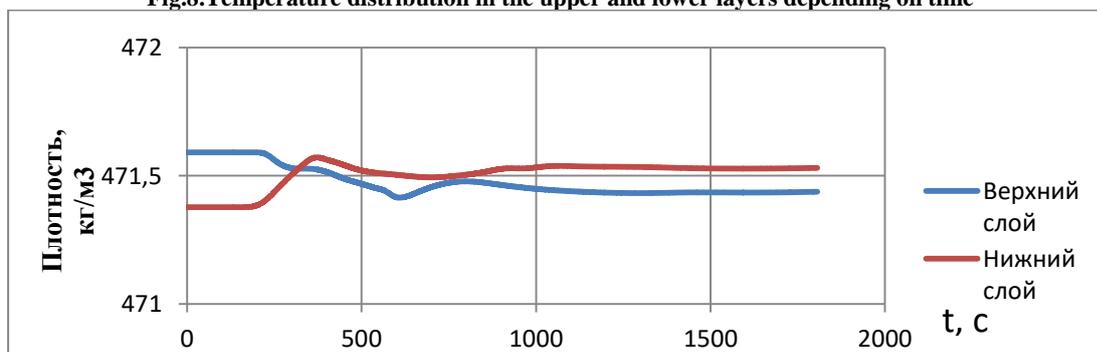
Результаты моделирования распределение скорости, температуры, плотности и молярных концентраций в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени представлены на рис.7 – 12.



**Рис.7. Распределение скорости в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени**  
**Fig.7. The distribution of speed in the upper and lower layers, depending from time**



**Рис.8. Распределение температуры в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени**  
**Fig.8. Temperature distribution in the upper and lower layers depending on time**



**Рис.9. Распределение плотности в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени**  
**Fig.9. Density distribution in the upper and lower layer depending on time**

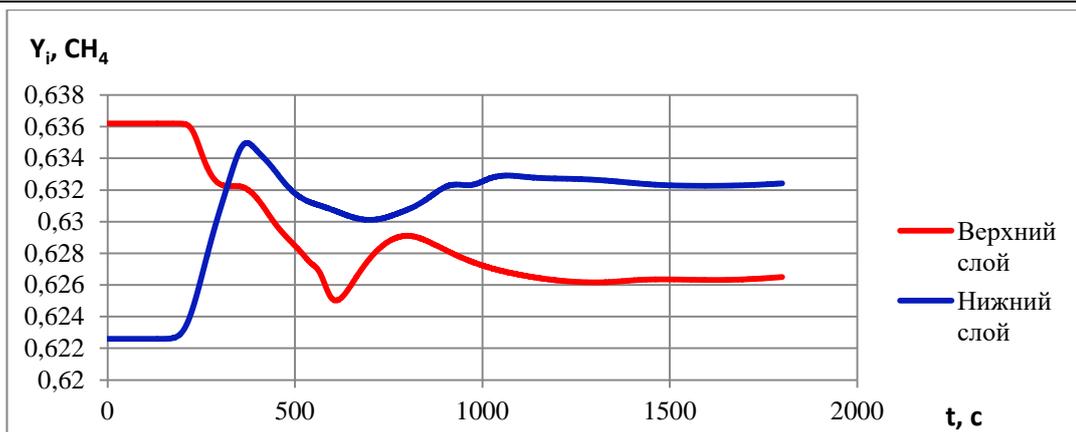


Рис.10. Распределение мольной концентрации  $\text{CH}_4$  в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени  
 Fig.10. The distribution of the molar concentration of  $\text{CH}_4$  in the upper and lower layers depending on time

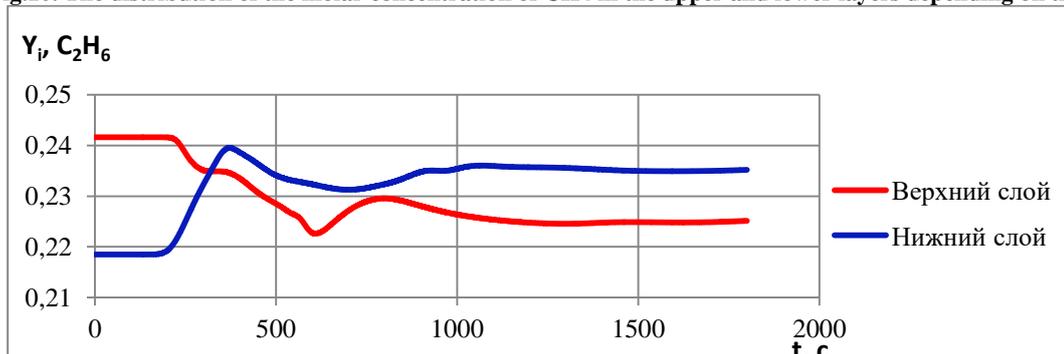


Рис.11. Распределение мольной концентрации  $\text{C}_2\text{H}_6$  в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени  
 Fig.11. The distribution of the molar concentration of  $\text{C}_2\text{H}_6$  in the upper and lower layers depending on time

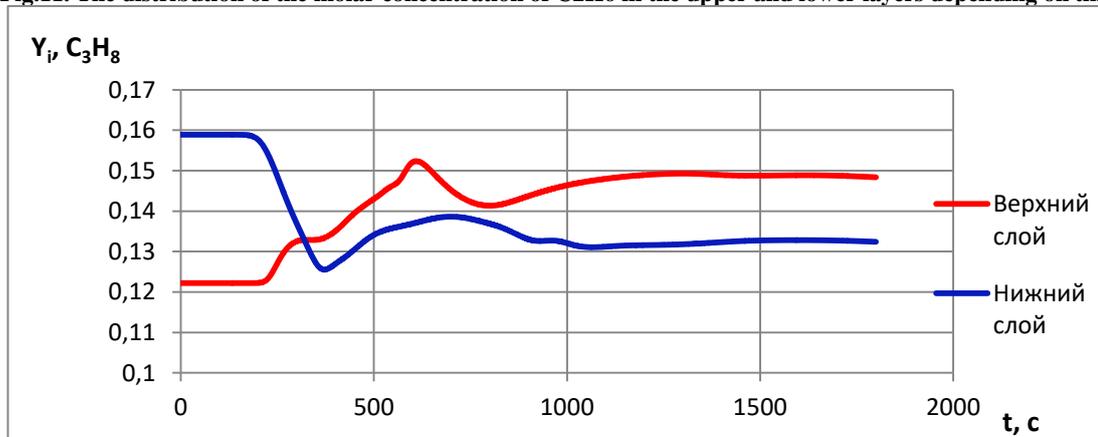


Рис.12. Распределение мольной концентрации  $\text{C}_3\text{H}_8$  в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени  
 Fig.12. The distribution of the molar concentration of  $\text{C}_3\text{H}_8$  in the upper and lower layer depending on time

По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от состава сжиженного природного газа, от заполнения и геометрии резервуара. Проведено численное моделирование процессов перемешивания СПГ в резервуаре объемом  $100000 \text{ м}^3$ . Дискретизованные по методу конечного объема уравнения газодинамики решались на трехмерной неструктурированной расчетной сетке.

При численном моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,3 %. Остальные расчетные характеристики по сравнению с экспериментальными данными имеют следующие погрешности: температура верхнего слоя - 1 %; температура нижнего слоя - 0,4 %; плотность верхнего слоя - 0,7 %; плотность нижнего слоя - 0,7 %; разница плотностей слоев - 2,7 %. По результатам выполненных расчетов выявлено, что время до наступления явления зависит от состава СПГ, а также степени заполнения, характеристик изоляции и геометрии хранилища.

**Вывод.** При использовании СПГ в системах хранения на стартовом комплексе существует возможность протекания негативного явления, получившего название «ролловер», возникающего при дозаправке емкости хранилища новой дозой СПГ, физические параметры которой отличаются от имеющейся, с возникновением через некоторое время перемешивания новой и имеющейся в хранилище порций СПГ с резким увеличением давления в газовой подушке [4, 25]. Можно сделать следующий вывод: метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам.

Меры по предотвращению ролловера: партии СПГ с различной плотностью, хранить отдельно; загрузка резервуара специальным оборудованием, таким, как насадки способствующие смешиванию; СПГ при загрузке (используется для береговых резервуаров); следует избегать продолжительных остановок подачи СПГ при загрузке резервуара; постоянно контролировать уровень испарения СПГ.

Как было отмечено выше, причина явления переворачивания слоев - недостаточное смешивание поступающей в резервуар партии продукта с уже находящейся в нем жидкостью. Однако стратификация с дальнейшим вскипанием может также произойти при выдерживании СПГ в течение длительного времени в резервуаре без рециркуляции или при содержании азота в составе СПГ более 1 % (такая пороговая концентрация установлена по данным международных исследований явления rollover).

Для предотвращения стратификации резервуар оснащается системой рециркуляции с использованием насосов, а налив продукта должен быть организован предпочтительно таким образом, чтобы более тяжелый продукт образовывал верхний слой и смешение фаз, происходило за счет естественной гравитации. Поэтому конструкция резервуара должна предусматривать системы верхнего и нижнего налива, а также средства контроля плотности и температуры на разных уровнях. Кроме того, как правило, предусматривается многоуровневая защита резервуара от превышения внутреннего избыточного давления газовой фазы, обеспечивающая сброс газа в атмосферу или на факел [8]. Чтобы предсказать параметры, при которых может произойти явление ролловера, предложено провести математическое моделирование процесса. Математическое моделирование явления ролловера предполагает использование уравнений математической физики, характеризующих процессы переноса теплоты, массы и импульса в рамках термодинамики необратимых процессов.

В программном комплексе ANSYS было произведено 3d моделирование процесса тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа. При моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,7 %. По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от концентрации компонентных слоев, от заполнения и геометрии резервуара. Эти факторы приводят к увеличению испарения сжиженного природного газа 0,04 %.

Метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам. Применение программного комплекса ANSYS вычислительной гидрогазодинамики при процессе тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа необходимо при расчете повышенной точности.

#### **Библиографический список:**

1. Перспективы использования СПГ в Арктическом регионе РФ по оценкам WWF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146> (дата обращения: 25.04.2018).
2. Власов А.В. Придет ли природный газ на смену мазуту? – Новые технологии. - Выпуск 4 (10). - 2010. - с. 67-70
3. Королев Н.С. К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3.

4. Королев Н.С. Математическое моделирование явления ролловер в системах хранения сжиженного природного газа // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2013. С. 383–384.
5. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.
6. Варгафтик Н.Б., Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // М. Наука. 1972.
7. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.plications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
8. Васильев, Г. Г. Особенности обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных изотермических резервуаров для хранения сжиженного природного газа / Г. Г. Васильев, С. Г. Иванцова, А. И. Рахманин // Газовая промышленность. – Выпуск: 11 11. – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013 – С. 57-61.
9. Рахимов В.О. Особенности термодинамических процессов при хранении сжиженного природного газа: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. кандидата техн. наук: 25.00.19/ Рахимов Вадим Олегович –М., –2013, –24 с.
10. Шаммазов А.М. Производство, хранение и транспорт сжиженного природного газа/ А.М. Шаммазов, Р.К. Терегулов, Б.Н.Мастобаев, Г.Е. Коробков. –СПб.: Недра, 2007. –152 с.
11. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018)
12. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018).
13. De Wit, Johannes. Liquefied Gas Storage Tank Design, Construction Addressed/ Johannes de Wit// Oil & Gas Journal. –1987. – 6 July
14. Королев Н.С. Анализ возникновения явления «ролловер» в системах хранения сжиженного природного газа // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике. М.:Комиссия РАН, 2012. С. 353–354.
15. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications //AIAA Journal.August 1994.№ 32(8).pp. 1598–1605.
16. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.plications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
17. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines. Rome, Italy: Publ. House “Ionta”, 2010. 263p.
18. Issledovanie voprosov proizvodstva i ispol'zovaniia SPG v kachestve al'ternativnogo topliva v razlichnykh otrasliakh narodnogo khoziaistva: otchet [Study on the production and use of LNG as an alternative fuel in various sectors of economy. Report]. Moscow, MEI, «Krion», 1994. 125 p. Non published
19. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Mamin V.V. Issledovaniia GKNPTs im. M. V. Khrunicheva po obosnovaniuu mnogorazovoi trebuemoi razmernosti raketno-kosmicheskoi sistemy [Research of the Khrunichev State space scientific-production center on the substantiation of reusable required dimensionality of space-rocket system]. Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia, 2010, no. 1, pp. 3-12.
20. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., et al. Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok pervoi stupeni mnogorazovoi raketnokosmicheskoi sistemy [Justification of the choice of components of rocket fuel for propulsion of the first stage of reusable space-rocket systems]. Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia, 2010, no. 1, pp. 19-55.
21. Korolev N.S. Matematicheskoe modelirovanie iavleniia rollover v sistemakh khraneniia szhizhennogo prirodnogo gaza [Mathematical modeling of phenomena of rollover in the systems of storage of liquefied natural gas]. Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavтики: materialy 37 akademicheskikh chtenii po kosmonavтике [Actual problems of Russian astronautics: Materials 37th academic readings on Astronautics]. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 383-384.
22. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mlng storage tank of the nantes cryogenic testing station. Paris, France, Gaz de France, 2003.
23. Chugunkov V.V. Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 28 p.
24. The European fuels conference 11th annual meeting // HYDROCARBON WORLD. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. С. 35-38.
25. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / Под ред. А.М. Архарова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.

#### References:

1. Perspektivy ispol'zovaniya SPG v Arkticheskom regione RF po otsenkam WWF [Elektron-nyy resurs]. – Rezhim dostupa:<http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146>(data obrashcheniya: 25.04.2018). [Prospects of LNG use in the Arctic region of the Russian Federation according to WWF [Electronic resource]. – Mode of access:<http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146>(date accessed: 25.04.2018). (In Russ)]
2. Vlasov A.V. Pridet li prirodnyy gaz na smenu mazutu? - Novyyetekhnologii. - Vypusk 4 (10). - 2010. - s. 67-70 [Vlasov A. V. will the natural gas to replace fuel oil? - New technology. - Issue 4 (10). - 2010. - p. 67-70(In Russ)]
3. Korolev N.S. K postroyeniyu matematicheskoy modeli yavleniya rollover v khranilishche SPG // Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron.zhurn. 2012. № 3. [Queens N. S. To the construction of a mathematical model of the rollover phenomenon in LNG storage // Science and education. MGTU im. N. Uh. Bauman. Electron.journal. 2012. No. 3. (In Russ)]
4. Korolev N.S. Matematicheskoye modelirovaniye yavleniya rollover v sistemakh khraneniya szhi-zhennogo prirodnogo gaza // Aktual'nyye problemy rossiyskoy kosmonavtiki: materialy XXXVII akademi-cheskikh chteniy po kosmonavtike. M.: Komissiya RAN, 2013. C. 383-384. [Queens N. S. Mathematical modeling of the rollover phenomenon in liquefied natural gas storage systems // Actual problems of Russian cosmonautics: materials of XXXVII academic readings on cosmonautics. M.: Commission of RAS, 2013. 383-384. (In Russ)]
5. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.
6. Vargaftik N.B., Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey // M. Nauka. 1972. [Vargaftik N. B. Reference book on thermophysical properties of gases and liquids // M. Nauka. 1972. (In Russ)]
7. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.pplifications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
8. Vasil'yev, G. G. Osobennosti obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii krupnogabaritnykh izo-termicheskikh rezervuarov dlya khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza / G. G. Vasil'yev, S. G. Ivantsova, A. I. Rakhmanin // Gazovaya promyshlennost'. – Vypusk: 11 11. – Moskva: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2013 – S. 57-61. [Vasil'ev, G. G. Features ensure the safe operation of large insulated storage tanks for liquefied natural gas / G. G. Vasilyev, S. G. Ivantsov, A. I. Rachmanin // Gas industry. - Issue: 11 11. – Moscow: Russian state University of oil and gas. I. M. Gubkina, 2013-P. 57-61. (In Russ)]
9. Rakhimov V.O. Osobennosti termodinamicheskikh protsessov pri khraneni szhizhennogo prirodnogo gaza: avtoref. diss. na soisk. uch. step. kandidata tekhn. nauk: 25.00.19/ Rakhimov Vadim Olegovich –M., –2013, –24 s. [Rakhimov V. O. features of thermodynamic processes during storage of liquefied natural gas: autoref. dis. on competition of a scientific degree. academic step. the candidate tehn. Sciences: 25.00.19 / Rakhimov Vadim Olegovich-M., -2013, -24 p. (In Russ)]
10. Shammazov A.M. Proizvodstvo, khraneniye i transport szhizhennogo prirodnogo gaza/ A.M. Shammazov, R.K. Teregulov, B.N.Mastobayev, G.Ye. Korobkov. –SPb.: Nedra, 2007. –152 s. [Shammazov A. M. Production, storage and transport of liquefied natural gas/ by A. M. Shammazov, R. K. Teregulov, B. N. Mastobayev, G. E. Box. –SPb.: Nedra, 2007. -152 p.vvv(In Russ)]
11. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018)
12. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018).
13. De Wit, Johannes. Liquefied Gas Storage Tank Design, Construction Addressed/ Johannes de Wit// Oil & Gas Journal. –1987. – 6 July
14. Korolev N.S. Analiz vozniknoveniya yavleniya «rollover» v sistemakh khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza // Aktual'nyye problemy rossiyskoy kosmonavtiki: Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike. M.:Komissiya RAN, 2012. C. 353–354. [Korolev N. S. Analysis of the occurrence of the "rollover" phenomenon in liquefied natural gas storage systems // Actual problems of Russian cosmonautics: materials of XXXVI academic readings on cosmonautics. M.: Commission of RAS, 2012. C. 353-354(In Russ)]
15. MenterF. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications //AIAA Journal.August 1994.№ 32(8).pp. 1598–1605.
16. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.pplifications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
17. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines. Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. 263p.
18. Issledovanie voprosov proizvodstva i ispol'zovaniia SPG v kachestve al'ternativnogo topliva v razlichnykh ot-rasliakh narodnogo khoziaistva: otchet [Study on the production and use of LNG as an alternative fuel in various sectors of economy. Report]. Moscow, MEI, «Krión», 1994. 125 p. Non published(In Russ)]

19. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Mamin V.V. Issledovaniia GKNPTs im. M. V. Khrunicheva po obosnovaniiu mnogorazovoi trebuemoi razmernosti raketno-kosmicheskoi sistemy [Research of the Khrunichev State space scientific-production center on the substantiation of reusable required dimensionality of space-rocket system]. *Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2010, no. 1, pp. 3-12.
20. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., et al. Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok pervoi stupeni mnogorazovoi raketnokosmicheskoi sistemy [Justification of the choice of components of rocket fuel for propulsion of the first stage of reusable space-rocket systems]. *Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2010, no. 1, pp. 19-55. (In Russ)]
21. Korolev N.S. Matematicheskoe modelirovanie iavleniia rollover v sistemakh khraneniia szhizhennogo prirodnogo gaza [Mathematical modeling of phenomena of rollover in the systems of storage of liquefied natural gas]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: materialy 37 akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian astronautics: Materials 37th academic readings on Astronautics]. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 383-384. (In Russ)]
22. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mIn storage tank of the nantes cryogenic testing station. Paris, France, *Gaz de France*, 2003.
23. Chugunkov V.V. Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman Chugunkov V.V. Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 28 p. (In Russ)]
24. The European fuels conference 11th annual meeting // HYDROCARBON WORLD. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. C. 35-38.
25. Barmin I.V., Kunis I.D. Szhizhenny prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra / Pod red. A.M. Arkharova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2009. 256 s. [Barmin I. V., Kunis I. D. Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow / ed. by A. M. Arkharov. M.: Izd-vo MGTU im. N. Eh. Bauman, 2009. 256 p. (In Russ)]

**Сведения об авторах.**

**Хурамшина Регина Азатовна** – магистрант.

**Ямалов Азат Ильфатович** – инженер второй категории.

**Information about the authors.**

**Regina A. Khuramshina** – Master Student.

**Azat I.Yamalov**– Second category Engineer

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 23.12.2018.

**Принята в печать** 23. 01.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 23.12.2018.

**Accepted for publication** 23. 01.2019.

**Для цитирования:** Антонов В.О., Петренко В.И., Сычков В.Б., Тебуева Ф.Б. Определение зависимости обобщенных координат механизма задающего устройства с избыточной подвижностью. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 79-89. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-79-89

**For citation:** Antonov V.O., Petrenko V.I., Sychkov V.B., Tebueva F.B. Determination of the dependence of generalized coordinates of the mechanism of the basic device with excessive mobility. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 79-89. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-79-89

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.08

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-79-89

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ МЕХАНИЗМА ЗАДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ИЗБЫТОЧНОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ

**Антонов В.О.<sup>3</sup>, Петренко В.И.<sup>2</sup>, Сычков В.Б.<sup>4</sup>, Тебуева Ф.Б.<sup>1</sup>**

<sup>1-4</sup>Северо-Кавказский федеральный университет,

<sup>1-4</sup>355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: fariza.teb@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: vip.petrenko@gmail.com,

<sup>3</sup>e-mail: ant.vl.02@gmail.com, <sup>4</sup>e-mail: vladtrav@inbox.ru

**Резюме. Цель.** В статье рассмотрена проблема обеспечения точности при определении обобщенных координат рычажных механизмов задающих устройств копирующего типа с условием избыточной подвижности. **Цель статьи** заключается в определении аналитической зависимости обобщенных координат механизма задающего устройства копирующего типа с избыточной подвижностью. **Метод.** Исследование основано на принципе формирования обобщенных координат задающего устройства копирующего типа для управления трёхзвенным антропоморфным манипулятором с 7-ю степенями подвижности, полпженный в основу определения положения любых искомым точек устройства копирующего типа для управления трёхзвенным антропоморфным манипулятором с 7-ю степенями подвижности при помощи решения обратной задачи кинематики. **Результат.** Построены матрицы нахождения позиции узлов манипулятора в пространстве. Заданы матрицы преобразований поворота вокруг образующих осей и соответствующие формулы нахождения координат конечного узла. Описаны формулы для перехода к локальной системе координат соответствующих звеньев и формирования абсолютных значений координат. **Вывод.** Выявлена комплексная зависимость, позволяющая вычислить абсолютные значения координат кистевого сочленения задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ) с избыточной подвижностью при известных углах между звеньями и углах поворота сочленений. Представленный способ определения координат системы позволяет упростить расчётную часть и увеличить точность определения конечных точек, что влечёт за собой комплексное повышение производительности системы «задающее устройство – робот».

**Ключевые слова:** антропоморфный манипулятор, копирующее управление, обобщенные координаты, углы поворота, задающее устройство

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF GENERALIZED COORDINATES OF THE MECHANISM OF THE BASIC DEVICE WITH EXCESSIVE MOBILITY

Vladimir O. Antonov<sup>3</sup>, Vyacheslav I. Petrenko<sup>2</sup>, Vladislav B. Sychkov<sup>4</sup>, Fariza B. Tebueva<sup>1</sup>

<sup>1-4</sup>North-Caucasus Federal University,

<sup>1-4</sup> IPushkin Str., Stavropol 355009, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: fariza.teb@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: vip.petrenko@gmail.com,

<sup>3</sup>e-mail: ant.vl.02@gmail.com, <sup>4</sup>e-mail: vladtrav@inbox.ru

**Abstract Objectives** The article considers the problem of accuracy in determining the generalized coordinates of the lever mechanisms of the copy-type setting devices with the condition of excessive mobility. The purpose of the article is to determine the analytical dependence of the generalized coordinates of the mechanism of the copy-type setting device with excess mobility. **Method** The article describes the principle of forming generic coordinates of a copy-type setting device for controlling a three-link anthropomorphic manipulator with 7 degrees of mobility, which allows determining the position of any desired points of a copy-type device for controlling a three-link anthropomorphic manipulator with 7 degrees of mobility by solving the inverse kinematics problem. **Result** Matrices for finding the position of the nodes of the manipulator in space are constructed. Matrices of rotation transformations around generatrix axes and the corresponding formulas for finding the coordinates of the end node are given. The formulas for the transition to the local coordinate system of the corresponding links and the formation of the absolute values of the coordinates are described. **Conclusion** A complex relationship has been revealed that allows one to calculate the absolute values of the coordinates of the wrist joint at known angles between the links and the angles of rotation of the joints. The presented method of determining the coordinates of the system allows to simplify the calculated part and increase the accuracy of determining the end points, which entails a comprehensive increase in the performance of the system "master device - robot".

**Keywords:** anthropomorphic manipulator, copying control, generalized coordinates, rotation angles, specifying device

**Введение.** На существующем этапе развития робототехнических систем актуально использование копирующих систем управления манипуляторами на основе управляющих сигналов. Копирующее управление робототехническими системами используется в ситуациях, когда человек-оператор работает с задающим механизмом, кинематически полностью подобным рабочему манипулятору. При этом каждый шарнир задающего механизма связан по принципу следящей системы с соответствующим шарниром рабочего манипулятора. Наиболее распространенным видом устройств, используемых в реализации копирующего типа управления, являются задающие устройства копирующего типа (ЗУКТ) с избыточной подвижностью – экзоскелеты. Задающим устройством, программирующим все движения звеньев манипулятора (в том числе и захватов), является эргономичная рычажная система, надеваемая на оператора [1]. Достоинствами данных систем являются простота и удобство их использования.

Развитием систем копирующего управления антропоморфных манипуляторов (АМ) роботов сегодня занимаются ученые, инженеры и научно-исследовательские коллективы передовых стран. Перечень известных проектов включает такие страны, как Японию с антропоморфными роботами Telesistence V Telesar V [2], Toyota T-HR3 [3], Model H [4], Meltant- $\alpha$  [5], США в проектах Sarcos Guardian [6] и Hermes [7], роботы компании Kuka [8] – Германия, Россия – ЗУКТ-3 [9] и робот FEDOR и другие.

Помимо указанных выше проблем копирующего типа управления антропоморфными роботами, имеется еще одна серьезная проблема – уровень точности при определении обобщенных координат рычажных механизмов ЗУКТ с условием избыточной подвижности.

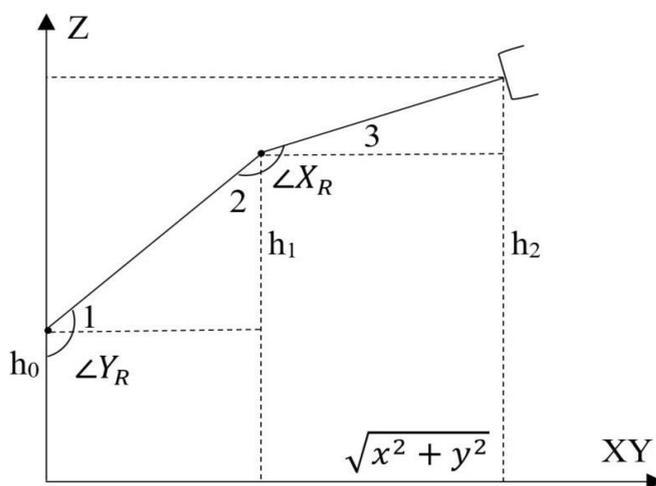
В роботах Telesistence V Telesar V, Model H, MELTANT-α, Hermes определение обобщенных координат звеньев манипулятора производится путем решения обратной задачи кинематики при известных данных звеньев и конечного положения эффектора в пространстве. В таком случае определение обобщенных координат звеньев манипулятора сталкивается с проблемой большой вычислительной сложности при работе в среде с препятствиями, что делает их менее эффективными при выполнении целевых операций в рабочей зоне с препятствиями.

В роботах Toyota T-HR3, Sarcos Guardian, Kuka-Duplicator и ЗУКТ-3 используется экзоскелет для управления всеми звеньями манипулятора с ЗУКТ. При этом, задающие устройства роботов Toyota T-HR3, Kuka-Duplicator и Sarcos Guardian являются стационарными платформами, где в центр экзоскелета помещается рука оператора, таким образом, углы поворота в задающем устройстве и центры звеньев совпадают. Существенным недостатком данных систем является их габаритность и энергопотребление при эксплуатации. Экзоскелет ЗУКТ-3 является малогабаритной мобильной платформой, что делает его универсальным в различных сферах деятельности.

**Постановка задачи.** У копирующих систем управления имеется ряд проблем, немалозначной из которых является уровень точности при определении обобщенных координат рычажных механизмов ЗУКТ с условием избыточной подвижности. Установить данную проблему возможно при проведении исследований зависимости обобщенных координат механизма ЗУКТ с избыточной подвижностью.

Обобщенные координаты – параметры, описывающие конфигурацию динамической системы относительно некоторой эталонной конфигурации в аналитической механике, а конкретно – исследования динамики твёрдых тел в системе многих тел. Эти параметры должны однозначно определять конфигурацию системы относительно эталонной конфигурации. Число обобщенных координат соответствует числу степеней подвижности. Звено, которому приписываются одна или несколько обобщенных координат механизма, называется начальным звеном [10].

Для определения положения трехзвенного АМ необходимо использование следующих параметров: координаты  $X, Y, Z$ , а также трех углов 1, 2, 3 (рис. 1).



**Рис.1. Кинематическая схема трехзвенного манипулятора:**

$h_0$  – высота от установочной площадки до первого звена;  $l_1$  – длина первого звена манипулятора;  $l_2$  – длина второго звена;  $\angle X_R$  и  $\angle Y_R$  – углы поворота звеньев;  $X, Y, Z$  – координаты объекта

**Fig.1. Kinematic scheme of the three-link manipulator:**

$h_0$  - height from the installation site to the first link;  $l_1$  is the length of the first link of the money-gun;  $l_2$  is the length of the second link;  $\angle X_R$  and  $\angle Y_R$  - the angles of rotation of the links;  $X, Y, Z$  - coordinates of the object

В рамках данного пункта рассматривается задача выявления зависимости обобщенных координат рычажного механизма ЗУКТ для управления трёхзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности. В силу того, что рычажная система ЗУКТ является негибкой, обоб-

щенными координатами определения пространственного положения являются углы ориентации звеньев ЗУКТ.

Схематическое изображение ЗУКТ для управления трехзвенным АМ робота с 7-ю степенями подвижности представлено на рис. 2.

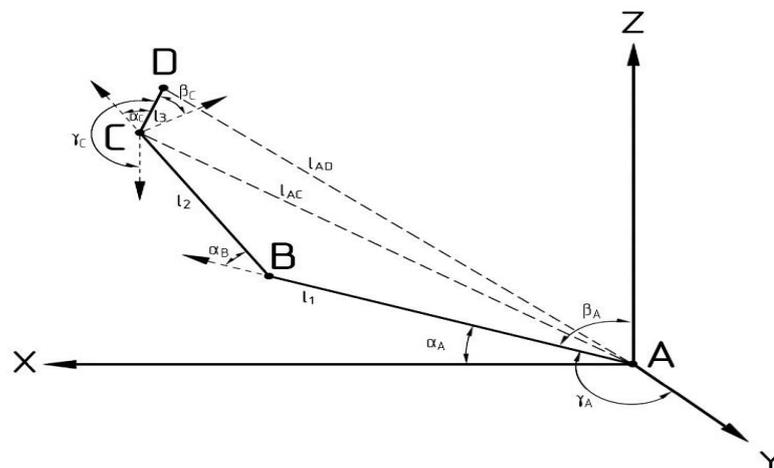


Рис.2. Схема ЗУКТ для управления трехзвенным АМ с 7-ю степенями подвижности  
 Fig.2. AMPL scheme for AM three-link control with 7 degrees of mobility

На рис. 2 переменным соответствуют следующие обозначения для ЗУКТ:

$A(x_A, y_A, z_A)$  – плечевой узел;  $B(x_B, y_B, z_B)$  – локтевой узел;  $C(x_C, y_C, z_C)$  – лучезапястный узел;  $D(x_D, y_D, z_D)$  – кистевой узел;  $AB, BC, CD$  – звенья задающего устройства;  $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A$  – углы ориентации звена  $AB$  по осям  $OX, OZ$  и  $OY$  соответственно;  $\alpha_B$  – угол ориентации звена  $BC$  по оси, образованной вектором, выходящим из звена  $AB$ ;  $\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$  – углы ориентации звена  $CD$  по осям  $OX, OZ$  и  $OY$  соответственно, с точкой отсчёта в звене  $C$ ;  $\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}$  – длины звеньев задающего устройства.

Положение звеньев ЗУКТ-3 определяется, если известно положение некоего отрезка звена на заданном векторе. Для этого необходимо выявить координаты узла и угол наклона данного отрезка к оси начала координат, либо к оси, образованной предыдущим звеном. Принцип формирования обобщённых координат представлен в табл. 1.

Таблица 1. Принцип формирования обобщённых координат устройства копирующего типа для управления трёхзвенным АМ с 7-ю степенями подвижности

Table 1. The principle of formation of the generalized coordinates of the device of the copying type for the control of three-link AM with 7 degrees of mobility

Link Angle Угол наклона звена	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Узел Joint			
A	$\alpha_A$	$\beta_A$	$\gamma_A$
B	$\alpha_B$	–	–
C	$\alpha_C$	$\beta_C$	$\gamma_C$

Соответственно, зависимость обобщённых координат для ЗУКТ типа примет вид:

– для плечевого узла:

$$q \begin{pmatrix} \alpha_A \\ \beta_A \\ \gamma_A \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} x_A, & y_A, & z_A, \\ x_B, & y_B, & z_B, \end{pmatrix}, \quad (1)$$

– для локтевого узла:

$$q(\alpha_B) = \Phi \begin{pmatrix} x_B, & y_B, & z_B, \\ x_C, & y_C, & z_C, \end{pmatrix}, \quad (2)$$

– для кистевого узла:

$$q \begin{pmatrix} \alpha_C \\ \beta_C \\ \gamma_C \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} x_D, & y_D, & z_D \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Зависимые (1) – (3) обобщённых координат позволяют определить положение любых искомых точек устройства копирующего типа для управления трехзвенным манипулятором с 7-ю степенями подвижности при помощи решения обратной задачи кинематики.

Представленный способ определения координат системы позволяет упростить расчётную часть и увеличить точность определения конечных точек, что влечёт за собой комплексное повышение производительности системы «задающее устройство – робот».

**Методы исследования.** Зависимость обобщённых координат звеньев в пространстве предполагает, что координаты звеньев каждого дочернего узла зависят от углов поворота и положений в пространстве всех родительских звеньев манипулятора.

**Начальные условия.** Четырёхзвенный АМ, представляющий собой рычажный механизм, состоит из трех жестких звеньев (плечевое, локтевое, кистевое) и хвата, идентичного кисти руки человека, на плоскости, лежащей на осях  $X$  и  $Y$  (рис. 3).

Если предположить, что узел  $C$  является родительским по отношению к узлу  $D$ ,  $B$  – родительский к узлу  $C$ , а узел  $A$  – родительский к  $B$ , то, согласно зависимости нахождения положений звеньев в пространстве, угол поворота узла  $A$  влияет на положения в пространстве всех остальных узлов, в то время как угол поворота  $B$ , влияет на положения узлов  $C$  и  $D$ , а поворот узла  $C$  изменит лишь позицию узла  $D$ .

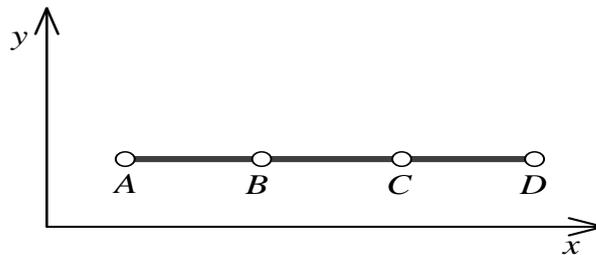


Рис.3. Схема четырехзвенного АМ, лежащего в плоскости  $XY$

Fig.3. Scheme of a four-link AM lying in the  $XY$  plane

Соответствующие суставы рычажной системы четырехзвенного АМ представлены на рис. 4.

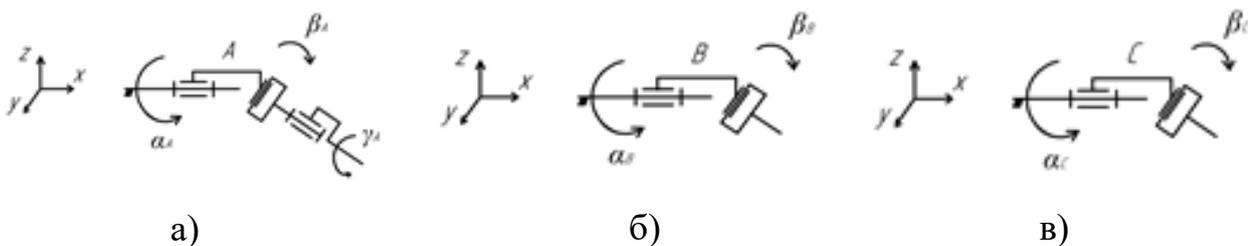


Рис.4. Рычажная система четырехзвенного АМ:

а) аналог плечевого сустава, б) аналог локтевого сустава, в) аналог лучезяпястного сустава

Fig. 4. Lever system of the four-link AM:

а) analogue of the shoulder joint, б) analogue of the elbow joint, в) analogue of the wrist joint

Матрица поворота любого узла по оси  $Z$  имеет следующий вид:

$$M_Z = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол поворота узла.

Предполагая, что сочленения  $AB$ ,  $BC$  и  $CD$  равны и имеют длину 1 усл. ед., и принимая позицию каждого родительского узла за 0 в локальной системе координат, матрица смещения каждого из дочерних узлов в локальной системе координат сочленения будет иметь вид:

$$M_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ где } x = 1. \quad (5)$$

Таким образом, матрица нахождения позиции узла  $D$  находится следующим образом:

$$M_z \times M_T = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

А при повороте узла  $C$  на 90 градусов уравнение приобретает следующий вид:

$$M_D = M_z \times M_T = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где первые три элемента четвертого столбца матрицы соответствуют координатам узла  $D$  в локальной системе координат сочленения  $CD$  (рис. 5):

$$D = (0, -1, 0). \quad (8)$$

В иерархии рассматриваемой системы родительским для  $C$  и  $D$  является узел  $B$ , при повороте которого будут изменяться позиции уже двух дочерних узлов.

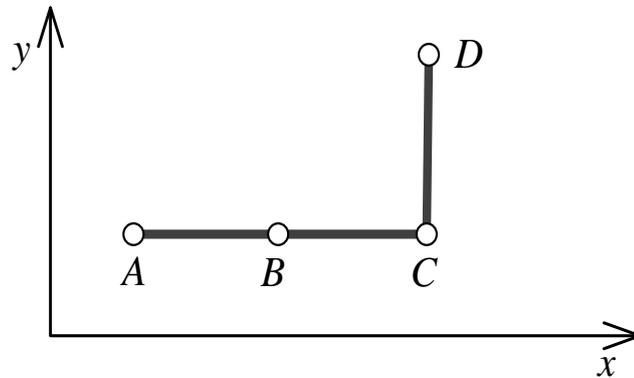


Рис.5. Зависимость положения узла  $D$  от поворота узла  $C$   
 Fig.5. Dependence of the position of the node  $D$  on the rotation of the node  $C$

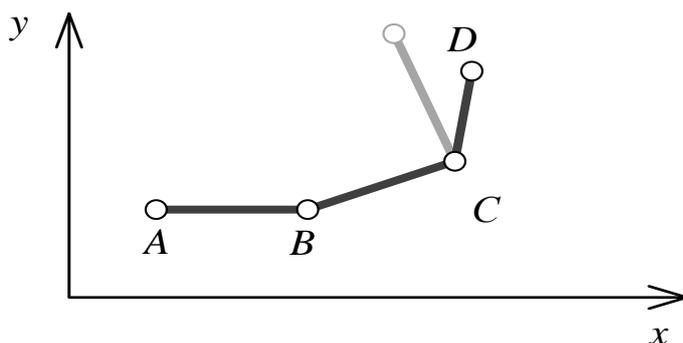
Матрица перемещения узла  $C$  в сочленении  $BC$  при повороте родительского узла  $B$  на 20 градусов по оси  $Z$  имеет вид:

$$M_C = M_z \times M_T = \begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0,94 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0,34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

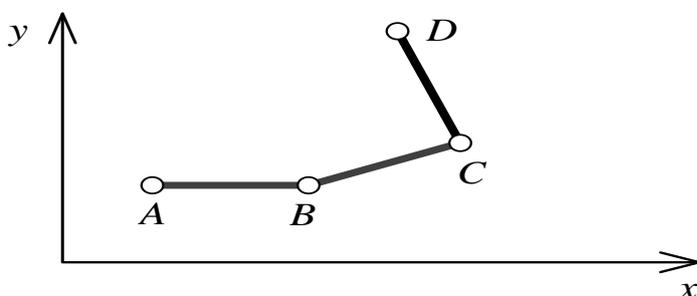
Первые три элемента четвертого столбца матрицы (9), так же, как и в предыдущем случае, соответствуют координатам узла  $C$  в локальной системе координат сочленения  $BC$  (рис. 6).

Как видно из рис. 6 координаты узла  $C$  сместились, что вызвало разрыв между сочленениями  $BC$  и  $CD$ . Точнее, не были найдены обновленные координаты узла  $D$ , с учетом его зависимости от родительских узлов.



**Рис.6. Некорректные координаты узла D**  
**Fig.6. Incorrect coordinates of the node D**

Система сочленений с обновленными координатами узла  $D$  принимает корректный вид (рис. 7), что подтверждает зависимость положений и поворотов дочерних узлов от положений поворотов родительских.



**Рис.7. Корректное представление системы сочленений**  
**Fig.7. Correct representation of the joint system**

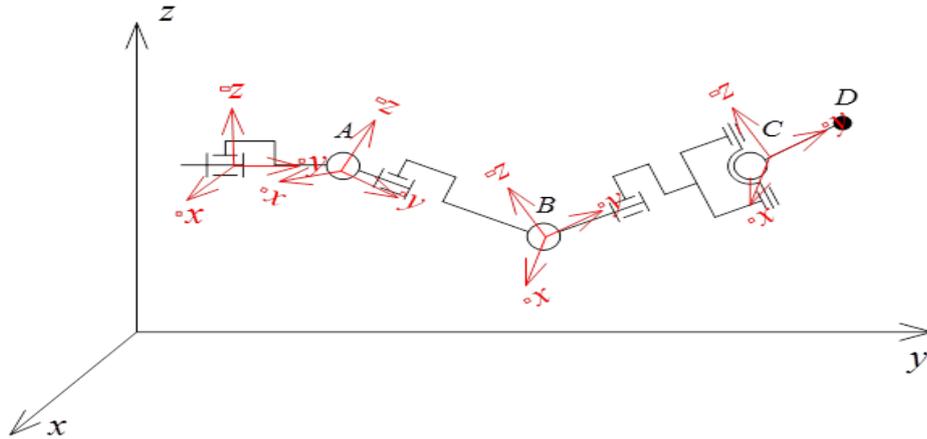
Целью данного метода является получение зависимости положений и поворотов дочерних узлов от положений поворотов родительских, т.е. зависимости обобщенных координат механизма ЗУКТ.

**Обсуждение результатов.** Согласно зависимости, приведённой на рис. 8, нахождение координат дочерних узлов производится путем умножения матриц поворота и смещения искомого узла, на матрицы поворотов и смещений всех родительских узлов в порядке их иерархии в системе.

Нахождение координат узла  $D$  относительно позиции узла  $B$  выглядит следующим образом:

$$M_{D_H} = M_D * M_C = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0,94 & -0,34 & 0 & 0,94 \\ 0,34 & 0,94 & 0 & 0,34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

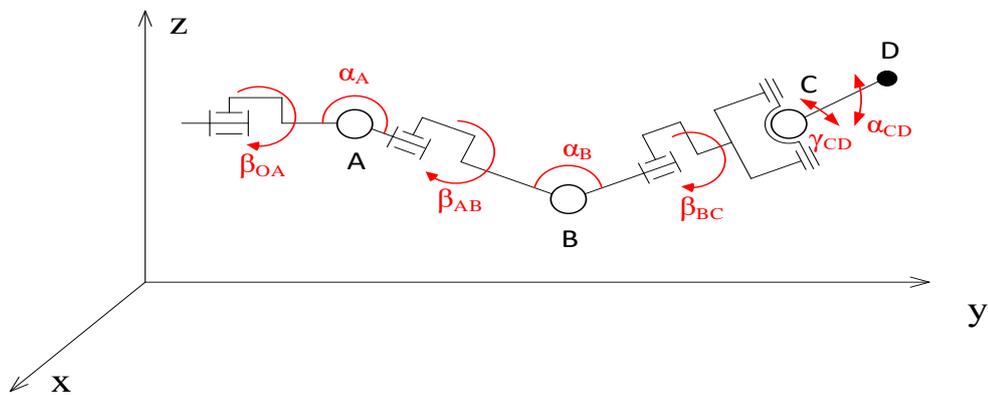
$$= \begin{vmatrix} -0,34 & -0,94 & 0 & -0,34 \\ 0,94 & -0,34 & 0 & 1,94 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (10)$$



**Рис.8. Формирование зависимости обобщённых координат ЗУКТ**  
**Fig.8. Formation of the dependence of the generalized coordinates of the SUCCT**

Необходимо определить абсолютные значения координат узла  $D(x_D, y_D, z_D)$  при известных углах между звеньями и углах поворота сочленений.

Рассматривается задающее устройство с жесткими звеньями, соединенными кинематическими парами с угловым перемещением (рис.9).



**Рис.9. Обозначение углов ЗУКТ**  
**Fig.9. Designation of angles**

Проводится задание матрицы преобразований поворота вокруг осей  $Ox, Oy, Oz$  на угол  $\theta$ :

$$M_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$M_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Следующим этапом определяется матрица смещения координат вдоль осей  $Ox, Oy, Oz$ :

$$M_T(x, y, z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Координаты узла  $D$  в системе координат, связанной с узлом  $C$ , могут быть определены на основе известных углов поворота  $\alpha_C, \gamma_C$  вокруг осей  $x_C, y_C$  соответственно:

$$D_{CD} = M_x(\alpha_{CD}) \times M_z(\gamma_{CD}) \times M_T(0, \overline{CD}, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_C & -\sin \alpha_C & 0 \\ 0 & \sin \alpha_C & \cos \alpha_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos \gamma_C & -\sin \gamma_C & 0 & 0 \\ \sin \gamma_C & \cos \gamma_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \overline{CD} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Первые три элемента четвертого столбца результирующей матрицы соответствуют координатам узла  $D$  в локальной системе координат звена  $CD$ .

Для перехода к локальной системе координат звена  $BC$  необходимо произвести трансформации смещения и поворота:

$$D_{BC} = M_y(\beta_{BC}) \times M_T(0, \overline{BC}, 0) \times D_{CD}. \quad (14)$$

Далее осуществляется переход к локальной системе координат сочленения  $AB$ :

$$D_{AB} = M_y(\beta_{AB}) \times M_T(0, \overline{AB}, 0) \times M_x(\alpha_B) \times D_{BC}. \quad (15)$$

Формируются абсолютные значения координат:

$$D = M_y(\beta_{OA}) \times M_T(0, \overline{OA}, 0) \times M_x(\alpha_A) \times D_{AB}. \quad (16)$$

Следовательно, первые три элемента четвертого столбца результирующей матрицы соответствуют координатам узла  $D(x_D, y_D, z_D)$ .

**Вывод.** В статье приведены результаты исследования аналитической зависимости обобщенных координат рычажного механизма ЗУКТ с избыточной подвижностью.

Описан принцип формирования обобщенных координат ЗУКТ для управления трёхзвенным АМ с 7-ю степенями подвижности, позволяющий определить положение любых искомым точек ЗУКТ при помощи решения обратной задачи кинематики.

Построенные матрицы нахождения позиции конечного узла  $D$  относительно родительских узлов  $A, B$  и  $C$  представлены формулами (6)-(10). Матрицы преобразований поворота вокруг образующих осей и соответствующие формулы нахождения координат конечного узла  $D$  на основе известных углов поворота заданы формулами (11)-(13).

Переход к локальной системе координат соответствующих звеньев и формирования абсолютных значений координат звеньев можно осуществить с использованием формул (14)-(16).

Выявлена комплексная зависимость, позволяющая вычислить абсолютные значения координат кистевого сочленения  $D(x_D, y_D, z_D)$ , при известных углах между звеньями и углах поворота сочленений.

#### Библиографический список:

- 1 Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Сычков В.Б. Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения. Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет. -космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (12-14 нояб. 2013 г., Красноярск): в 2 ч. /под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 1. 522 с.

- 2 Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Kyo Hirota, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi: TELESAR V: TELEXistence Surrogate Anthropomorphic Robot, ACM SIGGRAPH 2012, Emerging Technologies, Los Angeles, CA, USA, 2012.
- 3 T-HR3 by Toyota // Toyota Motor Corporation Global Website URL: [https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/partner\\_robot/robot/file/T-HR3\\_EN\\_0208.pdf](https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/partner_robot/robot/file/T-HR3_EN_0208.pdf) (дата обращения: 17.02.2019).
- 4 Telexistence Model H // Telexistence inc. URL: <https://tx-inc.com/technology/> (дата обращения: 17.02.2019).
- 5 Meltant- $\alpha$ , a cyborg that transcends boundaries // © Meltin MMI URL: <https://www.meltin.jp/en/technology/> (дата обращения: 17.02.2019).
- 6 Guardian™ GT // Sarcos Robotics URL: <https://www.sarcos.com/products/guardian-gt/> (дата обращения: 17.02.2019).
- 7 MIT HERMES Project // MIT Biomimetics Robotics Lab logo URL: <https://biomimetics.mit.edu/research/mit-hermes-project> (дата обращения: 17.02.2019).
- 8 Robotic systems KUKA // KUKA AG URL: <https://www.kuka.com/en-gb/industries/energy/nuclear-decommissioning> (дата обращения: 18.02.2019).
- 9 УКТ-3 НПО Андроидная техника // НПО Андроидная техника URL: <https://npo-at.com/products/«аватар»/> (дата обращения: 25.10.2017 г.).
- 10 Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Попова Е.В., Сычков В.Б. Комбинированные системы управления робототехническими комплексами на основе элементов сенсорики с обратными связями для обеспечения возможности замены человека при работе в условиях чрезвычайной ситуации. Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Тезисы докладов. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. С. 279-281.

#### References:

1. Zhidenko I.G., Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Sychkov V.B. Obosnovaniye vybora strukturnoy skhemy robotov kosmicheskogo ispolneniya. Reshetnevskiy chteniye: materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket. -kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva (12-14 noyab. 2013 g., Krasnoyarsk): v 2 ch. /pod obshch. red. YU. YU. Loginova; Sib. gos. aerokosmich. un-t. Krasnoyarsk, 2013. CH. 1. 522 s. [Zhidenko I.G., Kutlubayev I.M., Bogdanov A.A., Sychkov V.B. Justification of the choice of the structural scheme of space execution robots. Reshetnev readings: materials of the XVII International. scientific conf., dedicated. memory generator missile constructor. -cosm systems of acad. M. F. Reshetnev (Nov. 12-14, 2013, Krasnoyarsk): at 2 pm / total. ed. Yu. Loginova; Sib. state aerospace un-t Krasnoyarsk, 2013. Part 1. 522 p. (In Russ)]
2. Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Kyo Hirota, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi: TELESAR V, TEL Existence Surrogate Anthropomorphic Robot, ACM SIGGRAPH.
3. T-HR3 by Toyota // Toyota Motor Corporation Global Website URL: [https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/partner\\_robot/robot/file/T-HR3\\_EN\\_0208.pdf](https://www.toyota-global.com/pages/contents/innovation/partner_robot/robot/file/T-HR3_EN_0208.pdf) (appeal date: 17.02. 2019).
4. Telexistence Model H // Telexistence inc. URL: <https://tx-inc.com/technology/> (appeal date: 02/17/2019).
5. Meltant- $\alpha$ , a cyborg that transcends boundaries//© Meltin MMI URL: <https://www.meltin.jp/en/technology/> (reference date: 17.02.2019).
6. Guardian™ GT // Sarcos Robotics URL: <https://www.sarcos.com/products/guardian-gt/> (appeal date: 02/17/2019).
7. MIT HERMES Project // MIT Biomimetics Robotics Lab logo URL: <https://biomimetics.mit.edu/research/mit-hermes-project> (access date: 02.17.2019).
8. Robotic systems KUKA // KUKA AG URL: <https://www.kuka.com/en-gb/industries/energy/nuclear-decommissioning> (access date: 02/18/2019).
9. УКТ-3 НПО Андроидная техника // НПО Андроидная техника URL: <https://npo-at.com/products/«аватар»/> (data obrashcheniya: 25.10.2017 g.). [УКТ-3 НПО Android Technology // НПО Android Technology URL: <https://npo-at.com/products/Avatar> (appeal date: 10.25.2017). (In Russ)]
10. Bogdanov A.A., Kutlubayev I.M., Permyakov A.F., Popova Ye.V., Sychkov V.B. Kombinirovannyye sistemy upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami na osnove elementov sensoriki s obratnymi svyazyami dlya obespecheniya vozmozhnosti zameny cheloveka pri rabote v usloviyakh chrezvychaynoy situatsii. Global'naya i natsional'nyye strategii upravleniya riskami katastrof i stikhiynykh bedstviy XX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy. Tezisy докладов. FGBU VNI GOCHS (FTS). 2015. S. 279-281. [Bogdanov A.A., Kutlubayev I.M., Permyakov A.F., Popova E.V., Sychkov V.B. Combined control systems of robotic complexes based on sensory elements with feedback to ensure the possibility of replacing a person when working in an emergency. Global and national strategies for disaster risk management and natural disasters XX International Scientific and Practical Conference on the protection of people and territories from emergencies. Theses of reports. FSBI VNI GOCHS (FC). 2015. p. 279-281. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Антонов Владимир Олегович** – кандидат технических наук, старший преподаватель, институт информационных технологий и телекоммуникаций.

**Петренко Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора института информационных технологий и телекоммуникаций по науке; заведующий кафедрой «Организация и технология защиты информации».

**Сычков Владислав Борисович** – аспирант.

**Тебуева Фариза Биляловна** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности.

**Information about the authors.**

**Vladimir O. Antonov** - Post-graduate Student.

**Vyacheslav I. Petrenko** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Deputy Director of the Institute of Information Technology and Telecommunications in Science; Department "Organization and technology of information protection."

**Vladislav B. Sychkov** –Graduate student

**Fariza B. Tebuueva** – Dr.Sci.(Physical and Mathematical), Department of Applied Mathematics and Computer Security. Конфликт интересов Conflict of interest.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.02.2019.

Принята в печать 21. 03.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 15.02.2019.

**Accepted for publication** 21. 03.2019.

**Для цитирования:** Бокова О.И., Дровникова И.Г., Попов А.Д., Рогозин Е.А. Модель процесса функционирования системы защиты информации от несанкционированного доступа, созданная в программной среде имитационного моделирования «CPN TOOLS». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 90-102. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-90-102

**For citation:** Bokova O.I., Drovnikova I.G., Popov A.D., Rogozin E.A. Model of the process of functioning of the information protection system from unauthorized access created in the software environment of imitation modeling "CPN TOOLS". Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 90-102. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-90-102

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.7: 004.05

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-90-102

### МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА, СОЗДАННАЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «CPN TOOLS»

**Бокова О.И.<sup>2</sup>, Дровникова И.Г.<sup>1</sup>, Попов А.Д.<sup>4</sup>, Рогозин Е.А.<sup>3</sup>**

<sup>1-4</sup> Воронежский институт МВД России,

<sup>1-4</sup>394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: o.i.bokova@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: idrovnikova@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, <sup>4</sup>e-mail: anton.holmes@mail.ru

**Резюме. Цель.** В настоящее время проведение вычислительного эксперимента над системой защиты информации от несанкционированного доступа, эксплуатируемой в автоматизированной системе, является трудоёмким процессом. Наибольшую сложность в данном направлении исследований представляет определение вероятностно-временных характеристик и формирование отчётов в процессе функционирования системы защиты информации. С целью анализа, получения и исследования вероятностно-временных характеристик данной системы необходимо разработать математическую модель её функционирования с использованием аппарата имитационного моделирования. **Метод.** Одним из методов решения указанной проблемы является вычислительный эксперимент, в основе которого лежит построение имитационной модели. В качестве программного продукта имитационного моделирования была выбрана среда «CPN Tools», основными достоинствами которой являются: высокий уровень визуализации, возможность формирования различных отчётов по работе системы, быстрая модифицируемость моделей для решения другого класса задач, а также интеграция с другими программными средствами для формирования графических зависимостей. **Результат.** Разработана имитационная модель системы защиты информации от несанкционированного доступа в программной среде «CPN Tools», позволяющая получать её вероятностно-временные характеристики, а также проводить исследования защищённости автоматизированной системы с учётом отвлечения значительных вычислительных ресурсов на процесс функционирования системы информационной безопасности при эксплуатации в автоматизированной системе в защищённом исполнении. **Вывод.** Имитационная модель системы защиты информации от несанкционированного доступа в программной среде «CPN Tools» может использоваться как инструмент при оценке защищённости специальными органами по аттестации объектов информатизации и структурными подразделениями уполномоченных ведомств, а также при проектировании подобных систем с целью недопущения логических ошибок, определения их временных характеристик и сравнения с имеющимися в соответствии с техническим заданием на разрабатываемую систему защиты информации от несанкционированного доступа.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, система защиты информации, несанкционированный доступ, имитационная модель, программная среда, вероятностно-временные характеристики, защита информации

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF THE INFORMATION PROTECTION SYSTEM FROM UNAUTHORIZED ACCESS CREATED IN THE SOFTWARE ENVIRONMENT OF IMITATION MODELING "CPN TOOLS"

*Oksana I. Bokova*,<sup>2</sup> *Irina G. Drovnikova*<sup>1</sup>, *Anton D. Popov*<sup>4,2</sup>, *Evgenii A. Rogozin*<sup>3</sup>

<sup>1-4</sup>Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,  
<sup>1-4</sup>53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [o.i.bokova@gmail.com](mailto:o.i.bokova@gmail.com), <sup>2</sup>e-mail: [idrovnikova@mail.ru](mailto:idrovnikova@mail.ru),

<sup>3</sup>e-mail: [evgenirogozin@yandex.ru](mailto:evgenirogozin@yandex.ru), <sup>4</sup>e-mail: [anton.holmes@mail.ru](mailto:anton.holmes@mail.ru)

**Abstract Objectives** At present, conducting a computational experiment on a system for protecting information from unauthorized access operated in an automated system is a time consuming process. The greatest difficulty in this area of research is the determination of probabilistic-temporal characteristics and the formation of reports during the operation of the information protection system. In order to analyze, obtain and study the probabilistic-time characteristics of this system, it is necessary to develop a mathematical model of its operation using an imitational modeling tool. **Method.** One of the methods for solving this problem is a computational experiment, which is based on the construction of a simulation model. The CPN Tools environment was chosen as a software simulation product, the main advantages of which are: a high level of visualization, the ability to generate various reports on the system operation, fast modifiability of models for solving a different class of problems, as well as integration with other software means for the formation of graphical dependencies. **Result.** A simulation model of the system for protecting information from unauthorized access in the "CPN Tools" software environment was developed. **protected performance.** **Conclusion.** The presented im-model model of protecting information from unauthorized access in the software environment "CPN Tools" can be used as a tool in assessing the security of special bodies for the attestation of informatization objects and structural divisions of authorized departments. It can also be used in the design of such systems in order to prevent logical errors, determine their temporal characteristics and compare with the existing ones in accordance with the technical specifications for the system being developed to protect information from unauthorized access.

**Keywords:** automated system, information protection system, unauthorized access, simulation model, software environment, probabilistic-temporal characteristics, information protection

**Введение.** В настоящее время вопросы, связанные с формированием требований к системам защиты информации (СЗИ) от несанкционированного доступа (НСД), являются важными и актуальными для автоматизированных систем (АС) в защищённом исполнении. Согласно ГОСТ Р 50922-2006 РД «Основные термины и определения» [1] под защищёнными АС (как объектом защиты) понимаются такие АС, которые необходимо защищать в соответствии с целями защиты информации. Анализируя средства и системы информационной безопасности (ИБ), можно утверждать, что СЗИ от НСД является одной из основных преград для противодействия угрозам НСД к информационному ресурсу АС. Поэтому формирование требований к современным АС в защищённом исполнении приобретает первостепенное значение.

Существующая практика формирования требований к СЗИ от НСД при разработке, сертификации и эксплуатации данных систем показала, что они представляются в виде функционала в соответствии с классом защищённости АС на основе нормативных документов ФСТЭК России, к которым можно отнести руководящий документ «Классы защищённости АС» [2], ГОСТ Р 15408-2013 «Единые критерии безопасности» [3] и др. Основным недостатком данного подхода является то, что не представляется возможным контролировать поведение СЗИ от НСД в АС при её функционировании в масштабе реального времени. Таким образом, используемая в

настоящее время методика формирования требований к СЗИ от НСД в АС требует совершенствования [4].

**Постановка задачи.** Для устранения указанного недостатка необходимо разработать такую методику формирования требований к СЗИ от НСД в АС, которая явилась бы существенным дополнением к имеющейся статистической методике (функционал практически независим от времени) и давала бы ясную картину функционирования СЗИ в масштабе реального времени. Для этого следует учесть существующие недостатки эксплуатации СЗИ от НСД в АС, к которым, несомненно, можно отнести их ресурсоёмкость (отвлечение вычислительных ресурсов АС), что в целом мешает функционированию АС по их основному предназначению (обработка, хранение и передача информации). С учётом выше изложенного разрабатываемая методика формирования требований к СЗИ от НСД в АС должна базироваться на методах математического моделирования, позволяющих исследовать эти системы в реальном (динамическом) режиме и давать практические рекомендации по использованию средств и систем ИБ на объектах информатизации при их разработке, эксплуатации, сертификации и т.д.

Создание и функционирование СЗИ от НСД в АС представляет собой трудоёмкий процесс [5-8], причиной которого является недетерминированность (неопределённость) данных систем. Это означает, что их разработка и администрирование должны осуществляться с учётом компонентов, потенциально являющихся уязвимыми местами в системе. Например, следует учитывать, могут ли теряться данные в процессе взаимодействия различных подсистем, ответственны ли протекающие процессы времени их функционирования в СЗИ от НСД и т.д. Таким образом, при разработке подобных систем, как правило, возникает значительное количество ошибок, связанных с тем, что разработчик не всегда может учесть взаимосвязь компонентов, что, вероятно, приведёт к сбоям при работе реальной системы, а, следовательно, — к потере большого количества времени, потраченного на пересмотр предметной области, переработку технической документации и т.д.

При проведении вычислительного эксперимента на функционирующей СЗИ от НСД, сертифицированной по 3-му классу защищённости средств вычислительной техники и по 2-му уровню контроля отсутствия недокументированных возможностей, возникли трудности при определении вероятностно-временных характеристик (ВВХ) функционирования подсистемы «Вход в систему», связанные с тем, что выявить данные характеристики возможно только на низком уровне при создании дополнительных функций перехвата Windows Api. Поскольку данный процесс является довольно трудоёмким, в качестве альтернативного пути решения указанной задачи была выбрана разработка математической модели функционирования СЗИ от НСД в АС при помощи имитационного моделирования с использованием специального программного продукта.

**Методы исследования.** Имитационное моделирование — универсальный метод, используемый как при построении модели, так и при описании с достаточной точностью её поведения во времени. Целью разработки подобных моделей является выбор стратегии функционирования СЗИ от НСД по сравнению с имеющимися для получения её лучшего (оптимального) варианта. Разработка имитационных моделей необходима, поскольку коррекцию ошибок и других недостатков предпочтительнее осуществлять на стадии моделирования, чем при реальном создании СЗИ. А при эксплуатации системы имитационная модель может использоваться для определения её ВВХ с целью оценки эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС. Сложившаяся ситуация даёт возможность, используя современные средства моделирования, а также исследования учёных в данной области [9-14], построить подобную модель, основной целью которой служит оценка реального уровня защищённости при создании и эксплуатации СЗИ от НСД в АС.

Построение имитационной модели направлено на определение ВВХ как функционирования СЗИ от НСД в целом, так и её подсистем в АС.

Для имитации функционирования СЗИ от НСД целесообразно использовать программный продукт «CPN Tools», предназначенный для моделирования и анализа, как сетей Петри, так и их разновидностей (цветных сетей Петри, временных сетей Петри).

Выделим основные преимущества пакета «CPN Tools» для имитационного моделирования процесса функционирования СЗИ от НСД:

- наглядность, структурированность и ранжированное описание компонентов имитационной модели;
- модель устраняет недостатки и неопределённости в формальных моделях СЗИ от НСД в АС;
- возможность описания подсистем СЗИ от НСД в АС «Вход в систему», «Разграничения доступа и работа с внешними носителями», «Контроля целостности, регистрации и учёта» а также угроз, влияющих на компоненты системы, в рамках одной сетевой структуры;
- возможность определения ВВХ СЗИ от НСД для оценки эффективности её функционирования с целью проведения вычислительного эксперимента;
- возможность проведения анализа имитационной модели СЗИ от НСД при помощи встроенных механизмов получения различного рода отчётов о её функционировании;
- возможность интеграции СЗИ от НСД в АС, то есть более детального описания её компонентов (например, механизма обработки информации, базы данных и т.д.) [15-18].

Программная среда имитационного моделирования «CPN Tools» доступна, как для операционных систем семейства Windows, так и Linux. В ней существует возможность программирования на унифицированном языке моделирования (UML) «Unified Modeling Language». «CPN Tools» позволяет сгенерировать и проанализировать пространство состояний строящейся модели, получая различного рода отчёты о работе сети.

Имитационное моделирование в «CPN Tools» является дискретно-событийным, то есть предполагающим мгновенную смену состояния сети Петри, что в полной мере соответствует конечному марковскому процессу. Поэтому выбор данного программного продукта является оптимальным для проведения исследования.

«CPN Tools» поддерживает два типа моделирования — интерактивное и автоматическое. При интерактивном моделировании пользователь полностью контролирует работу имитационной модели, а именно самостоятельно, используя встроенные в «CPN Tools» функции, переходит между состояниями до необходимого ему шага моделирования. Отличительной чертой данного типа моделирования является то, что все действия пользователь может наблюдать в графическом режиме, что даёт возможность наблюдать работу модели на каждом шаге моделирования. При автоматическом моделировании пользователь указывает количество шагов, которые должны быть пройдены, устанавливает критерии останова и точки останова. Затем включается процесс симуляции, который моделирует действия системы без участия пользователя, при этом переход между событиями осуществляется случайным образом. В итоге пользователь видит лишь конечное состояние имитационной модели. Результирующий отчёт о проведённых симуляциях будет автоматически сохранён в каталоге создаваемой модели, он содержит пошаговый отчёт о функционировании модели. Преимущество автоматического моделирования по сравнению с интерактивным, заключается в том, что оно позволяет строить имитационные модели больших размеров, поскольку при симуляции выполняется большее число шагов моделирования в секунду.

**Обсуждение результатов.** На основе результатов исследований учёных по практическому применению СЗИ от НСД в АС построим имитационную модель сети Петри, моделирующую действия пользователя [4, 9-14, 19-23]. Для этого представим разработанную модель в программной среде «CPN Tools», как показано на рис. 1.

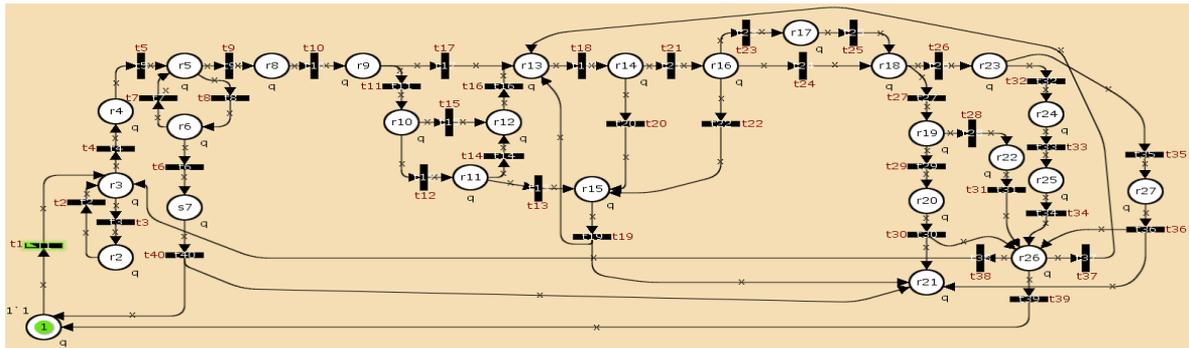


Рис.1.Сеть Петри СЗИ от НСД в АС, построенная в программной среде имитационного моделирования «CPN Tools»

Fig. 1. Petri SZI network from unauthorized access control in the AU, built in the software environment of simulation modeling «CPN Tools»

Имитационная модель является дискретной, динамической, стохастической по причине того, что этими свойствами обладает СЗИ от НСД в АС. Поэтому данная модель будет дискретно-событийной, следственно отражающей свойства во времени, а также мгновенный и случайный переходы из одного состояния в другое [24, 25].

Подробное исследование ВВХ функционирования СЗИ от НСД с обоснованием количества прогонов по сети целесообразно осуществлять на примере моделирования её подсистемы — «Вход в систему» [26].

Поскольку время в «CPN Tools» представляется в виде целого числа, необходимо установить взаимосвязь между реальным и модельным временем функционирования СЗИ от НСД в АС. Выберем для интервала реального времени функционирования СЗИ от НСД следующее соотношение с количеством тактов модельного времени для подсистемы «Вход в систему»: 1 секунда равна 1 такту.

На основе выбранного соотношения установим задержки для всех действий в сети (например, длительность действия «Повторный ввод пароля» в 5 секунд в модели будет составлять 5 тактов модельного времени). Очевидно, что данное соотношение будет оставаться неизменным и при рассмотрении работы всей сети.

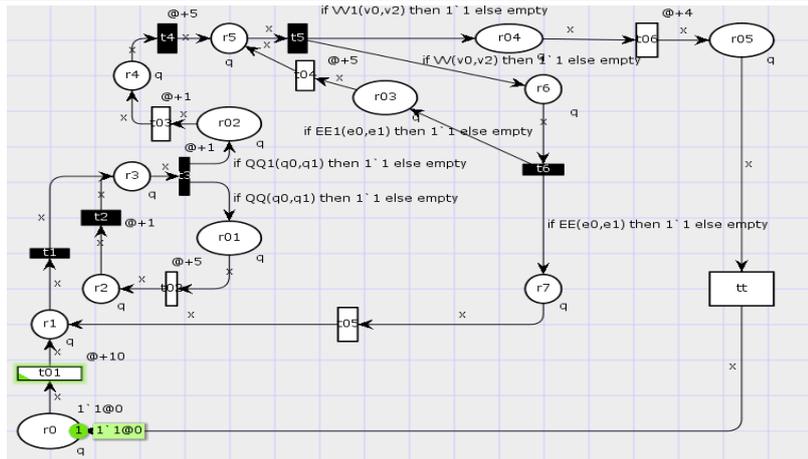
Для построения сети и её функционирования приближённо к реальному поведению проведём конфигурацию в виде создания сегмента кода на языке UML (рис. 2), а саму сеть представим на рис. 3.

```

▼ Declarations
  ► block
  ▼ Standard declarations
    ► colset UNIT
    ► colset INT
    ▼ colset q = int timed;
    ► var x
    ► colset BOOL
    ► colset STRING
    ► fun curTime()=IntInf.toInt(!CPNTime.model_time)
    ▼ colset VV = int with 1..100;
    ▼ colset VV1 = int with 1..100;
    ▼ var v0 : VV;
    ▼ val v2 = 10;
    ▼ var v1 : VV1;
    ▼ fun VV(v0,v2) = (v0<=v2);
    ▼ fun VV1(v0,v2) = (v0>v2);
    ▼ colset QQ = int with 1..100;
    ▼ colset QQ1 = int with 1..100;
    ▼ var q0 : QQ;
    ▼ val q1 = 10;
    ▼ fun QQ(q0,q1) = (q0<=q1);
    ▼ fun QQ1(q0,q1) = (q0>q1);
    ▼ colset EE = int with 1..100;
    ▼ colset EE1 = int with 1..100;
    ▼ var e0 : EE;
    ▼ val e1 = 10;
    ▼ fun EE(e0,e1) = (e0<=e1);
    ▼ fun EE1(e0,e1) = (e0>e1);
    
```

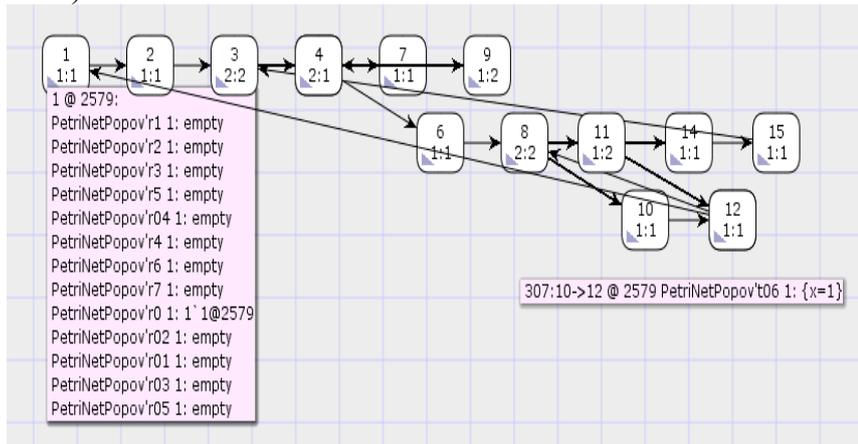
Рис. 2. Настройка сети, имитирующей функционирование подсистемы «Вход в систему» СЗИ от несанкционированного доступа

Fig. 2. Setting up a network that simulates the functioning of the subsystem "Login" GIS from unauthorized access



**Рис. 3. Имитационная модель подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД**  
**Fig. 3. Imitation model of the subsystem "Login" GIS from unauthorized access**

В «CPN Tools» имеется возможность построить пространство состояний с помощью инструмента «Отображение узла пространства состояния с заданным номером». Пространство состояний представляет собой неупорядоченное множество всех компонентов исследуемой системы, которое включает взаимосвязи между ними и информацию о них. Пространство состояний представляется в виде графа сети Петри, узлами которого являются достижимые маркировки исследуемой модели. Для этого создадим новую страницу и воспользуемся имеющимся инструментом (рис. 4).



**Рис. 4. Пространство состояний подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД**  
**Fig. 4. State space of the subsystem "Login" GIS from unauthorized access**

«CPN Tools» предоставляет несколько средств для анализа свойств рассматриваемой системы с использованием пространства состояний. Первоочередным обычно является создание отчёта о состоянии пространства, содержащего информацию о стандартных поведенческих свойствах модели CPN, таких как отсутствие или наличие взаимоблокировок, минимальное и максимальное количество маркеров в позициях.

Пользователь также может интерактивно отображать отдельные части пространства состояний и проверять отдельные состояния и события, что может стать эффективным способом отладки системы. «CPN Tool»s реализует набор функций, которые позволяют пользователю перемещаться по пространству состояний несколькими способами и тем самым исследовать свойства системы.

В пространстве состояний легко заметить, что все вершины имеют потомков, и сеть не является тупиковой. Таким образом, можно констатировать, что все компоненты подсистемы СЗИ от НСД «Вход в систему» взаимосвязаны между собой и исключают ситуацию блокировки.

Более полной информацией о пространстве состояний служит отображение имени срабатывающего перехода на дуге между двумя узлами и маркировкой, соответствующей конкретно-

му узлу (в данном примере это узлы 10 и 12, рис. 4). Для отображения маркировки узла пространства состояний следует кликнуть левой кнопкой мыши на треугольнике соответствующего узла. Пространство состояний с отображением маркировок в узлах и сработавших переходов подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД представлено на рис. 4.

Для проверки полученной сети на адекватность [27] осуществим необходимое количество шагов, в результате которых суммарное количество фишек в позициях «r2» и «r4», «r04» и «r6», «r5» и «r7» составит 50. В состояниях «r2» и «r4» — это 6 и 44 фишки (рис. 5), в состояниях «r04» и «r6» — 45 и 5 фишек (рис. 6), в состояниях «r5» и «r7» — 49 и 1 фишка (рис.7).

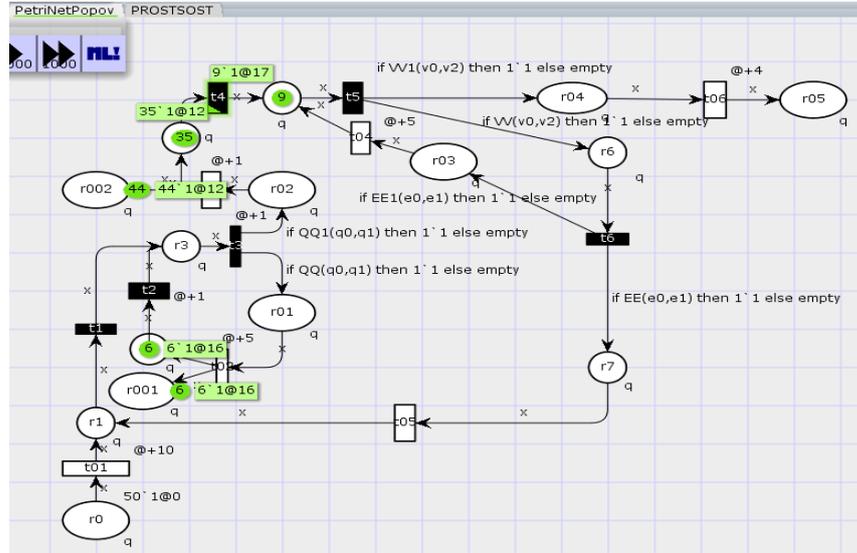


Рис. 5. Прогон модели для определения количества фишек в позициях «r2» и «r4»  
 Fig. 5. Run the model to determine the number of chips in the positions of "r2" and "r4"

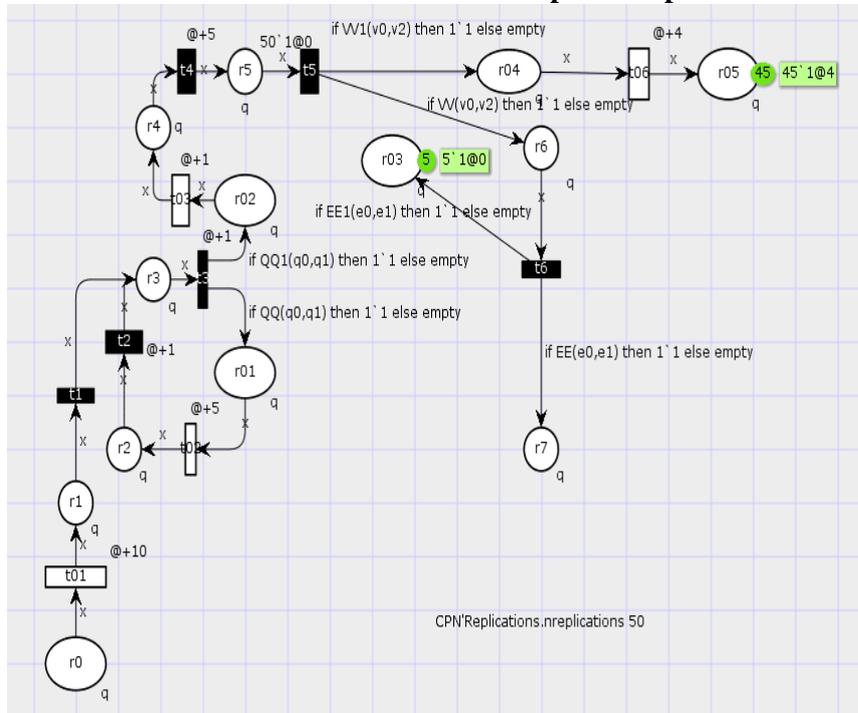


Рис. 6. Прогон модели для определения количества фишек в позициях «r04» и «r6»  
 Fig. 6. Run the model to determine the number of chips in the positions "r04" and "r6"

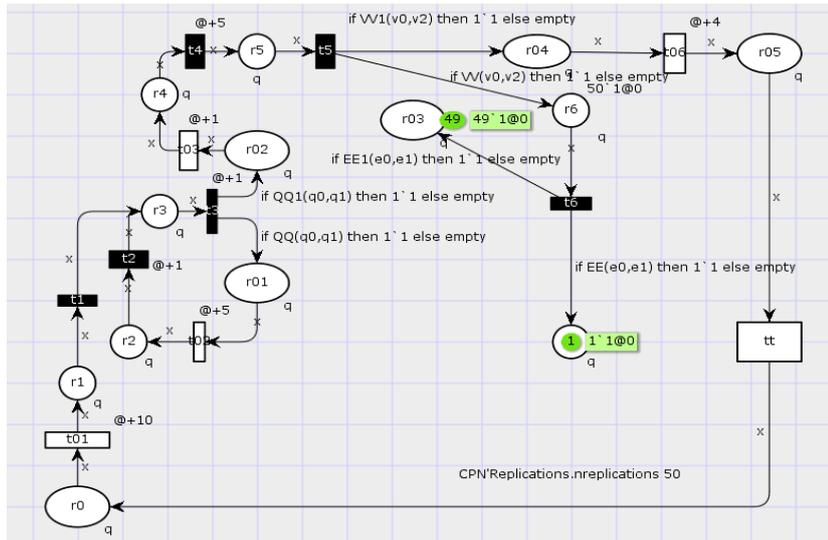


Рис. 7. Прогон модели для определения количества фишек в состояниях «r5» и «r7»

Fig. 7. Run the model to determine the number of chips in the "r5" and "r7" states

С учётом выше изложенного частоту появления фишек в состояниях «r2», «r6», «r7» определим, как:

$$p_{r_2} = \frac{6}{50} = 0,12; p_{r_6} = \frac{5}{50} = 0,1; p_{r_7} = \frac{1}{50} = 0,02. \quad (1)$$

Вычислим с точностью  $\varepsilon = 0,01$  и достаточностью  $D = 0,99$  необходимое количество прогонов по сети N для вероятности появления события [27]:

$$N = \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2} \left[ \Phi_0^{-1} \frac{D}{2} \right]^2, \quad (2)$$

где  $\Phi_0$  — функция Лапласа.

Соответственно необходимое количество прогонов для позиций «r2», «r6», «r7» будет равно:

$$\begin{aligned} N_{r_2} &= \frac{0.12(1-0.12)}{0.01^2} 2.58^2 = 7029,1584 \approx 7030; \\ N_{r_6} &= \frac{0.1(1-0.1)}{0.01^2} 2.58^2 = 5990,76 \approx 5991; \\ N_{r_7} &= \frac{0.02(1-0.02)}{0.01^2} 2.58^2 = 1034,6544 \approx 1035. \end{aligned} \quad (3)$$

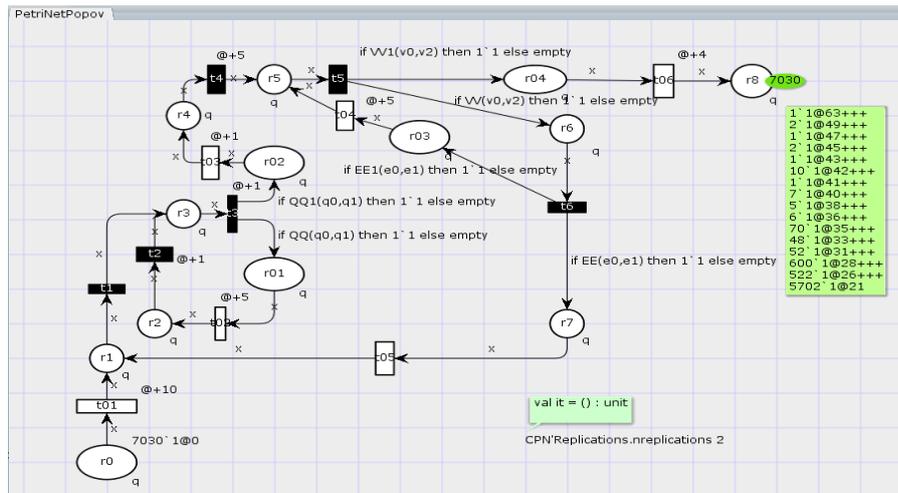
Для определения необходимого количества прогонов по сети для функционирования подсистемы СЗИ от НСД «Вход в систему» выбираем максимальное из трёх полученных значений, округляя его в большую сторону ( $N = 7030$ ) (рис. 8).

При анализе производительности для сбора достоверных ВВХ функционирования СЗИ от НСД необходимо запустить несколько симуляций. Для осуществления автоматического запуска заданного количества симуляций может использоваться функция CPN\Replications.nreplications. При применении инструмента Evaluate ML к коду «CPN\Replications.nreplication 2» будут выполняться два моделирования (рис. 8).

Основная идея репликации моделирования в программной среде «CPN Tools» состоит в сборе оценок из набора независимых статистически идентичных симуляций, которые начинаются и останавливаются одинаково, используя при этом одни и те же входные параметры.

Две статистически идентичные симуляции временной модели функционирования подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД начинаются в одинаковом начальном состоянии и останавливаются при выполнении одного и того же критерия останова. В представленной на рис. 8 модели таким данным критерием является то, что в поглощающее состояние должно прийти

7030 маркеров. Анализ производительности посредством автоматического моделирования, как было сказано выше, реализуется на основе данных из сформированных отчётов.



**Рис. 8. Имитационная модель функционирования подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД с необходимым количеством прогонов**

**Fig. 8. Simulation model of the functioning of the subsystem “Login” NWS from unauthorized access with the required number of runs**

Идея данного анализа заключается в проведении нескольких симуляций имитационной модели, в ходе которых собираются данные о производительности системы. Обычно данные предоставляют информацию о нагрузке на различные состояния, вероятности попадания в состояние и т.д. Сбор данных осуществляется при помощи мониторов, которые указывают, какая именно информация будет собираться. Данные могут быть записаны в электронные таблицы файлов журналов для последующей их обработки и формирования отчётов об эффективности функционирования подсистемы с помощью средних значений, стандартного отклонения и доверительных интервалов.

При запуске симуляций моделирования создаются каталог вывода репликации и отчёт о её состоянии. Отчёт о моделировании репликации может быть сгенерирован, используя соответствующий инструмент, и содержит общую информацию о выполненных симуляциях в каталоге с именем «replication\_report.txt». На рис. 9 представлен отчёт для двух повторений временной модели, в котором выделен раздел для каждой симуляции, определяющий количество смоделированных шагов, время модели и причину её остановки.

```
CPN Tools report for simulation replications
Net: /cygdrive/C/Users/Holmes/Desktop/IMMITACHIONNOE MODEL/CPN Tools1/SZI1/#Popov222222222222222222.cpn
Output directory: /cygdrive/C/Users/Holmes/Desktop/IMMITACHIONNOE MODEL/CPN Tools1/SZI1/output/rep_3

Simulation no.: 1
Steps.....: 54185
Model time....: 43
Stop reason....: No more enabled transitions!
Time to run simulation: 25 seconds

Simulation no.: 2
Steps.....: 54199
Model time....: 45
Stop reason....: No more enabled transitions!
Time to run simulation: 25 seconds
```

**Рис. 9. Отчёт о репликации имитационной модели функционирования подсистемы «Вход в систему» СЗИ от НСД**

**Fig. 9. Report on replication of the simulation model of the operation of the subsystem “Login to the System” of GIS from unauthorized access**

**Вывод.** В данной статье разработана имитационная модель процесса функционирования СЗИ от НСД в программной среде «CPN Tools» и обосновано количество её прогонов. По срав-

нению с другими видами моделей предложенная имитационная модель позволяет улучшить качество разработки и функционирования СЗИ от НСД в АС. Указанная модель необходима для проведения вычислительного эксперимента с целью анализа и исследования реальных потребительских свойств СЗИ от НСД в АС, а также для разработки программного комплекса анализа и количественной оценки эффективности функционирования системы. Результаты имитационного моделирования процесса функционирования СЗИ от НСД в АС могут быть представлены в виде различных характеристик каждого состояния, описывающих работу как системы в целом, так и её подсистем. Предложенная имитационная модель функционирования СЗИ от НСД в АС может использоваться как основа для построения моделей воздействия различных видов угроз [28, 29] информационному ресурсу АС согласно банку данных ФСТЭК России, а также для исследования ВВХ, влияющих на вычислительные ресурсы системы, а, следовательно, на эффективность её функционирования по прямому назначению.

#### **Библиографический список:**

1. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения // М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2006. — 12 с.
2. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. М.: Воениздат, 1992. 16 с.
3. ГОСТ Р 15408-2013. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. — М.: Стандартинформ, 2014. 152 с.
4. Математическая модель оценки эффективности систем защиты информации с использованием преобразования Лапласа и численного метода Гивенса / И.Г. Дровникова [и др.] // Труды СПИИРАН. № 3 (52) (2017). С.-Пб.: СПИИРАН, 2017. № 3(52). С. 234–258. DOI 10.15622/sp.52.
5. Беляева О.В. Имитационное моделирование систем защиты информации / О.В. Беляева, В.А. Грицык // Международный журнал экспериментального образования. 2010. № 5. С. 67.
6. Григорьев В.А. Имитационная модель системы защиты информации / В.А. Григорьев, А.В. Карпов // Программные продукты и системы. 2005. № 2. С. 26–30.
7. «Страж NT». Руководство администратора. URL: [http://www.guardnt.ru/download/doc/admin\\_guide\\_nt\\_3\\_0.pdf](http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf) (дата обращения: 23.07.2018).
8. Система защиты информации от несанкционированного доступа «Страж NT». Описание применения. URL: <http://www.rubinteh.ru/public/opis30.pdf> (дата обращения: 23.07.2018).
9. 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.
10. Меньших В.В. Получение оценок эффективности системы защиты информации с использованием автоматной модели имитации функционирования защищённой информационной системы / В.В. Меньших, Е.В. Петрова // Информация и безопасность. 2011. Т. 14. № 1. С. 125–128.
11. 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.
12. 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.
13. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы / Ю.Н. Павловский. — М.: Фазис: ВЦ РАН, 2000. С. 134.
14. Краснощёков П.С. Оптимизация в автоматизированном проектировании / П.С. Краснощёков, В.В. Морозов, Н.М. Попов. М.: МАКС Пресс, 2008. 323 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Исааков С.Ю. Имитационная модель комплексной сети систем безопасности / С.Ю. Исааков, А.А. Шелупанов, А.Ю. Исааков // Управление, вычислительная техника и информатика. Доклады ТУСУРа. — 2014. — Вып. 2 (32). — С. 82–86.
19. Yang N. Modeling and quantitatively predicting software security based on stochastic Petri nets / N. Yang, H. Yu, Z. Qian, H. Sun // Mathematical and Computer Modelling. — 2012. — Vol. 55. — Issues 1–2. — pp.102–112.
20. Klaić A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaić, M. Golub // Journal of Economics / Business and Management. — 2013. — vol. 1. — Issue 4. — pp. 371–376.

21. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // *Information & Management*. 2015. vol. 52. Issue 1. — pp. 123–134.
22. Complex Event Processing Modeling by Prioritized Colored Petri Nets / H. Macià [and others] // *IEEE Access*. 2016. — vol 4. pp. 7425–7439.
23. Стельмашонок Е.В. Возможности имитационного моделирования для исследования функционирования системы защиты информации / Е.В. Стельмашонок, В.Л. Стельмашонок // *Петербургский экономический журнал*. 2017. №4. С. 57–68.
24. Алгоритм имитационной модели противодействия несанкционированному доступу к автоматизированной информационной системе специального назначения средствами защиты информации / С.С. Кочедыков [и др.] // *Математические методы и информационные технологии управления в науке, образовании и правоохранительной сфере*. 2017. С. 98–103.
25. Бугров Ю.Г. Повышение качества имитационной модели системы защиты информации / Ю.Г. Бугров, В.В. Мирошников, Д.В. Кочергин // *Информация и безопасность*. 2008. Т. 11. № 1. С. 69–73.
26. Rogozin E.A. Модель функционирования типовой системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных информационных системах ОВД / Е.А. Рогозин, А.Д. Попов // *Вестник Воронежского института МВД России*. 2016. № 4. С. 122–132.
27. Синегубов С.В. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций / С.В. Синегубов. Воронеж: Воронеж. ин-т МВД России, 2016. — 336 с.
28. Моделирование многоуровневых систем защиты информации REDS / А.В. Володько [и др.] // *Телекоммуникационные устройства и системы*. 2014. С. 423–426.
29. Климов С.М. Имитационные модели испытаний критически важных информационных объектов в условиях компьютерных атак / С.М. Климов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 8 (181). С. 27–36.

#### References:

1. GOST R 50922-2006. Zashchita informatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya // М.: Federal'noye agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii, 2006. — 12 с. [GOST R 50922-2006. Data protection. Basic terms and definitions. — М.: Federal'noye agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii, 2006. 12 p. (in Russ)].
2. FSTEC RF. Rukovodyashchiy dokument. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovan-nogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii. — М.: Voenizdat, 1992. — 16 s. [FSTEC RF. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for information security. — М.: Military Publishing, 1992. — 16 p. (in Russ) ].
3. GOST R 15408-2013. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. М.: Standartinform, 2014. 152 с [GOST R 15408-2013. The order of creation of the automated systems of protected construction Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technology. М.: STANDARTINFORM, 2014. 152 p. (in Russ)].
4. Matematicheskaya model' otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii s ispol'zovaniyem pre-obrazovaniya Laplasy i chislennogo metoda Givensa / I.G. Drovnikova [i dr.] // *Trudy SPIIRAN*. № 3 (52) (2017). S.-Pb.: SPIIRAN, 2017. № 3(52). S. 234–258. DOI 10.15622/sp.52. [Mathematical model for estimating the efficiency of information security systems by means of Laplace transformation and Givens method / I.G. Drovnikova [and others] // *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2017. Vol. 3(52). pp. 234–258 (in Russ)].
5. Belyayeva O.V. Imitatsionnoye modelirovaniye sistem zashchity informatsii / O.V. Belyayeva, V.A. Gritsyk // *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2010. № 5. S. 67. [Belyaeva O.V. Simulation modeling of information security systems / O.V. Belyaeva, V.A. Gricyk // *Mezhdunarodnyj zhurnal ehksperimental'nogo obrazovaniya*. 2010. vol 5. pp. 67 (in Russ)]
6. Grigor'yev V.A. Imitatsionnaya model' sistemy zashchity informatsii / V.A. Grigor'yev, A.V. Karpov // *Programmnyye produkty i sistemy*. 2005. № 2. S. 26–30. [Grigor'ev V.A. Simulation model of information security system / V.A. Grigor'ev, A.V. Karpov // *Programmnyye produkty i sistemy*. 2005. Vol. 2. pp. 26–30 (in Russ)].
7. «Strazh NT». Rukovodstvo administratora. «The Guardian NT». [Administrator's guide. Available at: <http://www.rubinteh.ru/public/opis30.pdf> (accessed 23.07.2018) (in Russ)].
8. Sistema zashchity informacii ot nesankcionirovannogo dostupa «Strazh NT». Opisanie primeneniya. [System of protection of information from unauthorized access «Guardian NT». Description of the application. Available at: [http://www.guardnt.ru/download/doc/admin\\_guide\\_nt\\_3\\_0.pdf](http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf) (accessed 23.07.2018) (in Russ)].
9. 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.
10. Men'shikh V.V. Polucheniye otsenok effektivnosti sistemy zashchity informatsii s ispol'zovaniyem avtomatnoy modeli imitatsii funktsionirovaniya zashchishchonnoy informatsionnoy sistemy / V.V. Men'shikh, Ye.V. Petrova // *Informatsiya i bezopasnost'*. 2011. Т. 14. № 1. S. 125–128. Men'shikh V.V. Obtaining assessments of the effectiveness of the information security system using the automatic model of simulating the functioning of a secure in-

- formation system / V.V. Men'shih, E.V. Petrova // *Informaciya i bezopasnost'*. 2011. vol. 16. Issue 1. pp. 125–128 (in Russ)].
11. 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.
  12. 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.
  13. 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)].
  14. 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)].
  15. 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.
  16. 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.
  17. 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.
  18. Iskhakov S.YU. Imitatsionnaya model' kompleksnoy seti sistem bezopasnosti / S.YU. Iskhakov, A.A. Shelupanov, A.YU. Iskhakov // *Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. Doklady TU-SURa*. 2014. Vyp. 2 (32). С. 82–86. [Iskhakov S.Yu. Simulation model of an integrated network of security systems / S.Yu. Iskhakov, A.A. SHelupanov, A.Yu. Iskhakov // *Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. Doklady TUSURa*. 2014. Vol. 32. Issue 2. pp. 82–86 (in Russ)]
  19. Yang N. Modeling and quantitatively predicting software security based on stochastic Petri nets / N. Yang, H. Yu, Z. Qian, H. Sun // *Mathematical and Computer Modelling*. 2012. Vol. 55. Issues 1–2. Pp. 102–112.
  20. Klaic A. Conceptual Modeling of Information Systems within the Information Security Policies / A. Klaic, M. Golub // *Journal of Economics/ Business and Management*. 2013. Vol. 1. Issue 4. Pp. 371–376.
  21. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // *Information & Management*. 2015. Vol. 52. Issue 1. pp. 123–134.
  22. Complex Event Processing Modeling by Prioritized Colored Petri Nets / H. Macià [and others] // *IEEE Access*. 2016. vol 4. Pp. 7425–7439.
  23. Stel'mashonok Ye.V. Vozmozhnosti imitatsionnogo modelirovaniya dlya issledovaniya funktsionirovaniya sistemy zashchity informatsii / Ye.V. Stel'mashonok, V.L. Stel'mashonok // *Peterburgskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2017. №4. S. 57–68. [Stel'mashonok E.V. The possibilities of simulation for the study of the functioning of the information security system / E.V. Stel'mashonok, V.L. Stel'mashonok // *Peterburgskij ehkonomicheskij zhurnal*. 2017. vol. 4. Pp. 57–68 (in Russ)].
  24. Algoritm imitatsionnoy modeli protivodeystviya nesanktsionirovannomu dostupu k avtomatizirovannoy informatsionnoy sisteme spetsial'nogo naznacheniya sredstvami zashchity informatsii / S.S. Kochedykov [i dr.] // *Matemachieskiye metody i informatsionnyye tekhnologii upravleniya v nauke, obrazovanii i pravookhranitel'noy sfere*. 2017. S. 98–103. [Algorithm of the simulation model of counteraction to unauthorized access to an automated information system of a special purpose by means of information security / S.S. Kochedykov [and others] // *Matemachieskiye metody i informacionnyye tekhnologii upravleniya v nauke, obrazovanii i pravookhranitel'noy sfere*. 2017. pp. 98–103 (in Russ)].
  25. Bugrov YU.G. Povysheniye kachestva imitatsionnoy modeli sistemy zashchity informatsii / YU.G. Bugrov, V.V. Miroshnikov, D.V. Kochergin // *Informaciya i bezopasnost'*. 2008. T. 11. № 1. S. 69–73. [Bugrov Yu.G. Improving the quality of the simulation model of the information security system / Yu.G. Bugrov, V.V. Miroshnikov, D.V. Kochergin // *Informaciya i bezopasnost'*. 2008. Vol. 11. Issue 1. Pp. 69–73 (in Russ)]
  26. Rogozin Ye.A. Model' funktsionirovaniya tipovoy sistemy zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh OVD / Ye.A. Rogozin, A.D. Popov // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2016. № 4. S. 122–132. [Rogozin E.A. Model operation of the standard information system of protection against unauthorized access to automated information systems of the Law Enforces Agencies / E.A. Rogozin, A.D. Popov // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* — *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*. 2016. № 4. Pp. 122–132 (in Russ)]
  27. Sinogubov S.V. Modelirovaniye sistem i setey telekommunikatsiy / S.V. Sinogubov. Voronezh: Voronezh. in-t MVD Rossii, 2016. 336 s. [Sinogubov S.V. Modelirovanie sistem i setey telekommunikacij / S.V. Sinogubov— Voronezh: Voronezh. Institute of MIA of Russia. 2016. 336 p. (in Russ)]
  28. Modelirovaniye mnogourovnevnykh sistem zashchity informatsii REDS / A.V. Volod'ko [i dr.] // *Telekommunikatsionnyye ustrojstva i sistemy*. 2014. S. 423–426. [Modeling of multi-level information security systems REDS / A.V. Volod'ko [and others] // *Telekommunikacionnyye ustrojstva i sistemy*. 2014. Pp. 423–426 (in Russ)]

29. Klimov S.M. Imitatsionnyye modeli ispytaniy kriticheski vazhnykh informatsionnykh ob"yektov v usloviyakh komp'yuternykh atak / S.M. Klimov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki. 2016. № 8 (181). S. 27–36. [Klimov S.M. Simulation models of testing critical information objects in conditions of computer attacks / S.M. Klimov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki. 2016. Vol. 181 Issue 1. pp. 27–36 (in Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Бокова Оксана Игоревна** — доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Воронежского института МВД России по научной работе.

**Дровникова Ирина Григорьевна** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Воронежского института МВД России.

**Попов Антон Дмитриевич** — преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Воронежского института МВД России.

**Рогозин Евгений Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Воронежского института МВД России.

**Information about the authors:**

**Oksana I. Bokova** – Dr.Sci. (Technical), Prof., Deputy Head of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia for Scientific Work.

**Irina G. Drovnikova** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

**Anton D. Popov** – Lecturer at the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Agencies

**Evgeny A. Rogozin** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 15.12.2018.

**Принята в печать** 30.01.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 15.12.2018.

**Accepted for publication** 30.01.2019.

**Для цитирования:** Бужинская Н.В., Васева Е.С., Искандаров Р.Н., Шубина Н.В. Система контроля и управления доступом на базе микроконтроллеров ARDUINO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1): 103-112. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-103-112

**For citation:** Buzhinskaya N. V., Vaseva E. S., Iskandarov R. N., Shubina N. V. System of control and management of access on the basis of ARDUINO microcontrollers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 103-112. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-103-112

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.78:681.139.32

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-103-112

### СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO

Бужинская Н.В.<sup>2</sup>, Васева Е.С.<sup>3</sup>, Искандаров Р.Н.<sup>4</sup>, Шубина Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1-3</sup> Нижнетагильский государственный социально-педагогический институт (филиал)

<sup>1-3</sup> Российского государственного профессионально-педагогического университета,

<sup>1-3</sup> 622031, Свердловская обл., г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 57, Россия,

<sup>4</sup> ООО «Баранчинский электромеханический завод имени Калинина»,

<sup>4</sup> 624315, Свердловская обл., г. Кушва, п. Баранчинский, ул. Ленина, 2, Россия,

<sup>1</sup> e-mail:nata-shubina@yandex.ru, <sup>2</sup> e-mail:nadezhda\_v\_a@mail.ru,

<sup>3</sup> e-mail:e-s-vaseva@mail.ru, <sup>4</sup> e-mail:grim\_sleeper@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является выбор методов и средств для эффективной модернизации системы безопасности, существующей на предприятии. **Метод.** Усовершенствование пропускного режима предлагается осуществить с помощью системы контроля и управления доступом на базе микроконтроллеров ARDUINO. Для выделения функций данной системы и требований к ней были построены UML-диаграммы. На основе этих диаграмм была разработана принципиальная электрическая схема аппаратной части системы с указанием всех входящих в нее элементов. На следующем этапе был предложен алгоритм работы аппаратной части системы контроля и управления доступом. Реализация части алгоритма для обмена информацией между устройством и информационной системой продемонстрирована в виде скетча на примере передачи пакетов по сети Ethernet по протоколу TCP. Для взаимодействия между системой и конечным пользователем был разработан интуитивно-понятный интерфейс. Необходимая информация хранится в базе данных, созданной в среде Microsoft SQL Server. **Результат.** Разрабатываемая система была протестирована на предприятии посредством скетчей и мультиметра. Результаты тестирования позволяют сделать вывод, что система готова к внедрению. **Вывод.** В статье рассмотрен один из методов модернизации существующей системы контроля и управления доступом за счет более удобного интерфейса и добавления функций входа/выхода.

Работа выполнена по заказу предприятия ООО «Баранчинский электромеханический завод им. Калинина».

**Ключевые слова:** автоматизированная система контроля и управления доступом, проектирование, микроконтроллер, ARDUINO, скетч, интерфейс

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### SYSTEM OF CONTROL AND MANAGEMENT OF ACCESS ON THE BASIS OF ARDUINO MICROCONTROLLERS

*Nadezhda V. Buzhinskaya<sup>2</sup>, Elena S. Vaseva<sup>3</sup>, Rustam N. Iskandarov<sup>4</sup>, Natalya V. Shubina<sup>1</sup>*

<sup>1-3</sup>Nizhny Tagil State Social-Pedagogical Institute (branch),

<sup>1-3</sup>Russian State Vocational-Pedagogical University»,

<sup>1-3</sup>57, Krasnogvardeyskaya Str., Sverdlovsk Region, Nizhny Tagil 622031, Russia,

<sup>4</sup>LLC «Kalinin Baranchinsky Electromechanical Plant»

<sup>4</sup>2, Lenin Str., Sverdlovsk region, Kushva, p. Baranchinsky 624315, Russia,

<sup>1</sup>e-mail:nata-shubina@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail:nadezhda\_v\_a@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail:e-s-vaseva@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail:grim\_sleeper@mail.ru

**Abstract. Objectives** The aim of the study is to select methods and means for the effective modernization of the security system existing in the enterprise. **Method** It is proposed to improve the access control mode using the access control system based on ARDUINO microcontrollers. To highlight the functions of the system and the requirements for it were built UML-diagrams. On the basis of these diagrams, the balls have developed a schematic electrical diagram of the hardware of the system with an indication of all its elements. At the next stage, an algorithm was proposed for the operation of the hardware of the access control system. The implementation of a part of the algorithm for information exchange between the device and the information system is shown in the form of a sketch using the example of packet transmission over an Ethernet network using the TCP protocol. An intuitive interface has been developed for interaction between the access control system and the end user. The necessary information is stored in a database created in a Microsoft SQL Server environment. **Result** The developed system was tested at the enterprise by means of sketches and a multimeter. Test results allow us to conclude that the system is ready for implementation. **Conclusion** The article describes one of the methods for upgrading the existing access control system through a more user-friendly interface and the addition of entry/exit functions.

**Acknowledgments** The work was commissioned by the company LLC «Kalinin Baranchinsky Electromechanical Plant».

**Keywords:** automated access control system, design, microcontroller, ARDUINO, sketch, interface

**Введение.** В настоящее время автоматизированные системы контроля и управления доступом (СКУД) являются составной частью информационной инфраструктуры и незаменимым элементом системы безопасности современного предприятия [1-4].

В общем случае под системой контроля и управления доступом понимают совокупность программно-технических и организационно-методических средств, с помощью которых решается задача контроля и управления помещениями предприятия, а также оперативный контроль за передвижением персонала и временем его нахождения на территории предприятия [5]. С помощью системы контроля и управления доступом, предприятие имеет возможность поднять уровень общей безопасности, а также сократить затраты на ее обеспечение [6]. Кроме того, СКУД предполагает меньшее количество персонала для обслуживания, она экономична в потреблении электроэнергии [7].

Для того, чтобы система четко и бесперебойно выполняла свои функции, решала все поставленные задачи и обеспечивала максимальный экономический эффект от своей эксплуатации, она должна быть грамотно спроектирована, качественно смонтирована, интегрирована с другими системами безопасности [8-9]. Проектирование и разработку СКУД будем рассматривать для предприятия ООО «Баранчинский электромеханический завод им. Калинина».

**Постановка задачи.** Анализ деятельности предприятия ООО «Баранчинский

электромеханический завод им. Калинина» выявил проблемы в работе пропускной системы. Они обусловлены тем, что имеющаяся на предприятии СКУД имеет ряд недостатков:

- низкая отказоустойчивость;
- неудобный для администрирования системы интерфейс;
- отсутствие возможности масштабирования;
- дорогостоящие комплектующие;
- отсутствие функции ограничения входа/выхода в неположенное время.

Для решения указанных проблем возникла необходимость в усовершенствовании данной системы.

**Методы исследования.** На центральной и малой проходной завода установлены контроллеры PERCo-CT/L04, турникеты – триподы PERCo-TTR-04, считыватели PERCo-IR03.

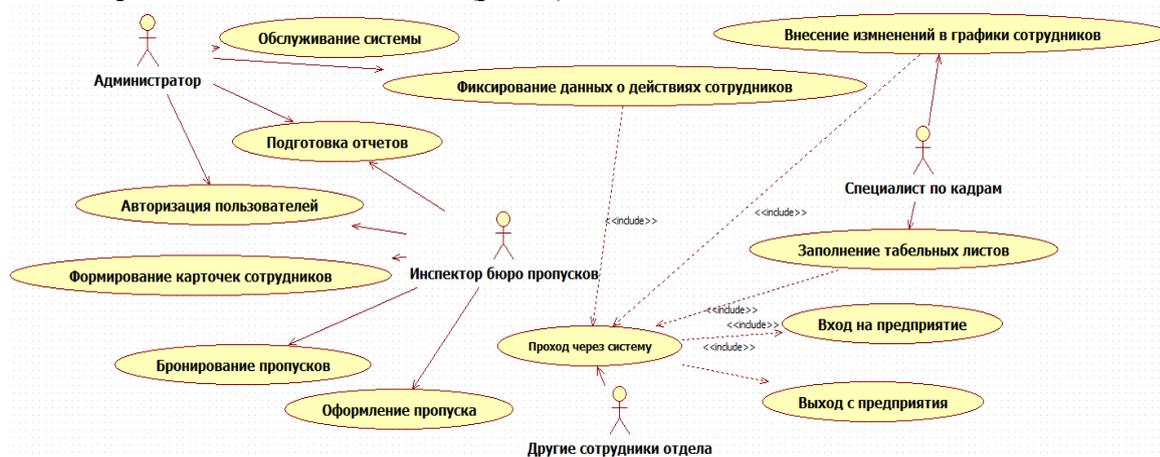
Проход осуществляется по бесконтактным проксимити-картам Mifare. Эти карты позволяют не только осуществлять доступ, но и хранить в памяти записанную на них информацию [10].

Вся система функционирует на программном обеспечении «Барс.СКД».

Разрабатываемая СКУД будет служить дополнением к существующей охранной системе предприятия. Она будет нацелена на усовершенствование пропускного режима складских помещений на предприятии.

**Проектирование СКУД.** Первый этап работы предполагает выделение требований к системе и определение ее функционала. Для решения данной задачи были построены UML-диаграммы, предназначенные для графического описания особенностей работы программных продуктов [11, 12].

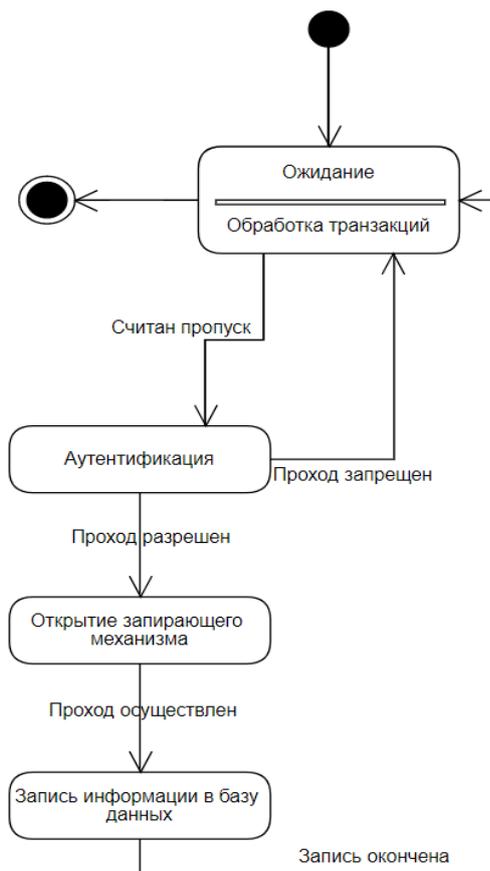
На диаграмме вариантов использования (use case diagram) показаны отношения между актерами и вариантами использования (рис. 1).



**Рис. 1. Диаграмма вариантов использования, иллюстрирующая требования к системе**  
**Fig. 1. Chart of use cases illustrating system requirements**

На рис. 1 отражены администратор системы, инспектор бюро пропусков, специалист по кадровому учету и другие сотрудники. Инспектор бюро пропусков формирует карточки сотрудников, привязывает к ним идентификатор метки (RFID) и передает данные в систему контроля доступом. Администратор системы следит за работоспособностью системы, создает и управляет учетными записями пользователей. Специалист по кадрам вносит изменения в структуру подразделений, которая используется СКУД для разграничения доступа по определенным зонам контроля, создает отчеты на основании статистики. Статистика формируется автоматически на основании информации переданной микроконтроллером в программную часть программно-аппаратного комплекса (ПАК). Система взаимодействует с остальными сотрудниками, считывая их пропуска (метки) и запрещая/разрешая проход через определенную зону контроля, а также фиксирует их проход в журнале событий.

Рассмотреть более детально алгоритм работы аппаратной части СКУД позволяет диаграмма состояний (рис. 2).



**Рис. 2. Диаграмма состояний, на которой продемонстрирован алгоритм работы аппаратной части**  
**Fig. 2. The activity diagram, which demonstrates the algorithm of the hardware**

При прикладывании пропуска сотрудником и считывании данных происходит аутентификация. В результате аутентификации система реагирует на событие: открывает запирающий механизм или игнорирует действия сотрудника, переходя в изначальное состояние. При выполнении вышеуказанных действий система записывает все события в журнал.

Разработка аппаратной части. В качестве платформы для разработки контроллера СКУД используется платформа Arduino Mega 2560 R3 [13-16]. По способу управления разрабатываемый контроллер относится к сетевым, что позволяет создать СКУД любой степени сложности. К платформе Arduino добавлена плата расширения Ethernetshield W5100 forMega. Данная плата позволяет использовать передачу данных по сети Ethernet, а также имеет разъем для подключения SD-карты, используемой для хранения информации. Для считывания карт к контроллеру подключен считыватель RC-522, который позволяет считывать данные с проксимити-карт.

В качестве исполнительных устройств, для осуществления пропускного режима в системе контроля ограниченного доступа используются электромагнитные замки.

В итоге аппаратная часть проектируемого ПАК будет состоять из следующих элементов:

- плата Arduino Mega 2560 R3 – 1 шт;
- плата расширения Ethernet W5100 – 1 шт;
- считыватель меток RFID RC522 – 3 шт;
- управляемое реле keyes\_srlу – 1 шт;
- светодиод красный/зеленый – 2 шт;
- резистор 220 Ом – 2 шт;
- печатная плата 9x15 – 1 шт;
- плата Arduino Nano – 2 шт;

- оптический кросс 8 портов FC/ST – 1 шт;
- коммуникационный модуль RS-485 – 5 шт;
- модуль часов реального времени – 1 шт;
- спикер Zimmershield – 1 шт.

На рис. 3 представлена принципиальная электрическая схема, отображающая взаимосвязь элементов в проектируемой системе. В ГОСТ 2.701-2008 принципиальная схема определяется как «схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия» [17].

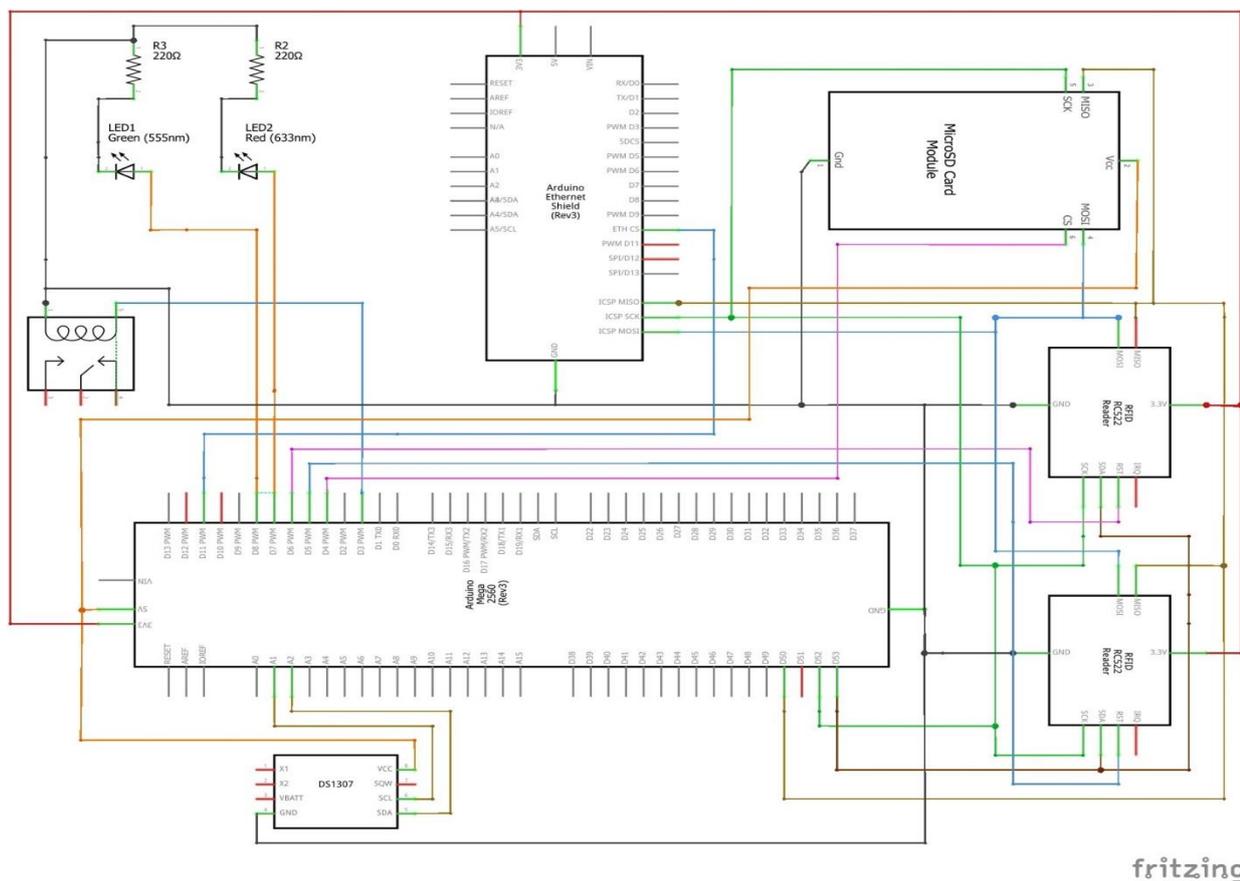


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема  
Fig. 3. Schematic circuit

Сборка контроллера начинается с подготовки печатной платы. Для соединения элементов устройства на плату наносятся контактные дорожки. После нанесения дорожек на плате располагаются элементы устройства и их выводы запаиваются к контактным площадкам. Результат проделанной работы представлен на рис. 4. В дальнейшем устройство размещается в корпусе.

С метки считывается идентификатор и переводится в десятичную систему счисления. Полученное число сравнивается с имеющимися на flash-карте сигнатурами. Если проверка успешна, то спикер контроллера воспроизводит одиночный сигнал, и, одновременно на карте памяти сохраняется соответствующий лог файл.

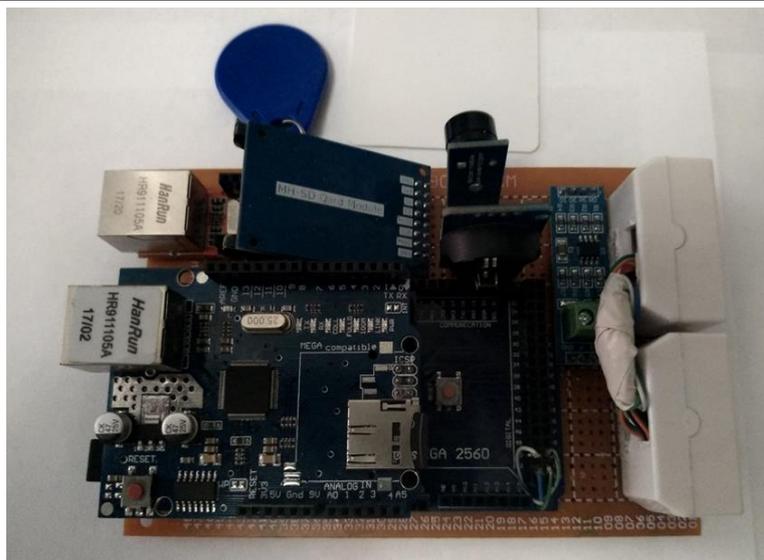


Рис. 4. Расположение элементов СКУД на печатной плате  
Fig. 4. The location of the access control elements on the PCB

Исполняющее устройство в свою очередь переводится в состояние отличное от текущего на указанный промежуток времени. В противном случае, спикер контроллера воспроизводит два последовательных звуковых сигнала и исполняющее устройство не меняет свое состояние.

*Разработка программной части.* Программная часть состоит из двух скетчей, для написания которых была использована среда разработки ArduinoIDE [18]. Обмен информацией между устройством и информационной системой осуществляется путем передачи пакетов по сети Ethernet по протоколу TCP.

*Разработка пользовательского интерфейса.* Пользовательский интерфейс (рис. 5) выступает в качестве звена взаимодействия между СКУД и конечным пользователем. Он представляет собой окно, на котором расположены различные элементы взаимодействия: кнопки, таблицы, изображения, графический указатель, элементы прокрутки [19].

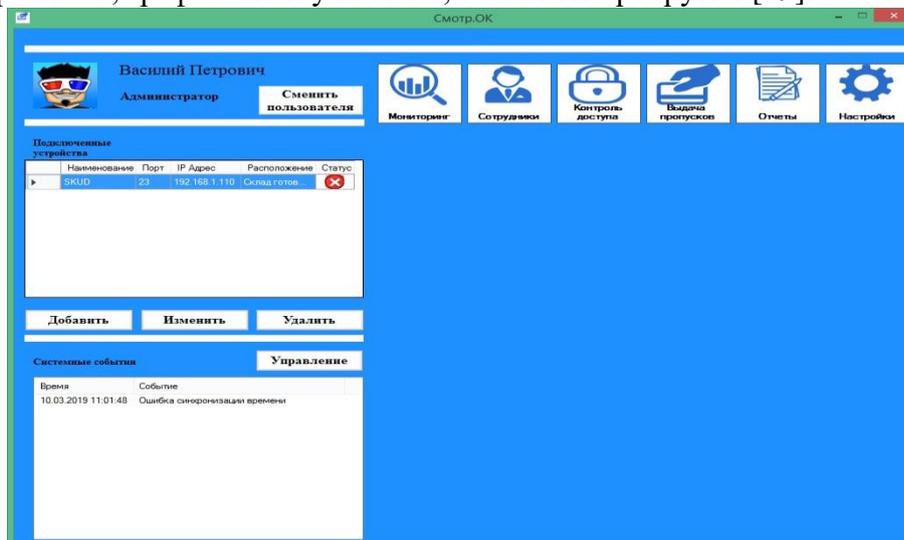


Рис. 5. Пользовательский интерфейс системы  
Fig. 5. System user interface

Пользователю, при наличии прав, доступны следующие функции: авторизация, управление пользователями системы, просмотр системных журналов, настройки подключения сетевых аппаратных устройств, работа с отчетами, формирование карточек сотрудников, работа с пропусками, работа с производственным календарем, работа с табельными листами, редактирование внесенной структуры предприятия.

Каждый сотрудник имеет право доступа в определенные зоны в установленное время. Информация о «разрешениях доступа» хранится в базе данных, реализованной посредством СУБД Microsoft SQL Server [20]. В дальнейшем информационная система генерирует SQL запросы для получения/изменения данных.

**Обсуждение результатов.** Для тестирования работоспособности устройства применяются специально подготовленные тестовые скетчи (листинг 1) и мультиметр.

Все основные элементы устройства тестируются по отдельности. В частности отдельно тестируется работа Ethernet-модуля, модуля RS485, модуля часов реального времени, а также связующие элементы (дорожки печатной платы, разъемы).

**Листинг 1. Фрагмент тестового скетча для проверки RFID**  
**Listing 1. RFID test fragment**

```
void RFID()
{
  if (rfid.isCard())
  {
    if (rfid.readCardSerial())
    {
      if (rfid.serNum[0] != serNum0
        &&rfid.serNum[1] != serNum1
        &&rfid.serNum[2] != serNum2
        &&rfid.serNum[3] != serNum3
        &&rfid.serNum[4] != serNum4)
      {
        serNum0 = rfid.serNum[0];
        serNum1 = rfid.serNum[1];
        serNum2 = rfid.serNum[2];
        serNum3 = rfid.serNum[3];
        serNum4 = rfid.serNum[4];
        serNumTotal = String(serNum0)+String(serNum1)+String(serNum2)+String(serNum3)+String(serNum4);
        for (byte i = 0; serNumTotal.length() < 15; i++) // Метка дописывается до 15 символов
        {serNumTotal = serNumTotal + 1;}
        digitalWrite(SerialTxControl, RS485Transmit);
        Serial.print(serNumTotal);
        delay(20);
        digitalWrite(SerialTxControl, RS485Receive);
      }
    }
    else
    { rfidres ++;
      if (rfidres == 70) {
        serNum0 = 0;
        serNum1 = 0;
        serNum2 = 0;
        serNum3 = 0;
        serNum4 = 0;
        rfidres = 0;
      } } }
    rfid.halt();
  }
}
```

Поскольку известен функционал программы, основным методом тестирования является метод «Черного ящика» [21, 22]. В процессе тестирования исследовалась работа каждой функции на всей области определения. При этом основное внимание акцентируется на работе основных аспектов системы.

С помощью данных тестов отслеживались результаты:

- выполнения функций программы [23];
- приема исходных данных;
- обработки данных [24];
- сохранения целостности внешней информации [25].

Результаты тестирования представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Фрагмент таблицы результатов тестирования работы системы**  
**Table 1. Fragment of the system test results table**

№	Описание Description	Входные данные Input data	Ожидаемый результат Expected Result
1	Проверка цепей на наличие обрыва Check for open circuit	Проверка проводилась при помощи мультиметра в режиме прозвонки The test was carried out using a multimeter in dialing mode	Обрыв в цепи не обнаружен Open circuit not detected
2	Проверка цепей на наличие короткого замыкания Checking for short circuits	Проверка проводилась при помощи мультиметра в режиме прозвонки The test was carried out using a multimeter in dialing mode	Короткого замыкания не найдено Short circuit not found
3	Проверка считывателей, платы расширения Ethernet, модуля часов реального времени, прочие платы расширения Verification of readers, Ethernet expansion cards, real-time clock module, other expansion cards	Проверка производилась при помощи тестовых скетчей, в результате все платы расширения подключены правильно и функционируют исправно The test was performed using test sketches, as a result, all expansion cards are connected correctly and function properly.	Платы расширения протестированы по отдельности и исправны Expansion cards are tested separately and in good condition.
4	Попытка ввода несуществующих данных пользователя Attempt to enter non-existing user data	Несуществующий логин и/или пароль Nonexistent login and / or password	Авторизация не удалась Login failed
5	Попытка просмотра списка пользователей Attempt to view user list	Щелчок мыши по вкладке «Пользователи» Click on the tab "Users"	Открылась форма «Пользователи» The form "Users" has opened
6	Попытка просмотра списка сотрудников Attempt to view the list of employees	Щелчок мыши по вкладке «Сотрудники» Click on the tab "Employees"	Открылась форма «Сотрудники» The form "Employees" has opened

В результате проведенных тестов установлено, что все компоненты аппаратной и программной части СКУД исправны и функционируют согласно требованиям.

**Вывод.** Разработанная система ориентирована не только на текущее состояние складского объекта, но и на перспективу. Она позволит наращивать возможности функционирования, благодаря гибкой структуре и возможности изменения кода. В дальнейшем планируется увеличивать масштабы системы и дополнить ее новыми компонентами, такими как охранно-пожарная сигнализация, видеонаблюдение, платежная система, инженерные системы здания, информационные системы и системы коммуникаций организации.

#### Библиографический список

1. Барсуков В. С. Безопасность: технологии, средства, услуги. – М. : КУДИЦ – ОБРАЗ, 2001. – 496 с.
2. Гафнер В. В. Информационная безопасность: Учебное пособие.– Ростов на Дону. : Феникс, 2010. – 324 с.
3. Громов Ю. Ю. Информационная безопасность и защита информации: Учебное пособие. – Ст. Оскол : ТНТ, 2010. – 384 с.
4. Охрана труда и промышленная охрана. [Электронный ресурс]. URL: <http://prom-nadzor.ru> (дата обращения 25.05.2019).
5. ГОСТ Р 54831-2011 Системы контроля и управления доступом. Устройства преграждающие управляемые. Общие технические требования. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2012. – 16 с.
6. Бадиков А. В., Бондарев П. В. Системы контроля и управления доступом. Лабораторный практикум. – М. : НИЯУ МИФИ, 2010. – 128 с.

7. Волхонский В. В. Некоторые вопросы разработки методологии построения систем контроля доступа и выбора технологии идентификации // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 4. – с. 78–83.
8. Волхонский В. В. Системы контроля и управления доступом. – СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 200 с.
9. Ворона В. А., Тихонов В. А. Системы контроля и управления доступом. – М. : Горячая линия-Телеком, 2010. – 272 с.
10. Считыватель бесконтактный PERCo-IR03. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo\\_IR03D\\_Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatatsii.pdf](http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo_IR03D_Rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf) (дата обращения 25.05.2019).
11. Каюмова А. В. Визуальное моделирование систем в StarUML: учебное пособие. – Казань. Казанский федеральный университет, 2013. – 104 с.
12. Daoust N. UML Requirements Modeling For Business Analysts: Steps to Modeling Success. Technics Publications, 2012. – 268 p.
13. Интернет-сайт Arduino.ru. [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.ru> (дата обращения 25.05.2019).
14. Arduino. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения 25.01.2019).
15. Margolis M. Arduino Cookbook. O'Reilly Media, Inc., 2011. – 662 p.
16. Сомер Ул. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino. – СПб. : БХВ-Петербург, 2017. – 240 с.
17. ГОСТ 2.701-2008. Единая система конструкторской документации. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М. : Стандартинформ, 2009. – 16 с.
18. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб. : БХВ-Петербург, 2019. – 496 с.
19. Бирман И. Пользовательский интерфейс. – М. : Дизайн-бюро Артёма Горбунова, 2017. – 363 с.
20. Кузнецов С. Д. Основы баз данных. – М. : Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 484 с.
21. Куликов С. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс. – Минск : Четыре четверти, 2017. – 312 с.
22. Бейзер Б. Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем. – СПб. : Издательский Дом Питер, 2004. – 321 с.
23. Beizner V. Software Testing Techniques. – Itp – Media, 1990. – 580 p.
24. CopelandLee. A Practitioner's Guide to Software Test Design. – Artech House, 2004. – 300 p.
25. Desai S., Srivastava A. Software testing: a practical approach. – PHI Learning Pvt. Ltd., 2012. – 192 p.

#### References:

1. Barsukov V. S. Bezopasnost': tekhnologii, sredstva, uslugi. – М. : KUDITS – OBRAZ, 2001. – 496 s. [Barsukov V. S. Security: technology, tools, services. – М. : KUDITS – IMAGE, 2001. – 496 p. (In Russ.).]
2. Gafner V. V. Informatsionnaya bezopasnost': Uchebnoye posobiye.– Rostov na Donu. : Feniks, 2010. – 324 s. [Gafner V. Information Security: Study Guide. – Rostov on Don. : Phoenix, 2010. – 324 p. (In Russ.).]
3. Gromov YU. YU. Informatsionnaya bezopasnost' i zashchita informatsii: Uchebnoye posobiye.– St. Oskol : TNT, 2010. – 384 s. [Gromov Yu. Yu. Information Security and Information Security: tutorial. – Art. Oskol: TNT, 2010. – 384 p. (In Russ.).]
4. Okhrana truda i promyshlennaya okhrana. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://prom-nadzor.ru> (data obrashcheniya 25.05.2019) [Labor and industrial safety. [Electronic resource]. URL: <http://prom-nadzor.ru> (access date 25.05.2019) (In Russ.).]
5. GOST R 54831-2011 Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Ustroystva pregrazhdayushchiye upravlyayemye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. Metody ispytaniy. – М. : Standartinform, 2012. – 16 s. [GOST R 54831-2011 Access Control Systems. Devices blocking managed. General technical requirements. Test methods. - М. : Standardinform, 2012. – 16 p. (In Russ.).]
6. Badikov A. V., Bondarev P. V. Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Laboratornyy praktikum. – М. : NIYAU MIFI, 2010. – 128 s. [Badikov A. V., Bondarev P. V. Access control and management systems. Laboratory workshop. - М. : NRNU MEPhI, 2010. – 128 p. (In Russ.).]
7. Volkhonskiy V. V. Nekotoryye voprosy razrabotki metodologii postroyeniya sistem kontrolya dostupa i vybora tekhnologii identifikatsii // Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. – 2012. – № 4. – с. 78-83. [Volkhonsky V. V. Some issues of developing a methodology for building access control systems and the choice of identification technology // Information Management Systems. – 2012. – № 4. - p. 78–83. (In Russ.).]
8. Volkhonskiy V. V. Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom.– SPb. : Universitet ITMO, 2015. – 200 s. [Volkhonsky V. V. Access control and management systems. – SPb. : ITMO University, 2015. – 200 p. (In Russ.).]
9. Vorona V. A., Tikhonov V. A. Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. – М. : Goryachaya liniya-Telekom, 2010. – 272 s. [Vorona V. A., Tikhonov V. A. Access control systems. – М. : Hotline-Telecom, 2010. – 272 p. (In Russ.).]
10. Schityvatel' beskontaktnyy PERCo-IR03. Rukovodstvo po ekspluatatsii. [Elektronnyy resurs]. URL: [http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo\\_IR03D\\_Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatatsii.pdf](http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo_IR03D_Rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf) (data obrashcheniya 25.05.2019). [Reader non-contact PERCo-IR03. Manual. [Electronic resource]. URL: [http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo\\_IR03D\\_Rukovodstvo\\_po\\_ekspluatatsii.pdf](http://www.etk-elcom.ru/docs/PERCo_IR03D_Rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf) (access date 25.05.2019) (In Russ.).]

11. Kayumova A. V. Vizual'noye modelirovaniye sistem v StarUML: uchebnoye posobiye.– Kazan' : Kazanskiy federal'nyy universitet, 2013. – 104 s. [Kayumova A. V. Visual systems modeling in StarUML: study guide. – Kazan : Kazan Federal University, 2013. – 104 p. (In Russ.)].
12. Daoust N. UML Requirements Modeling For Business Analysts: Steps to Modeling Success. Technics Publications, 2012. – 268 p.
13. Internet-sayt Arduino.ru. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://arduino.ru> (data obrashcheniya 25.05.2019). [Internet site Arduino.ru. [Electronic resource]. URL: <http://arduino.ru> (access date 25.05.2019) (In Russ.)].
14. Arduino. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/> (access date 25.05.2019).
15. Margolis M. Arduino Cookbook. O'Reilly Media, Inc., 2011. – 662 p.
16. Sommer Ul. Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino. SPb. : BKHV-Peterburg, 2017. 240 s. [Sommer Str. Arduino / Freeduino microcontroller programming. SPb. : BHV-Petersburg, 2017. 240 p. (In Russ.)].
17. GOST 2.701-2008. Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Skhemy. Vidy i tipy. Obshchiye trebovaniya k vypolneniyu. M. : Standartinform. 2009. – 16 s. [GOST 2.701-2008. Unified system for design documentation. Scheme. Types and types. General requirements for implementation. M. : Standardinform. 2009. – 16 p. (In Russ.)].
18. Petin V. A. Projekty s ispol'zovaniyem kontrollera Arduino. – SPb. : BKHV-Peterburg, 2019. – 496 s. [Petin V. A. Projects using the Arduino controller. – SPb. : BHV-Petersburg, 2019. 496 p. (In Russ.)].
19. Birman I. Pol'zovatel'skiy interfeys. – M. : Dizayn-byuro Artoma Gorbunova, 2017. 363 s. [Birman I. User interface. M. : Artyom Gorbunov design bureau, 2017. 363 p. (In Russ.)].
20. Kuznetsov S. D. Osnovy baz dannykh. – M. : Internet-universitet informatsionnykh tekhnologiy; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007. 484 s. [Kuznetsov S. D., Basics of Databases. M. : Internet University of Information Technology; BINOMIAL. Laboratory of Knowledge, 2007. 484 p. (In Russ.)].
21. Kulikov S. Testirovaniye programmnoy obespecheniya. Bazovyy kurs.– Minsk : Chetyre chetverti, 2017. – 312 s. [Kulikov S. Software testing, Basic course – Minsk : Four quarters, 2017. – 312 p. (In Russ.)].
22. Beyzer B. Testirovaniye chernogo yashchika. Tekhnologii funktsional'nogo testirovaniya programmnoy obespecheniya i sistem. – SPb. : Izdatel'skiy Dom Piter, 2004. 321 s. [Beizer B. Testing of the black box. Technology functional testing software and systems. – SPb. : Publishing House Peter, 2004. – 321 p. (In Russ.)].
23. Beizner B. Software Testing Techniques. Itp – Media, 1990. 580 p.
24. CopelandLee. A Practitioner's Guide to Software Test Design. Artech House, 2004. 300 p.
25. Desai S., Srivastava A. Software testing: a practical approach. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012. 192 p.

**Сведения об авторах:**

**Бужинская Надежда Владимировна** - кандидат педагогических наук, доцент, кафедра информационных технологий.

**Васева Елена Сергеевна** - кандидат педагогических наук, доцент, кафедра информационных технологий.

**Искандаров Рустам Наильевич** - ведущий специалист.

**Шубина Наталья Валерьевна** - кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий.

**Information about the authors:**

**Nadezhda V. Buzhinskaya** - Cand. Sc. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Information Technology.

**Elena S. Vaseva** - Cand. Sc. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Information Technology.

**Rustam N. Iskandarov** - Leading Specialist.

**Natalya V. Shubina** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department of Information Technology.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 14.02.2019.

**Принята в печать** 22.03.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 14.02.2019.

**Accepted for publication** 22.03.2019.

**Для цитирования:** Гришин В.М., Ву Чонг Туан. Учет существенных факторов и ограничений при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1): 113-122. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

**For citation:** Grishin V.M., Wu Chong Tuan. Consideration of significant factors and limitations in the study and development of passively reserved aircraft subsystems, taking into account tolerances. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 113-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.09

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

### УЧЕТ СУЩЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ И ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ

Гришин В.М.<sup>1</sup>, Ву Чонг Туан<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет),

<sup>1-2</sup>125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: grishin.vyacheslav677@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: vuchongtuan@rambler.ru

**Резюме. Цель.** Актуальность данной статьи заключается в том, что проблема повышения безотказности подсистем авиационной и ракетно-космической техники при внезапных независимых отказах определяет одно из важных направлений научных исследований. Работа направлена на выявление и анализ специфических особенностей, которые необходимо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем с учетом допусков при внезапных независимых отказах. **Метод.** В ходе исследования расчеты проводились при использовании методов вероятности, перебора. Показана необходимость учета назначаемых и реализуемых допусков, кратного и не кратного резервирования, дискретных шкал реализуемых допусков с различными уровнями значимости, критических вероятностей, определяющих диапазоны вероятностей элементов, где выгодно и невыгодно резервирование. **Результат.** Выявлена возможность реализации любого допуска при различных значениях ряда возрастающих индивидуальных кратностей, что позволяет для заданного допуска ставить задачу поиска оптимальной кратности и соответствующей ей оптимальной структуры резервирования в интересах обеспечения максимальной безотказности резервированных подсистем. Анализ представленных зависимостей для реализуемых допусков первого и второго уровней показывает, что для каждого уровня допусков существуют равновесные значения  $dW_p$ , при которых критические значения  $p_{кр}$  практически не меняются в зависимости от кратностей  $K_i$ . **Вывод.** Выявлен разный характер изменения критических вероятностей  $p_{кр}$  в зависимости от кратностей для различных значений реализуемых допусков. Так, при допусках первого уровня, больших 25% с ростом кратности величины  $p_{кр}$  возрастают и меньших 25% с ростом кратности убывают. Аналогичный характер изменения величин  $p_{кр}$  имеет местотносительно допуска 28.6% для реализуемых допусков второго уровня.

**Ключевые слова:** внезапные отказы, допуски на выходные (входные) параметры связанных подсистем, кратность резервирования, критические вероятности, безотказность подсистем

## CONSIDERATION OF SIGNIFICANT FACTORS AND LIMITATIONS IN THE STUDY AND DEVELOPMENT OF PASSIVELY RESERVED AIRCRAFT SUBSYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT TOLERANCES

Vyacheslav M. Grishin<sup>1</sup>, Wu Chong Tuan<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),

<sup>1-2,4</sup>Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: grishin.vyacheslav677@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: vuchongtuan@rambler.ru

**Abstract. Objectives** The relevance of this article lies in the fact that the problem of increasing the reliability of subsystems of aviation and rocket and space technology in case of sudden independent refusals determines one of the important areas of scientific research. The work is aimed at identifying and analyzing specific features that must be considered when researching and developing passively redundant subsystems, taking into account tolerances in case of sudden independent failures. **Method** During the study, calculations were carried out using the methods of probability, search. The necessity of taking into account assigned and implemented tolerances, multiple and non-multiple reservation, discrete scales of realizable tolerances with different levels of significance, critical probabilities, determining the probability ranges of elements, where redundancy is profitable and unprofitable, is shown. **Result** The possibility of implementing any tolerance for different values of a number of increasing individual multiplicities is revealed, which allows for a given tolerance to pose the task of finding the optimal multiplicity and its corresponding optimal backup structure in the interests of ensuring maximum reliability of the redundant subsystems. Analysis of the presented dependencies for the implemented tolerances of the first and second levels shows that for each tolerance level there are equilibrium values  $dW_p$  at which the critical values of  $p_{kr}$  practically do not change depending on the multiplicities  $K_i$ . **Conclusion** A different nature of the change in the critical probabilities  $p_{kr}$  was found depending on the multiplicities for different values of the tolerances to be realized. So, with tolerances of the first level, larger than 25%, with increasing multiplicity,  $p_{kr}$  increases and smaller than 25% decreases with increasing multiplicity. The similar nature of the change in the  $p_{kr}$  values has a 28.6% tolerance for the implemented second-level tolerances.

**Keywords:** sudden failures, tolerances for output (input) parameters of related subsystems, redundancy ratio, critical probabilities, reliability of subsystems

**Введение.** Вопросы повышения безотказности подсистем авиационной и ракетно-космической техники при внезапных независимых отказах определяют одно из важных направлений научных исследований. Одним из способов повышения безотказности подсистем является пассивное или, как говорят, постоянное резервирование. Он связан с введением в систему избыточности и применяется для подсистем, не допускающих даже кратковременных перерывов в работе. При этом степень избыточности оценивается кратностью резервирования  $K$ , под которой в работе понимается отношение общего числа элементов резервированной подсистемы  $n$  к числу основных элементов  $m$ :

$$K = \frac{n}{m} \quad (1)$$

Важной особенностью структур пассивного резервирования является невозможность определения того, какие элементы являются основными, а какие – резервными, так как все элементы являются одинаковыми и работают в одинаковых условиях. Можно указать только их численности. При пассивном резервировании подсистем без учета допусков резервированная подсистема считается исправной, если в ней имеется хотя бы один исправный элемент[1], т.е.

$m=1$ . Однако указанное утверждение справедливо при отсутствии влияния выходных характеристик резервированных подсистем на работоспособность связанных с ними подсистем.

При наличии указанного влияния необходимо учитывать допуск на отклонение выходных параметров пассивно резервированных подсистем при отказах их элементов для обеспечения работоспособности связанных с ними подсистем. Учет допусков на изменение выходных параметров пассивно резервированной подсистемы может существенно повлиять на структуру ее резервирования и, в частности, на количество ее основных элементов, которое может быть существенно больше единицы.

Под количеством основных элементов пассивно резервированной подсистемы будем понимать то минимальное количество исправных элементов  $m$ , из общего числа  $n$ , при котором обеспечивается предельно допустимое отклонение ее выходного параметра при отказах всех резервных элементов ( $r=n-m$ ) и при этом сохраняется работоспособность смежной подсистемы.

Например, в системах питания топливом двигателей летательных аппаратов (ЛА) назначается допустимое предельное уменьшение от номинала суммарной производительности топливных насосов исходя из особенностей конструкции и требования обеспечения всех режимов работы двигателя, включая форсированные, в течение необходимого времени [2]. Аналогичная ситуация имеет место в системах питания борта ЛА постоянным и переменным током [3], рулевых приводах, усилителях мощности контуров управления ЛА [4] и т.д., когда уменьшение выходной мощности, крутящего момента (либо усилия) сверх допустимых пределов может привести к отказу техники.

**Постановка задачи.** Целью работы является выявление и анализ особенностей, которые надо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков на отклонение их выходных параметров.

Существуют различные виды допусков. В первую очередь следует различать допуски, назначаемые и допуски реализуемые. Назначаемый допуск задается на смежную подсистему, связанную конструктивно с пассивно резервированной подсистемой. Он определяет предельно допустимое отклонение от номинального значения (номинала) входного параметра смежной подсистемы (как правило, в меньшую сторону), обеспечивающее ее нормальное функционирование. Назначаемый допуск определяется нормативно-технической документацией на рассматриваемый объект. Он задается на непрерывной шкале возможных допусков для данного вида подсистем. Например, в системах питания топливом двигателей ЛА он определяет минимальную суммарную производительность исправных топливных насосов, обеспечивающих работоспособность двигателя ЛА на всех режимах в течение необходимого времени.

Реализуемый допуск обеспечивается пассивно резервированной подсистемой. Он носит дискретный характер, определяемый дискретной структурой пассивного резервирования, т.е. определяется дискретными величинами  $m$ ,  $r$  и  $n$ . Реализуемый допуск характеризуется величиной отклонения выходного параметра от номинала при отказе (выходе из строя) всех ее  $r=n-m$  резервных элементов. Назначаемый и реализуемый допуски могут не совпадать по своим значениям. В этом случае реализуемый при пассивном резервировании допуск должен быть "уже" назначенного.

Реализуемый и назначаемый допуски могут задаваться в абсолютных и относительных величинах. Более употребительными являются назначаемые и реализуемые допуски в относительном представлении.

Назначаемый допуск в относительных величинах определяется выражением:

$$dW_n = \frac{W_{nom} - W_m}{W_{nom}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $W_{nom}$  - номинальное значение входного параметра смежной подсистемы;

$W_m$  - минимальное значение входного параметра смежной подсистемы, обеспечивающее ее работоспособность на всех режимах.

Реализуемый допуск в относительном представлении определяется выражением:

$$dW_p = \frac{r \cdot W}{n \cdot W} \cdot 100\% = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \frac{n-m}{n} \cdot 100\% \quad (3)$$

где, W-значение выходного параметра одного из n параллельно работающих элементов пассивно резервированной подсистемы.

Для реализуемых и назначаемых допусков должно выполняться условие:

$$dW_n \geq dW_p \quad (4)$$

Для практического использования интерес представляет дискретная сетка реализуемых допусков в относительном представлении. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только эти допуски.

**Методы исследования.** Составим таблицу реализуемых значений относительных допусков для различных структур пассивного резервирования зависимости от параметров m и r. Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей резервирования. Представленные в табл. 1 допуски соответствуют минимальным значениям кратностей резервирования.

Например, допуск 50% при r=1 и m=1 соответствует кратности  $K = \frac{2}{1} = 2$ , допуск 33.3% при r=1 и m=2 соответствует кратности  $K = \frac{3}{2}$  и т. д. Меньших значений кратностей при указанных допусках не существует.

**Таблица 1. Значения реализуемых относительных допусков в процентах в зависимости от количества основных m и резервных r элементов**  
**Table 1. Values of realized relative tolerances in percent depending on the number of basic m and reserve r elements**

r	m								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	11.1	10.0
2	66.7	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0	22.2	20.0	18.2
3	75.0	60.0	50.0	42.8	37.5	33.3	30.0	27.3	25.0
4	80.0	66.7	57.1	50.0	44.4	40.0	36.4	33.3	30.8
5	83.3	71.4	62.5	55.5	50.0	45.4	41.7	38.5	35.7
6	85.7	75.0	66.7	60.0	54.5	50.0	46.1	42.8	40.0
7	87.5	77.8	70.0	63.6	58.3	53.8	50.0	46.7	43.7
8	88.0	80.0	72.7	66.7	61.5	57.1	53.5	50.0	47.1
9	90.0	81.8	75.0	69.2	64.3	60.0	56.2	52.9	50.0
10	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7	62.5	58.8	55.5	52.6
11	91.7	84.6	78.6	73.3	68.7	64.7	61.1	57.9	55.0

Наиболее важной является шкала убывающих, то есть более жестких допусков. Поэтому будем рассматривать изменение допусков по строкам. Допуски первой строки табл.1 (при r=1), образуют следующий ряд значений: 50%; 33.3%; 25%; 20%; 16.7%; 14.3%; 12.5%; 11.1%; 10%. Назовем их допусками первого уровня.

Соответственно допуски, задаваемые второй, третьей и последующими строками будем называть допусками второго, третьего и последующих уровней. Как видно из табл.1 с изменением r и m допуски повторяются с определенной периодичностью. Так допуск 50% реализуется при r=1 и m=1, r=2 и m=2 и т.д., допуск 33.3% реализуется при r=1 и m=2, r=2 и m=4 и т.д.

С ростом уровня допуска резко усложняется структура резервирования, определяемая количеством основных m и резервных r элементов. Поэтому наиболее значимыми являются допуски первого и второго уровней, имеющие более простые структуры резервирования.

Совместное использование допусков первого и второго уровней обеспечивает более частую сетку реализуемых допусков. Образующая ими сетка неповторяющихся относительных реализуемых допусков имеет вид: 66.7%; 50%; 40%; 33.3%; 28.6%; 25%; 22.2%; 20%; 18.2%;

16.7%; 14.3%; 12.5%; 11.1%; 10%. Такая сетка обеспечивает хорошее приближение к назначенным допускам. Однако надо иметь в виду, что допуски различных уровней плохо совмещаются друг с другом по показателям безотказности.

Это обусловлено тем, что показатели безотказности наиболее сильно зависят от количества резервных элементов  $r$  в структуре резервирования, а это количество, как видно из табл. 1, меняется при увеличении уровня допуска.

**Взаимосвязь кратности резервирования с допуском.** Первый столбец таблицы 1 соответствует подсистемам с кратным резервированием. При  $r=1$  кратность равна 2, при  $r=2$  кратность равна 3, а при  $r=11$  кратность равна 12. Таким образом, первый столбец таблицы 1 реализует изменение кратности от дублирования до двенадцатикратного резервирования. Допуски правее первого столбца соответствуют структурам с некрatным резервированием [5]. Они определяют основной объем реализуемых допусков и представляют наибольший интерес для исследования.

Следует отметить, что кратность подсистем с некрatным резервированием всегда записывается в виде дроби даже, если кратность представляет собой целочисленное отношение. Кроме того, подсистемы с некрatным резервированием обладают важным свойством – показатели безотказности (надежности) подсистем с некрatным резервированием всегда выше подсистем с кратным резервированием при одних и тех же численностях  $m$  и  $n$ . Однако, платой за это полезное свойство, как будет показано в дальнейшем, является наличие у подсистем с некрatным резервированием критических значений вероятностей элементов резервированных подсистем, аналогичных подсистемам с активным резервированием [6], в которых причиной наличия критических вероятностей является ненадежность переключателей.

Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей, как кратного, так и некрatного резервирования. Причем для каждого допуска существует своя шкала (линейка) различных кратностей, начинающаяся с минимального значения. Как минимальные, так и другие кратности различных допусков существенно отличаются друг от друга. Таким образом, существует большое многообразие различных кратностей для различных значений допусков, влияющих на безотказность.

Для сопоставления показателей безотказности и других характеристик при разных допусках в зависимости от рядов возрастающих кратностей целесообразно эти различные возрастающие индивидуальные кратности унифицировать.

В качестве унифицирующего параметра выберем величину обобщенной кратности  $K_i$ , где  $i$  – порядковый номер кратности в последовательности их возрастающих отношений при любых значениях реализуемых допусков.

Например, при допуске 50% возрастающий ряд обобщенных и индивидуальных кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{2}{1} = 2, K_2 = \frac{4}{2}, K_3 = \frac{6}{3} \dots$

При допуске 33.3% возрастающий ряд кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{3}{2}, K_2 = \frac{6}{4}, K_3 = \frac{9}{6} \dots$  При допуске 25% возрастающий ряд кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{4}{3}, K_2 = \frac{8}{6}, K_3 = \frac{12}{9} \dots$

В дальнейшем наряду с индивидуальными значениями кратностей будем использовать обобщенные значения  $K_i$ .

В табл. 2 в качестве примера представлены значения одиннадцати возрастающих кратностей, в индивидуальном и обобщенном представлении, составленных для четырех допусков первого уровня табл.1, а в табл.3 аналогичный ряд кратностей для трех допусков второго уровня, неповторяющихся с допусками первого уровня.

**Таблица 2. Величины кратностей, соответствующие значениям четырех реализуемых относительных допусков первого уровня**

**Table 2. The magnitudes of multiplicities corresponding to the values of the four implemented first-level relative tolerances**

dW %	Кратности резервирования $K_i$ Redundancy ratio										
	$K_1$ r=1	$K_2$ r=2	$K_3$ r=3	$K_4$ r=4	$K_5$ r=5	$K_6$ r=6	$K_7$ r=7	$K_8$ r=8	$K_9$ r=9	$K_{10}$ r=10	$K_{11}$ r=11
50.0	2	$\frac{4}{2}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{14}{7}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{18}{9}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{22}{11}$
33.3	$\frac{3}{2}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{18}{12}$	$\frac{21}{14}$	$\frac{24}{16}$	$\frac{27}{18}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{33}{22}$
25.0	$\frac{4}{3}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{24}{18}$	$\frac{28}{21}$	$\frac{32}{24}$	$\frac{36}{27}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{44}{33}$
20.0	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{8}$	$\frac{15}{12}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{25}{20}$	$\frac{30}{24}$	$\frac{35}{28}$	$\frac{40}{32}$	$\frac{45}{36}$	$\frac{50}{40}$	$\frac{55}{44}$

Следует отметить, что у всех допусков первого уровня индекс  $i$  обобщенной кратности  $K_i$  совпадает с количеством резервных элементов в структуре пассивного резервирования. Для допусков других уровней такого совпадения нет, что видно из табл.3.

Первая клетка табл.2 при допуске 50% и табл. при допуске 66.7% соответствуют кратному резервированию, а остальные клетки двух указанных таблиц – некратному резервированию.

**Таблица 3. Величины кратностей, соответствующие значениям реализуемых относительных допусков второго уровня**

**Table 3. The magnitudes of multiplicities corresponding to the values of the implemented relative tolerances of the second level**

dW %	Кратности резервирования $K_i$ Redundancy ratio									
	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$
66.7	3	$\frac{6}{2}$	$\frac{9}{3}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{15}{5}$	$\frac{18}{6}$	$\frac{21}{7}$	$\frac{24}{8}$	$\frac{27}{9}$	$\frac{30}{10}$
40	$\frac{5}{3}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{9}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{25}{15}$	$\frac{30}{18}$	$\frac{35}{21}$	$\frac{40}{24}$	$\frac{45}{27}$	$\frac{50}{30}$
28.6	$\frac{7}{5}$	$\frac{14}{10}$	$\frac{21}{15}$	$\frac{28}{20}$	$\frac{35}{25}$	$\frac{42}{30}$	$\frac{49}{35}$	$\frac{56}{40}$	$\frac{63}{45}$	$\frac{70}{50}$

Одной из важнейших особенностей структур пассивного резервирования подсистемы ЛА с учетом допусков является уменьшение масс-габаритных (и стоимостных) характеристик их элементов с ужесточением допусков и возрастанием кратностей по сравнению с аналогичными характеристиками нерезервированной подсистемы.

Действительно, замена нерезервированной подсистемы из одного элемента с номинальным значением выходного параметра  $W_{nom}$  на пассивно резервированную подсистему из  $n$  параллельно работающих одинаковых элементов приводит к уменьшению в  $n$  раз их выходных параметров  $W$ :

$$W = \frac{W_{nom}}{n} \quad (5)$$

В связи со сказанным можно предположить, что замена нерезервированной подсистемы на резервированную из  $n$  элементов в интересах повышения ее безотказности не приведет к существенному увеличению стоимости и масс-габаритных характеристик резервированной подсистемы в целом.

**Обсуждение результатов.** Анализ зависимости критических вероятностей от величин допусков и кратностей резервирования. Критические значения вероятностей элементов связаны с показателями безотказности нерезервированной и пассивно резервированной подсистем ЛА.

В качестве показателей безотказности подсистем будем использовать вероятности их безотказной работы.

Пусть  $P_c(t_3) = P_c$  – вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы за время выполнения задания, а  $p(t_3) = p$  вероятность безотказной работы нерезервированной подсистемы (элемента пассивно резервированной подсистемы) за время выполнения задания. Очевидно, функция безотказности пассивно резервированной подсистемы  $P_c$  зависит от структуры резервирования (параметров  $m$  и  $n$ ) и от безотказности ее элементов  $p$ :

$$P_c = P_c(p, n, m) \quad (6)$$

Среди множества вероятностных, логико-вероятностных и логических методов расчета функции (6) выберем вероятностный метод, основанный на биномиальном законе распределения [7, 8]. Согласно этому закону функция (6) определяется как вероятность безотказной работы не менее  $m$  элементов из общего числа  $n$ :

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1 - p)^{n-i} \quad (7)$$

Для подсистем со структурами кратного резервирования любой кратности (первый столбец табл.1. функция безотказности  $P_c$  всегда больше функции безотказности нерезервированной подсистемы на открытом интервале:  $0 < p < 1$ .

Для любых структур некратного резервирования (второй и последующие столбцы допусков табл.1. выполняется соотношение [5, 9, 10]:  $P_c(p, n, m) < p$ , при  $p$ , близких к нулю и  $P_c(p, n, m) > p$ , при  $p$ , близких к единице. Причем, на открытом интервале (0 – 1) зависимости  $P_c(p, n, m)$  и  $p(p)$  имеют одну точку пересечения, а уравнение имеет один вещественный корень. Значение вероятности, соответствующее этому корню, называют критическим значением и обозначают  $p_{kr}$ :

$$P_c(p, n, m) = p \quad (8)$$

Таким образом, при некратном пассивном резервировании существуют критические значения вероятностей элементов резервированных подсистем, которые разбивают интервал (0 – 1) на два подинтервала: докритический (0- $p_{kr}$ ), где пассивное резервирование не выгодно и закритический ( $p_{kr}$ -1), где пассивное резервирование выгодно.

**Таблица 4. Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 11 возрастающих кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам первого уровня**  
**Table 4. Critical values of the probabilities  $p_{kr}$  for 11 ascending multiplicities corresponding to 9 realized first-level tolerances**

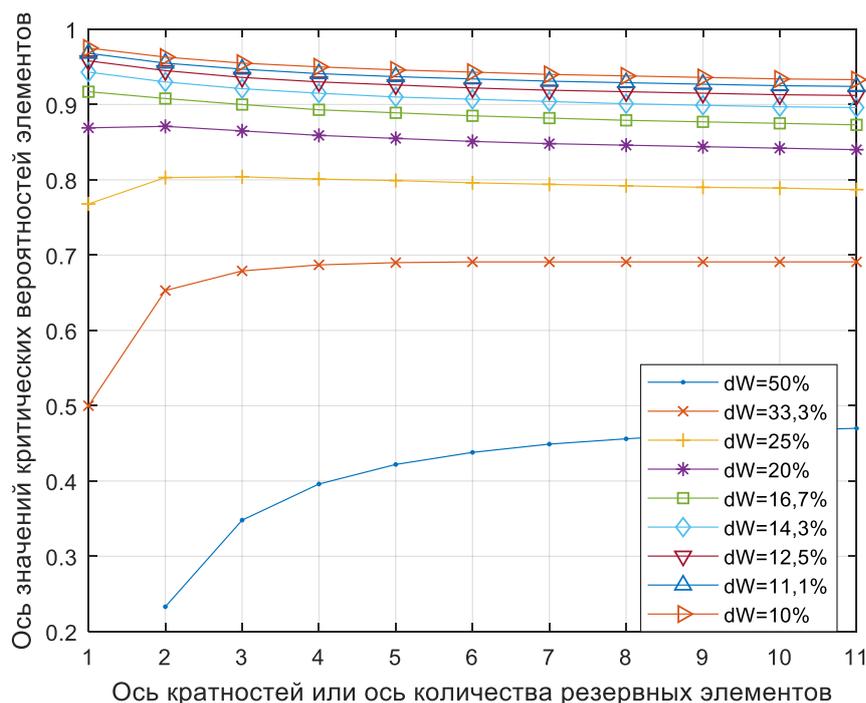
K <sub>i</sub>	dW%								
	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	11.1	10.0
K <sub>1</sub>	-	0.500	0.768	0.869	0.917	0.943	0.958	0.968	0.975
K <sub>2</sub>	0.233	0.653	0.803	0.871	0.908	0.930	0.945	0.955	0.963
K <sub>3</sub>	0.348	0.679	0.804	0.865	0.900	0.921	0.936	0.947	0.955
K <sub>4</sub>	0.396	0.687	0.801	0.859	0.893	0.915	0.930	0.941	0.950
K <sub>5</sub>	0.422	0.690	0.799	0.855	0.889	0.910	0.926	0.937	0.946
K <sub>6</sub>	0.438	0.691	0.796	0.851	0.885	0.907	0.922	0.934	0.943
K <sub>7</sub>	0.449	0.691	0.794	0.848	0.882	0.904	0.919	0.931	0.940
K <sub>8</sub>	0.456	0.691	0.792	0.846	0.879	0.901	0.917	0.929	0.938
K <sub>9</sub>	0.462	0.691	0.790	0.844	0.877	0.899	0.915	0.927	0.936
K <sub>10</sub>	0.467	0.691	0.789	0.842	0.875	0.897	0.913	0.925	0.934
K <sub>11</sub>	0.470	0.691	0.787	0.840	0.873	0.896	0.912	0.924	0.933

В табл. 4 представлены результаты расчетов методом перебора с шагом 0.001 критических значений вероятностей элементов  $p_{kr}$  для реализуемых допусков первого уровня и возрастающих кратностей в каждом из них, а в табл. 5 – аналогичные результаты для допусков второго уровня.

**Таблица 5. Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 9 возрастающих кратностей, соответствующих 5 реализуемым допускам второго уровня**  
**Table 5. Critical values of the probabilities  $p_{kr}$  for 9 increasing multiplicities corresponding to the 5 second-level tolerable tolerances**

$K_i$	dW%				
	66.7	40.0	28.6	22.2	18.2
$K_2$	-	0.500	0.745	0.843	0.892
$K_3$	0.084	0.579	0.755	0.835	0.878
$K_4$	0.158	0.596	0.753	0.828	0.870
$K_5$	0.197	0.602	0.750	0.823	0.864
$K_6$	0.221	0.605	0.748	0.819	0.860
$K_7$	0.237	0.607	0.746	0.816	0.857
$K_8$	0.248	0.608	0.745	0.814	0.855
$K_9$	0.257	0.608	0.743	0.812	0.853
$K_{10}$	0.263	0.609	0.742	0.810	0.851

Для иллюстрации результатов, представленных в табл. 4 и 5, на рис. 1 показаны зависимости критических вероятностей  $p_{kr}$  от кратностей  $K_i$  для допусков первого уровня, а на рис.2 показаны зависимости  $p_{kr}$  от кратностей  $K_i$  для допусков второго уровня.



**Рис.1. Зависимости  $p_{kr}$  от  $K_i$  для допусков первого уровня**  
**Fig.1.  $P_{kr}$  versus  $K_i$  for first level tolerances**

Анализ представленных зависимостей для реализуемых допусков первого и второго уровней показывает, что для каждого уровня допусков существуют равновесные значения  $dW_p$ , при которых критические значения  $p_{kr}$  практически не меняются в зависимости от кратностей  $K_i$ .

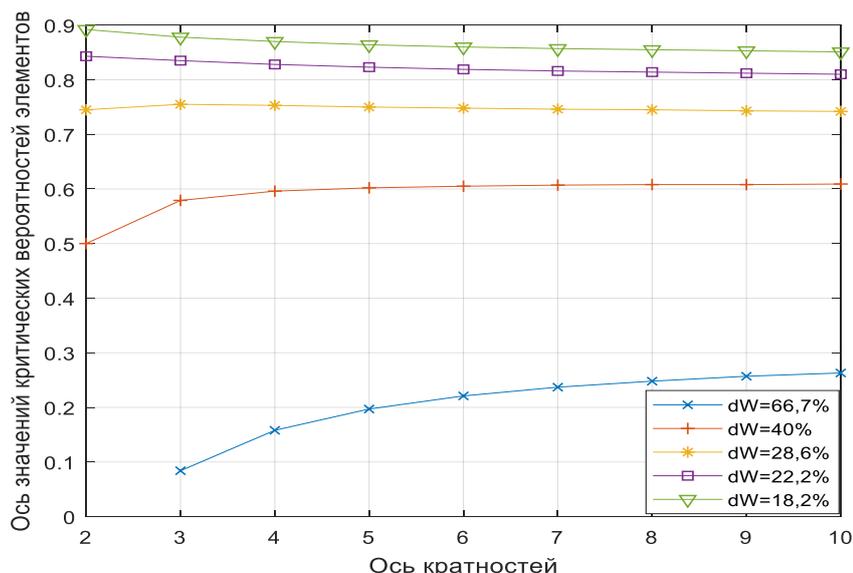


Рис. 2. Зависимость  $p_{kr}$  от  $K_i$  для допусков второго уровня  
 Fig.1.  $P_{kr}$  versus  $K_i$  for second level tolerances

**Вывод.** Данная работа представляет собой первую часть исследования, посвященного анализу и синтезу пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков.

В работе получены следующие результаты:

1) Показана необходимость учета двух видов допусков на уменьшение выходных (входных) параметров связанных подсистем – назначаемых, задаваемых на непрерывной шкале величин и реализуемых, определяемых дискретной структурой резервирования, причем реализуемый допуск всегда должен быть не больше назначенного;

2) Установлено, что пассивное резервирование с учетом реализуемых допусков обеспечивается двумя принципиально разными способами – кратным и некратным резервированием, причем, наиболее значимыми для практики по количеству, разнообразию величин и значениям показателей безотказности являются реализуемые допуски, обеспечиваемые методами некратного резервирования;

3) Выявлена возможность реализации любого допуска при различных значениях ряда возрастающих индивидуальных кратностей, что позволяет ставить задачу поиска оптимальной кратности и соответствующей ей оптимальной структуры резервирования в интересах обеспечения максимальной безотказности резервированных подсистем;

4) Показано, что подсистемы с некратным пассивным резервированием имеют значения вероятностей элементов, называемых критическими  $p_{kr}$ , которые определяют существование областей ( $0 < p_{kr}$ ), где данный вид резервирования не выгоден;

5) Показано, что при любом уровне допуска и любой кратности резервирования с уменьшением (ужесточением) величин допусков критические значения вероятностей  $p_{kr}$  монотонно возрастают;

6) Выявлен разный характер изменения критических вероятностей  $p_{kr}$  в зависимости от кратностей для различных значений реализуемых допусков. Так, при допусках первого уровня, больших 25% с ростом кратности величины  $p_{kr}$  возрастают и меньших 25% с ростом кратности убывают. Аналогичный характер изменения величин  $p_{kr}$  имеет место относительно допуска 28.6% для реализуемых допусков второго уровня.

#### Библиографический список:

1. Герасимова Д.С., Палухин А.А. Резервирование элементов как способ повышения надежности системы пожаротушения самолета ТУ-204. Решетневские чтения, 2017, 21(1), 431-433.
2. Анцелиович Л.Л. Надежность, безотказность и живучесть самолета. Москва: Машиностроение, 1985.
3. Дедков В.К., Татуев А.И. Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла. Москва: Машиностроение. Полет, 2010.

4. Редько П.Г. Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов. Москва: Издательский центр МГТУ “Станкин”, 2002.
5. Епифанов А.Д. Надежность систем управления. Москва: Машиностроение, 1975.
6. Гришин В.М., Пью Маунг Ко. Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании. Вестник МАИ, 2009, 16(5), 52-59.
7. Бессонов А.А., Мороз А.В. Надежность систем автоматического регулирования. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984.
8. Милёхин Ю.М., Берсон А.Ю., Кавицкая В.К., Еренбург Э.И. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе. Москва: ООО Эврика, 2005.
9. Половко А.М., Гуров С.И. Основы теории надежности. Санкт-Петербург: БХВ Петербург, 2006.
10. Черкасова Н.Г., Крылова О.К. Повышение эффективности очистки выбросов электролизного производства внедрением горелочного устройства при конструировании летательных аппаратов. Решетневские чтения, 2017, 21(2), 121-122.

#### References:

1. Gerasimova D.S., Palukhin A.A. Rezervirovaniye elementov kak sposob povysheniya nadezhnosti sistemy pozharotusheniya samoleta TU-204. Reshetnevskiy chteniya, 2017, 21(1), 431-433. [Gerasimova, D.S., Palukhin, A.A. Reservation of elements as a way to improve the reliability of the fire extinguishing system of the TU-204. Reshetnev Readings, 2017, 21(1), 431-433. (In Russ)]
2. Antseliovich L.L. Nadezhnost', bezotkaznost' i zhivuchest' samoleta. Moskva: Mashinostroyeniye, 1985 [Anceliovich, L.L. Reliability, reliability and survivability of the aircraft. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. (In Russ)]
3. Dedkov V.K., Tatuyev A.I. Obespecheniye nadezhnosti tekhnicheskikh ob"yektov po stadiyam ikh zhiznennogo tsikla. Moskva: Mashinostroyeniye Polet, 2010. [Dedkov V.K., Tatuyev, A.I. Ensuring the reliability of technical objects in stages of their life cycle. Moscow: MashinostroyeniyePolet, 2010. (In Russ)]
4. Red'ko P.G. Povysheniye bezotkaznosti i uluchsheniye kharakteristik elektrogidravlicheskikh sledya-shchikh privodov. Moskva: Izdatel'skiy tsentr MGTU “Stankin”, 2002 [Redko P.G. Improving reliability and improving the characteristics of electro-hydraulic servo drives. Moscow: Publishing Center MSTU “Stankin”, 2002. (In Russ)]
5. Yepifanov A.D. Nadezhnost' sistem upravleniya. Moskva: Mashinostroyeniye, 1975. [Epifanov A.D. Reliability of control systems. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. (In Russ)]
6. Grishin V.M., P'o Maung Ko. Optimizatsiya bezotkaznosti sistem upravleniya LA pri aktivnom nagruzhennom rezervirovanii. Vestnik MAI, 2009, 16(5), 52-59. [Grishin V.M., Pyo, Maung Ko. Optimization of the reliability of aircraft control systems with active load redundancy. Vestnik MAI, 2009, 16(5), 52-59. (In Russ)]
7. Bessonov A.A., Moroz A.V. Nadezhnost' sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. [Bessonov A.A., Moroz, A.V. Reliability of automatic control systems. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. (In Russ)]
8. Milokhin YU.M., Berson A.YU., Kavitskaya V.K., Yerenburg E.I. Nadezhnost' raketnykh dvigateley na tverdom toplive. Moskva: ООО Evrika, 2005. [Milekhi Yu.M., Berson, A.Yu., Kavitskaya, V.K., Erenburg, E.I. Reliability of solid-fuel rocket engines. Moscow: LLC Evrika, 2005. (In Russ)]
9. Polovko A.M., Gurov S.I. Osnovy teorii nadezhnosti. Sankt-Peterburg: BKHV Peterburg, 2006. [Polovko A.M., Gurov, S.I. Fundamentals of the theory of reliability. Saint Petersburg: BKHV Peterburg, 2006, p. 247. (In Russ)]
10. Cherkasova N.G., Krylova O.K. Povysheniye effektivnosti ochistki vybrosov elektroliznogo proiz-vodstva vnedreniyem gorelochnogo ustroystva pri konstruirovanii letatel'nykh apparatov. Reshetnev-skiye chteniya, 2017, 21(2), 121-122. [Cherkasova N.G., Krylova, O.K. Improving the efficiency of cleaning emissions of electrolysis production by the introduction of a burner device in the design of aircraft. Reshetnev Readings, 2017, 21(2), 121-122. (In Russ)]

#### Сведения об авторах:

**Гришин Вячеслав Михайлович** - кандидат технических наук, доцент, кафедра системного анализа и управления.

**Ву Чонг Туан** – аспирант, кафедра системного анализа и управления.

#### Information about the authors:

**Vyacheslav M. Grishin** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department of Systems Analysis and Management.

**Wu Chong Tuan** - Graduate student, Department of Systems Analysis and Management.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.02.2019.

Принята в печать 22.03.2019.

#### Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.02.2019.

Accepted for publication 22.03.2019.

**Для цитирования:** Емельянов М.В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(1): 123-131. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131

**For citation:** Emelianov M. V. The development of information technology of structural health monitoring systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 123-131. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК: 004.02

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-123-131

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Емельянов М.В.**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),

129337, Москва, Ярославское ш., 26, Москва, Россия,

e-mail:emelianov@mgsu.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка информационной технологии проектирования систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений повышенной категории ответственности на основании исходных данных об объекте строительства и результатов инженерных изысканий. **Метод.** В статье рассматривается подход к формализации описания процедуры разработки проектов систем мониторинга зданий и сооружений, основанный на особенностях разработки СММК строительных сооружений, инженерном опыте проектирования данных систем. **Результат.** В статье представлены концептуальные основы разработанной информационной технологии, алгоритм определения режима мониторинга на основании сведений об объекте строительства, алгоритм работы макроса определения наиболее нагруженных узлов и элементов в комплексе конечно-элементного моделирования. Даны рекомендации по определению параметров контроля, состава измерительного оборудования. **Вывод.** Разработанные в процессе исследования концептуальные основы информационной технологии позволяют провести дальнейшую разработку алгоритмов и программ для автоматизированного анализа сведений об объекте и участке строительства с целью получения автоматическом режиме результатов, необходимых для разработки систем мониторинга зданий и сооружений повышенной категории ответственности.

**Ключевые слова:** объекты повышенной категории ответственности, мониторинг технического состояния, система мониторинга, информационная технология разработки систем мониторинга, алгоритм определения режима мониторинга, макрос определения наиболее нагруженных узлов и элементов

## THE DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS

**Mikhail V. Emelianov**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU),  
26, Yaroslavskaya highway, Moscow 129337, Russia,  
e-mail:emelianov@mgsu.ru

**Abstract Objectives.** The aim of the study is to develop information technology design systems for monitoring load-bearing structures of buildings and structures of a higher category of responsibility based on the initial data on the construction object and the results of engineering surveys. **Method.** The article discusses the approach to the formalization of the description of the procedure for developing projects for monitoring buildings and structures, based on the design features of the SMC building structures, the engineering experience of designing these systems. **Result.** The article presents the conceptual foundations of the developed information technology, the algorithm for determining the monitoring mode based on information about the construction object, the algorithm for the macro to determine the most loaded nodes and elements in the complex finite element modeling. Recommendations are given for determining the control parameters, the composition of the measuring equipment. **Conclusion.** The conceptual foundations of information technology developed in the course of the research allow for the further development of algorithms and programs for the automated analysis of information about the object and the construction site in order to obtain the automatic mode of the results necessary for developing monitoring systems for buildings and structures of a higher category of responsibility.

**Keywords:** objects of increased category of responsibility, technical condition monitoring, monitoring system, information technology of development of monitoring systems, algorithm for determining the monitoring mode, macro for determining the most loaded nodes and elements

**Введение.** Характерной чертой современного уровня строительного производства в России является увеличение количества и сложности возводимых уникальных, высотных, и большепролетных объектов.

Имевший место в последние годы в РФ и за рубежом ряд аварий объектов повышенного уровня ответственности предопределяет важность уделения вопросу предотвращения аварий на объектах строительства значительного внимания на государственном уровне в связи с возможными негативными последствиями: людскими, материальными и моральными потерями.

Накопленный опыт и научные исследования отечественных и зарубежных специалистов свидетельствуют о том, что на современном этапе наиболее эффективной системой контроля состояния несущих конструкций является организация системы мониторинга технического состояния объектов, в том числе автоматических систем мониторинга, функционирующих в непрерывном режиме.

В соответствии с ГОСТ Р 22.1.12-2005 [1], система мониторинга состояния несущих конструкций (СМИК) подлежит обязательной установке на потенциально опасных, особо опасных, технически сложных и уникальных объектах, количество которых ежегодно увеличивается.

Вопросам разработки СМИК посвящены многочисленные работы российских и зарубежных исследователей. Значительный вклад в разработку систем автоматического мониторинга зданий и сооружений внесли специалисты НИУ МГСУ [2-8], ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» [9], НПО «СОДИС» [10-12], ГУП МНИИТЭП [13-16], ИЦ «БАЗИС» [17, 18], ОАО «ЦНИИЭП жилища» [19], ООО НПП «Геотек» [20], ЗАО «Мониторинг Центр» [26-

27], а также Горпинченко В.М.[21], Charles R Farrar [22], Joel van Cranenbroeck [23] и ряд других.

Анализ инженерной практики показывает, что в настоящее время систем автоматизации разработки проектов СМИК в РФ в настоящее время не существует.

Автоматизация проектирования СМИК зданий и сооружений повышенной категории ответственности на основании исходных данных об объекте строительства и результатов целенаправленных инженерных изысканий позволит сократить сроки разработки системы за счет оптимизации процесса проектирования.

**Постановка задачи.** Для автоматизации разработки проектов СМИК необходимо разработать информационную технологию сбора анализа данных об объекте и результатах инженерных изысканий, позволяющую пользователю получить рекомендации по режиму мониторинга, составу измерительного оборудования и местам его установки.

**Методы исследования.** На основании изученных опыта разработки СМИК и методов автоматизации [24] установлено, что наиболее эффективным способом автоматизации разработки СМИК является разработка программных блоков сбора и анализа данных, функционирующих на следующих основных этапах производства работ по созданию СМИК:

- сбор данных об объекте и участке строительства;
- определение режима мониторинга;
- определение моделей опасности - моделей перехода строительных объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние вследствие развития природных и техногенных процессов, приводящих к опасному ненормативному изменению напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований;
- формирование перечня особо ответственных узлов и конструкций, подлежащих контролю с применением процедуры мониторинга;
- определение перечня контролируемых при мониторинге параметров, диапазонов значений, соответствующих различным режимам эксплуатации;
- определение оптимального состава измерительного оборудования и мест его установки,
- и позволяющих пользователю на основании сведений об объекте и результатов инженерных изысканий получить рекомендации по режиму мониторинга, основным моделям опасности, составу и расположению измерительного оборудования.

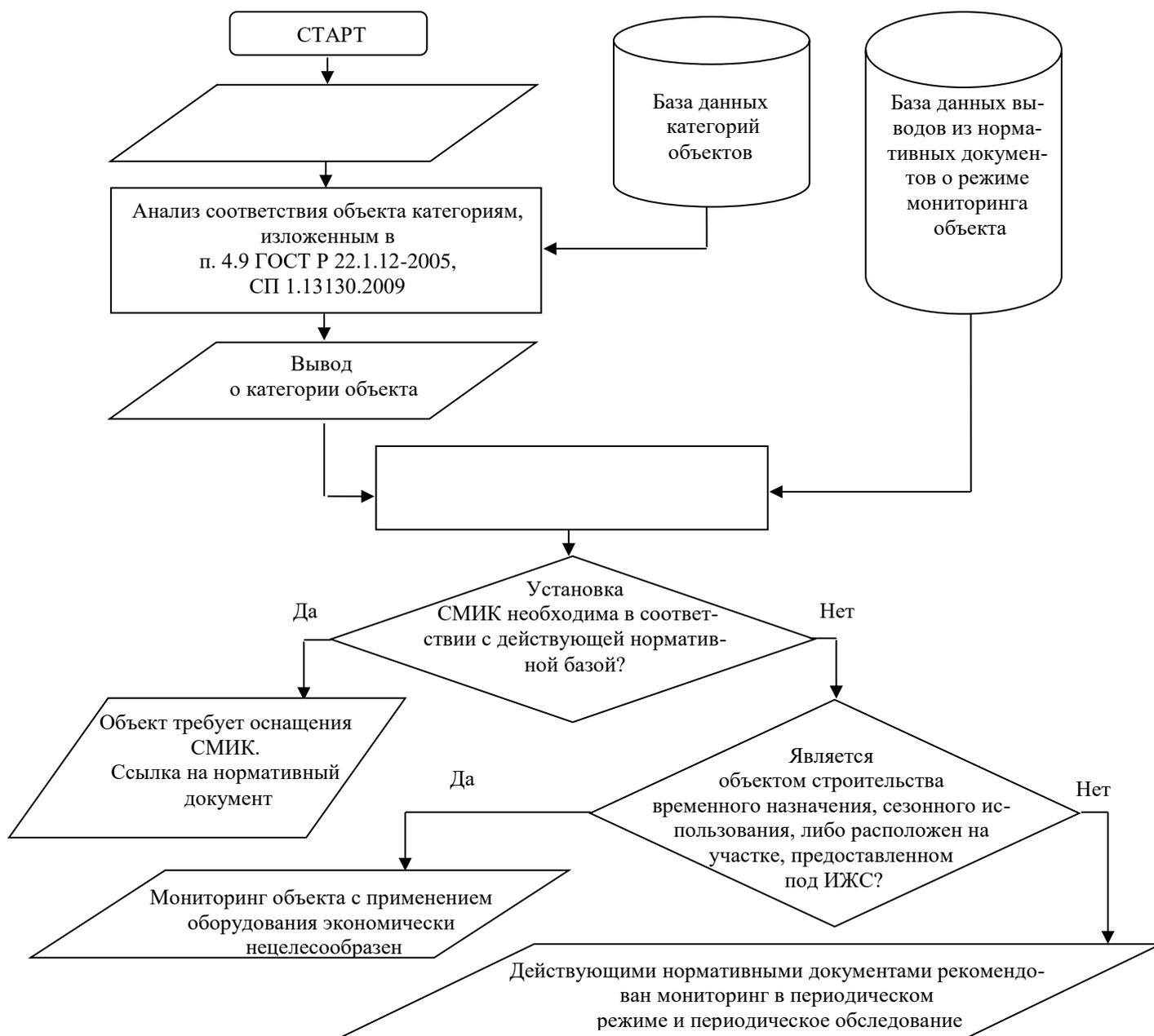
Логическая последовательность работы блоков объединена в информационную технологию разработки систем мониторинга зданий и сооружений.

Разработка информационной технологии требует решения следующих задач:

- создание опросных листов для сбора и последующего анализа исходных данных об объекте и результатах инженерных изысканий;
- создание блока анализа данных об объекте и результатах инженерных изысканий;
- формирование баз данных;
- режимов мониторинга;
- выводов о моделях опасности;
- состава измерительного оборудования.
- разработка формы представления результата.

Сбор данных об объекте и участке строительства следует производить в электронном виде в форме опросных листов. При этом объем данных должен быть достаточным для составления экспертной оценки: о назначении и конструктивных особенностях объекта; о характеристиках площадки строительства.

Для определения режима мониторинга в автоматическом режиме был разработан алгоритм анализа сведений об объекте и положений действующих нормативных документов (рис. 1), результатом работы которого является вывод о режиме мониторинга со ссылкой на нормативную документацию.



**Рис.1. Алгоритм определения режима мониторинга на основании сведений об объекте строительства**

**Fig.1. Algorithm for determining the monitoring mode based on information about the construction object**

Результатом работы макроса является схема расположения узлов и элементов модели с напряжениями и перемещениями, значения которых составляют установленный процент от допускаемых максимальных значений. Применение данного макроса позволяет в автоматическом режиме определить наиболее нагруженные зоны элементов конструкции, что необходимо для определения параметров контроля, требований к точности измерительного оборудования.

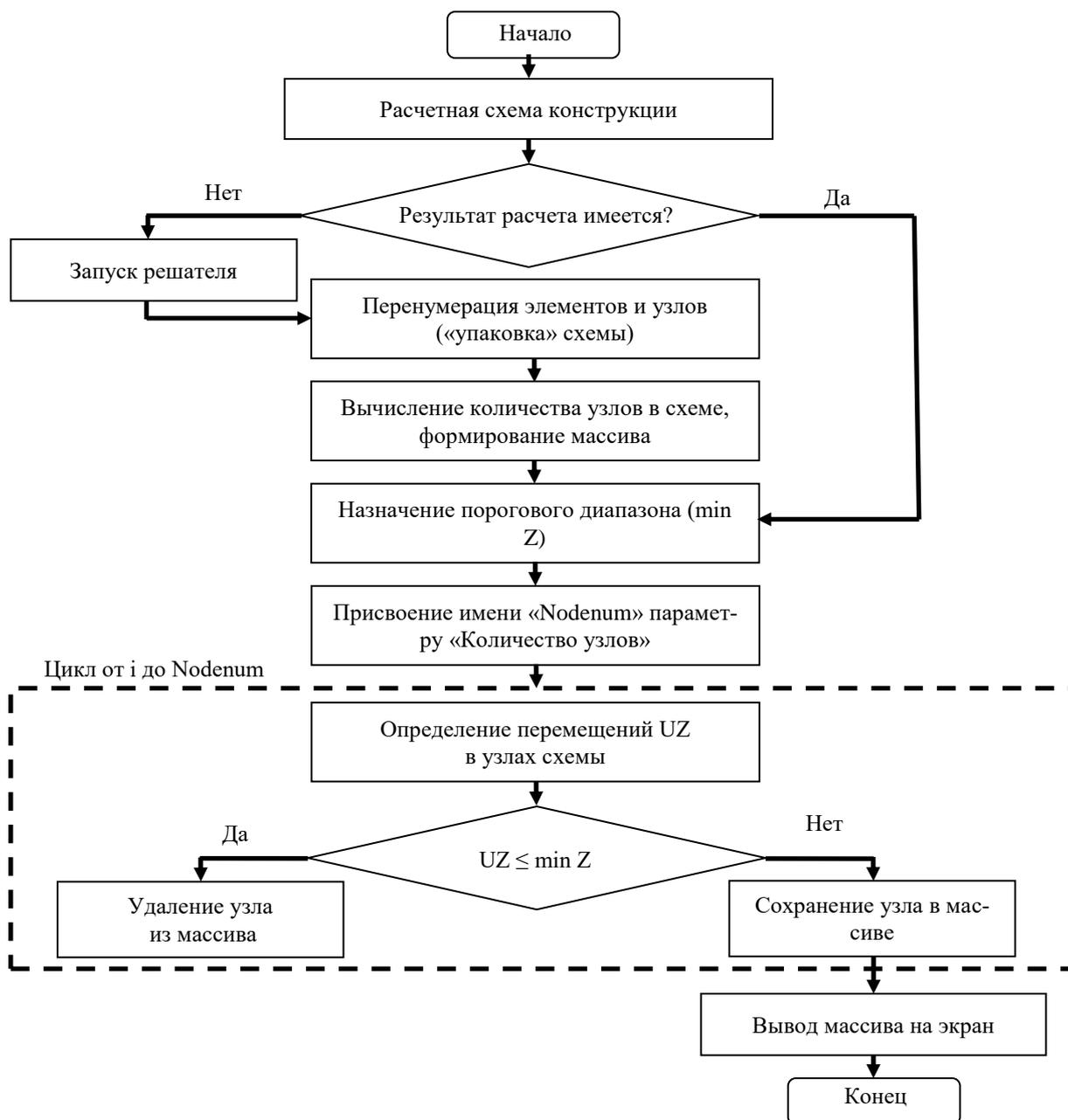


Рис.2. Алгоритм работы макроса определения наиболее нагруженных узлов и элементов  
Fig.2. Algorithm of macro definition of the most loaded nodes and elements

**Обсуждение результатов.** Основные параметры контроля зданий и сооружений следует определять на основании анализа моделей опасности и факторов, оказывающих существенное влияние на несущие конструкции, с применением МКЭ-моделирования.

Основными критериями выбора средств контроля для включения в состав системы мониторинга несущих конструкций является соответствие средств измерения следующим требованиям:

- достоверности измерений;
- получения фактических значений измеряемых величин с заданной точностью при минимальных временных и материальных затратах (фактических, истинных и т.д....);
- наличия возможности осуществления сбора, объединения и обработки информации, полученной от различных средств измерений в составе системы мониторинга.

На основании проведенного анализа различных технологий мониторинга и инженерного опыта по разработке проектов СМИК определено, что для получения наиболее полной картины

работы несущих конструкций объекта под нагрузкой, необходимо комплексное применение следующих видов контроля:

- пространственного положения объекта;
- напряженно-деформированного состояния фундамента и надземной части;
- состояния грунтового массива в основании объекта и в зоне влияния на окружающую застройку;
- модальных параметров (собственных частот и форм колебаний) сооружения.

Состав измерительного оборудования СМИК следует представить в виде двух перечней определяемых на основании анализа:

- а) основных моделей опасности;
- б) сведений об объекте и участке строительства.

При этом, перечень измерительного оборудования для контроля параметров, определенных на основании основных моделей опасности, будет одинаковым для всех объектов данного типа (например, высотных зданий). Состав измерительного оборудования для контроля параметров, определенных на основании сведений об объекте и участке строительства, будет определяться конструктивными особенностями конкретного объекта строительства и результатами инженерных изысканий, произведенных на площадке строительства.

Оптимальной средой для реализации разработанной информационной технологии являются программы управления базами данных, в частности, MS Access – удобная многофункциональная платформа разработки решений для управления базами данных, основными достоинствами которой являются широкие возможности по хранению и поиску данных, представлению информации в удобном виде и автоматизации выполнения повторяющихся задач.

Для эффективного конечно-элементного моделирования необходимо использовать расчетный комплекс, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- должен быть верифицирован, способен решать задачи с учетом геометрической и физической нелинейности, а также иметь возможность использования языка программирования для автоматизации построения и корректировки расчетных схем;
- должен иметь возможность решения задач проектирования и расчета строительных конструкций;
- иметь возможность экспорта конечно-элементной модели в другие МКЭ системы для контроля полученных решений.

Реализация разработанной информационной технологии осуществлена в ходе работ по разработке проекта системы мониторинга строительных конструкций (на стадии эксплуатации) на строящемся объекте «Павильон атомной энергии на ВДНХ».

**Вывод.** Приведенные выше основные положения разработанной информационной технологии позволили разработать программное обеспечение для эффективного анализа данных об объекте строительства и результатах инженерных изысканий с целью автоматизации разработки проектов СМИК для типовых категорий объектов строительства.

Актуальной задачей в данной сфере является дальнейшее совершенствование решений по автоматизации разработки проектов СМИК для высотных зданий и большепролетных зданий и сооружений I (повышенного) уровня ответственности, в силу роста темпов строительства объектов данных типов.

#### **Библиографический список:**

1. ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М., 2005.
2. Мониторинг технического состояния ответственных сооружений с использованием современных геодезических методов измерений и численного анализа методом конечных элементов / А.В. Коргин, М.А. Захарченко, В.А. Ермаков // Мониторинг. Наука и безопасность – 2011 - №3. С.58-63.
3. Динамический мониторинг конструкций декоративного навеса и пешеходного моста в аэропорту Шереметьево-3/ А.В. Коргин, Г.Э. Шаблинский, Е.Ю. Сергеевцев, Д.А. Зубков // Вестн. Моск. гос. строит. ун-та. – 2011. – №4. – С.222-228.

4. Создание экспериментальной системы GPS мониторинга высотного здания при ветровом воздействии / А.В. Коргин, М.А. Захарченко // Вестн. Моск. гос. строит. ун-та. – 2011. – №11. – С.200-205.
5. Программная составляющая автоматизированной системы дистанционного мониторинга / Коргин А.В., Ермаков В.А., Зейд Килани Л.З., Смирнов В.А., Красочкин А.Г., Романец В.А. Научное обозрение -2015. -№ 20 - 2015. С.191-198
6. Сушеев, С.П. Мониторинг технического состояния несущих конструкций высотного здания / С.П. Сушеев, В.В. Самарин, И.А. Адаменко, В.Н. Сотин Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов, выпуск 8. - Москва. - 2009, 580 с. С. 15-26.
7. 10. Шахраманьян А.М. Технологические и методические основы построения систем мониторинга несущих конструкций высотных и уникальных объектов // [Электронный документ] / Предотвращение аварий зданий и сооружений. - 2009 (<http://pamag.ru/pressa/tech-construct>)
8. Шахраманьян, А.М. Научно-технологические основы и практика создания систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций высотных и уникальных объектов // Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства. Информационный сборник. М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2009. 224 с., С. 94-97.
9. Шахраманьян, А.М. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 / А.М. Шахраманьян, Ю.А. Колотовичев // Вестник МГСУ. - 2015. - № 12. С. 92-105.
10. Гурьев, В.В. Обеспечение безопасности работы несущих конструкций высотных зданий / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // Промышленное и гражданское строительство. - М., 2004. - № 12.
11. Гурьев, В.В. Мониторинг технического состояния зданий и сооружений [Электронный ресурс] / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // URL: <http://stroyprofile.com/archive/1738> (дата обращения 22.01.2019)
12. Дорофеев, В.М. Методика определения периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий и сооружений / В.М. Дорофеев, И.И. Булыкин, Н.В. Назьмов // Промышленное и гражданское строительство. М., 2006. - № 4. - С. 28-29
13. Гурьев, В.В. О мониторинге технического состояния несущих конструкций высотных зданий и широкопролетных сооружений / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2006. - № 7. - С. 68-69.
14. Патент РФ № 2413193 Способ мониторинга безопасности несущих конструкций, конструктивных элементов зданий и сооружений и система для его осуществления Патентообладатели: Волков Олег Сергеевич (RU), Клецин Владимир Иванович (RU)
15. Методика мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Общие положения и требования. Негосударственное образовательное учреждение «Учебно - консультационный центр «БАЗИС». Москва, 2008. Методика аттестована Правительственной комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности, протокол от 18 марта 2009 г. № 3.
16. Николаев, С.В. Опыт проектирования и эксплуатации схем мониторинга конструкций и оснований высотных зданий / С.В. Николаев, В.М. Острецов, Л.Б. Гендельман, А.Б. Вознюк, Н.К. Капустян, В.В. Сухин и др. // URL: <http://www.gpiko.ru/ru/Main/ContentPage/doclad> (дата обращения 22.01.2019)
17. Болдырев, Г.Г. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений / Г.Г. Болдырев, Д.Н. Валеев, А.А. Живаев, П.В. Нестеров // Жилищное строительство. - 2010. - № 10. - С.38-44
18. Горпинченко, В.М., Егоров В.И. Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений / В.М. Горпинченко, В.И. Егоров // Промышленное и гражданское строительство. - 2004. - № 10. - С.39-41
19. Farrar, C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition / C.R. Farrar. - Los Alamos: NM, 2001. – 150 p.
20. Джоел ван Крейненброк (Joel van Cranenbroeck) Технологии ГНСС позволяют людям знать все точно / Джоел ван Крейненброк // Геопрофи. - 2007. - № 3. - С. 6-8
21. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с. (Сер. Информатика в техническом университете).

#### References:

1. GOST R 22.1.12-2005 Bezopasnost v chrezvichainykh situatsiyakh. Strukturirovannaya sistema monitoringa i upravleniya ingenernimi sistemami zdaniy i sooryeniy. Obschie trebovaniya. [Safety in emergencies. Structured system for monitoring and control of building / construction engineering equipment. General requirements. (in Russ.)]
2. Korgin A.V., Zakharchenko M.A., Ermakov V.A. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya otvetstvennykh sooryeniy s ispol'zovaniem sovremennykh geodezicheskikh metodov izmereniy i chislennogo analiza metodom konechnykh elementov. Monitoring. Nauka I bezopasnost'. – 2011 - №3. с.58-63. [Korgin A.V., Zakharchenko M.A., Ermakov V.A. Monitoring of the technical condition of critical structures using modern geodetic measurement methods and numerical analysis by finite element method. // Monitoring. Science and security-2011 - №3. P. 58-63. (in Russ.)]
3. Korgin A.V., Shablinskiy G.E., Sergeevtsev E.Yu., Zubkov D.A. Dinamicheskii monitoring konstruktsiy dekorativnogo navesa i peshekhodnogo mosta v aeroportu Sheremet'evo-3. Vestnik MGSU. – 2011. –№ 4. – с.222-228. [Korgin

- A.V., Shablinskiy G.E., Sergeevtsev E.Yu., Zubkov D.A. Dynamic monitoring of structures decorative shed and footbridge at the airport Sheremetyevo-3. // Vestnik MGSU. - 2011. - №4. - P. 222-228. (in Russ.)
4. Korgin A.V., Zakharchenko M.A. Sozdaniye eksperimental'noy sistemu GPS monitoring visotnogo zdaniya pri vetrovom vozdeistvii. Vestnik MGSU. – 2011. – №8. – с.200-205. [Korgin A.V., Zakharchenko M.A. Creation of experimental GPS-system for monitoring tall-building response to wind load. // Vestnik MGSU. - 2011. - №11. – P.200-205. (in Russ.)]
5. Korgin A.V., Ermakov V.A., Zeid Kilani L.Z., Smirnov V.A., Krasochkin A.G. Romanets V.A. Programmaya sostavlyayuschaya avtomatizirovannoy sistemy distantsionnogo monitoringa. Nauchnoe obozreniye. . - 2015. - № 20. - с.191-198. [Korgin A.V., Ermakov V.A., Zeid Kilani L.Z., Smirnov V.A., Krasochkin A.G. Romanets V.A. Software component of the automated remote monitoring system // Scientific review - 2015. - № 20. - P.191-198. (in Russ.)]
6. Suscheev S.P., Samarin V.V., Adamenko I.A., Sotin V.N. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nesuschikh konstruktivnykh visotnogo zdaniya. Predotvrashcheniye avariyn zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov, vipusk 8. – Moskva. - 2009, 580 p., с. 15-26. [Suscheev S.P., Samarin V.V., Adamenko I.A., Sotin V.N. Monitoring of technical condition of bearing structures of high-rise building // Prevention of accidents of buildings and structures: Collection of scientific papers, issue 8. - Moscow. - 2009, 580 p., P. 15-26. (in Russ.)]
7. Shakhraman'yan A.M. Tekhnologicheskie i metodicheskie osnovy postroeniya system monitoringa nesuschikh konstruktivnykh visotnykh i unikal'nykh ob'ektov. [Elektronnyi resurs] URL <http://pamag.ru/prensa/tech-construct> (data obrachsheniya 20.01.2019) [Shakhraman'yan A.M. Technological and methodical bases of construction of systems of monitoring of the bearing designs of high-rise and unique objects. [Electronic resource] URL: <http://pamag.ru/prensa/tech-construct> (access date 20.01.2019) (in Russ.)]
8. Shakhraman'yan A.M. Nauchno-tekhnologicheskiye osnovy i praktika sozdaniya system monitoring deformatsionnogo sostoyaniya nesuschikh konstruktivnykh visotnykh i unikal'nykh ob'ektov. Sovremennyye sistemy i sredstva kompleksnoi bezopasnosti i protivopozharnoi zashchity ob'ektovstroitel'stva. // Informatsionnyy sbornik GUP «ITTS Moskomarkhitektury», 2009. 224 p., p. 94-97. [Shakhraman'yan A.M. Scientific and technological bases and practice of creation of systems of monitoring of the deformation state of bearing structures of high-rise and unique objects // Modern systems and means of complex safety and fire protection of construction objects. Information collection. M.: GUP "ITC of Moscomarchitecture", 2009. 224 p., Pp. 94-97. (in Russ.)]
9. Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Opit ispol'zovaniya avtomatizirovannykh system monitoringa deformatsionnogo sostoyaniya nesuschikh konstruktivnykh ob'ektakh Sochi-2014. // Vestnik MGSU. - 2015. - № 12. p. 92-105. [Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Experience of using automated monitoring systems of the strain state of bearing structures on the Olympic objects Sochi-2014. // Vestnik MGSU. - 2015. - № 12. P. 92-105. (in Russ.)]
10. Gur'ev V.V., Dorofeev V.M. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy. [Elektronnyi resurs] URL: <http://stroyprofile.com/archive/1738> (data obrachsheniya 20.01.2019) [Gur'ev V.V., Dorofeev V.M. Monitoring of technical condition of buildings and structures. [Electronic resource] URL: <http://stroyprofile.com/archive/1738> (access date 20.01.2019) (in Russ.)]
11. Dorofeev V.M., Bulykin I.I., Naz'mov N.V. Metodika opredeleniya perioda i logarifmicheskogo dekrementa osnovnogo tipa sobstvennykh kolebaniy zdaniy i sooruzheniy. // Promushlennoe i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2006. - № 4. - С. 28-29. [Dorofeev V.M., Bulykin I.I., Naz'mov N.V. Methods of determining the period and the logarithmic decrement of the basic tone of the natural oscillations of buildings and structures // Industrial and civil engineering. M., 2006. № 4. P. 28-29. (in Russ.)]
12. Gur'ev V.V., Dorofeev V.M. O monitoringe tekhnicheskogo sostoyaniya nesuschikh konstruktivnykh visotnykh zdaniy i shirikoproletnykh sooruzheniy. // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. - 2006.- № 7.- p. 68-69. [Gur'ev V.V., Dorofeev V.M. About monitoring of technical condition of bearing structures of high-rise buildings and wide-span structures // Building materials, equipment, technologies of the XXI century.- 2006.- № 7.- P. 68-69. . (in Russ.)]
13. Volkov O.S., Kletsin V.I. Sposob monitoringa bezopasnosti nesuschikh konstruktivnykh elementov zdaniy i sooruzheniy i sistema ego osuschestvleniya. Patent RU № 2413193 MPK G01M 7/00 Opubl. 27.02.2011 Buyl. № 6 [Volkov O.S., Kletsin V.I. Method to monitor safety of bearing structures, structural elements of buildings and structures and system for its realization Patent RU № 2413193 MPK G01M 7/00. Publ. 27.02.2011. Bul. № 6 (in Russ.)]
14. Metodika monitoringa sostoyaniya nesuschikh konstruktivnykh ob'ektov. Obschie polozheniya i trebovaniya. // Negosudarstvennoye obrazovatel'noe uchrezhdeniye "Uchebno-konsul'tatsionnyy tsentr «BAZIS» Moskva. 2008. 36 с. [Methods of monitoring the state of load-bearing structures of buildings and structures. General provisions and requirements. // Non-governmental educational institution "training and consulting center "BASIS". Moscow, 2008. 36 p. (in Russ.)]
15. Nikolaev S.V., Ostretsov V.M., Gendel'man L.B., Kapustyan N.K., Sukhin V.V. Opit proektirovaniya i ekspluatatsii skhem monitoringa konstruktivnykh visotnykh zdaniy. [Elektronnyi resurs] URL: <http://www.gpiko.ru/ru/Main/ContentPage/doclad> (data obrachsheniya 20.01.2019) [Nikolaev S.V., Ostretsov V.M., Gendel'man L.B., Kapustyan N.K., Sukhin V.V. Experience in design and operation of monitoring schemes of structures and bases of high-rise buildings [Electronic resource] URL: <http://www.gpiko.ru/ru/Main/ContentPage/doclad> (access date 20.01.2019) (in Russ.)]

16. Boldurev G.G., Valeev D.N., Zhivaev A.A., Nesterov N.P. Sistemi monitoringa stroitel'nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy. // Zhilishchnoe stroitel'stvo. - 2010. - № 10. - с.38-44. [Boldurev G.G., Valeev D.N., Zhivaev A.A., Nesterov N.P. Monitoring systems of building structures of buildings and structures // Housing construction. - 2010. № 10. P. 38-44. (in Russ.)]
17. Gorpichenko V.M., Egorov V.I. Monitoring ekspluatatsionnoy prigodnosti osobo otvetstvennykh, slzhnykh I unikal'nykh sooruzheniy. // Promushlennoe i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2004.- № 10. – p.39-41. [Gorpichenko V.M., Egorov V.I. Monitoring of operational suitability of especially responsible, complex and unique structures // Industrial and civil engineering. 2004. № 10. pp. 39-41. (in Russ.)]
18. Farrar, C.R. Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition / C.R. Farrar. - Los Alamos: NM, 2001. 150 p.
19. Joel van Cranenbroeck Tekhnologii GNSS pozvoliauyut lyudam znat' vse tochno. Geoprofi. - 2007. - №3. - с. 6-8. [Joel van Cranenbroeck GNSS technology allow people know exactly what // Geoprofi. 2007. № 3. pp. 6-8. (in Russ.)]
20. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya. 2 izdaniye pererab. i dop. M. Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002. - 336 с. (Ser. Informatika v tekhnicheskoy universitete). [Norenkov I.P. Fundamentals of computer-aided design: Studies. for universities. 2-e Izd., Rev. and extra - M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2002. 336 p. (Ser. Computer science at the technical University). (in Russ.)]

**Сведения об авторе:**

**Емельянов Михаил Валерьевич** - научный сотрудник

**Information about the author:**

**Mikhail V. Emelianov**- Scientific Researcher

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 14.02.2019.

**Принята в печать** 22.03.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

**Received** 14.02.2019.

**Accepted for publication** 22.03.2019.

**Для цитирования:** Жеругов Р. А., Кангезова М. Х., Лapidус А.А. Автоматизация процесса обеспечения соответствия объекта стандартам «зеленого» строительства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1): 132-141. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-132-141.

**For citation:** Zherugov R. A., Kangezova M. H., Lapidus A. A. Automation of the process of ensuring the conformity of the object to the "Green" construction standards. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 132-141. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-132-141

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 69.05

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-132-141

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТА СТАНДАРТАМ «ЗЕЛЕНОГО» СТРОИТЕЛЬСТВА

**Жеругов Р. А.<sup>3</sup>, Кангезова М. Х.<sup>2</sup>, Лapidус А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1-3</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),

<sup>1-3</sup>129337, Москва, Ярославское ш., 26, Москва, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: lapidus58@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: kangezova97@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail: Grado.zherugov@mail.ru

**Резюме. Цель.** Решение основных задач проектирования объектов строительства в соответствии с экологическими стандартами невозможно без систем автоматизированного проектирования и управления базами данных. В статье рассматривается часть программного комплекса, который позволит автоматизировать процесс обеспечения соответствия объекта стандартам «зеленого» строительства. **Метод.** В основу проектных разработок положены критерии системы добровольной экологической сертификации объектов недвижимости, утвержденные распоряжением Минприроды России, а также критерии стандартов LEED. Для анализа данных использовался программный комплекс MapInfo. **Результат.** Разработана структура программного продукта, которая будет отвечать на основные вопросы, возникающие при проектировании любого здания с учетом стандартов зеленого строительства. Для каждой категории основополагающими факторами (исходными данными) выступают соответствующие данные каждого критерия. **Вывод.** Разработанный программный комплекс даст возможность минимизировать воздействия строительного объекта на окружающую среду и повысить энергоэффективность строящегося объекта. Также, повысить качество организационно-технологических решений строительного процесса, уменьшить влияние объекта строительства на окружающую среду и эффективно использовать ресурсы. Полная реализация алгоритма даст возможность сократить время и затраты на проектирование зданий и сооружений, увеличить точность прорисовки деталей и элементов конструкции, улучшить качество и технико-экономический уровень итогов проектирования, а также минимизировать затраты на ручное моделирование и испытания.

**Ключевые слова:** системы сертификаций зданий, оценка устойчивости, методы оценки, экологическая эффективность, «зеленое» строительство, жизненный цикл, качество, «зеленые» технологии

## AUTOMATION OF THE PROCESS OF ENSURING THE CONFORMITY OF THE OBJECT TO THE "GREEN" CONSTRUCTION STANDARDS

*Ratmir A. Zherugov*<sup>3</sup>, *Marianna H. Kangezova*<sup>2</sup>, *Azariy A. Lapidus*<sup>1</sup>

<sup>1-3</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU),

<sup>1-3</sup>26, Yaroslavskaya highway, Moscow 129337, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [lapidus58@mail.ru](mailto:lapidus58@mail.ru), <sup>2</sup>e-mail: [kangezova97@mail.ru](mailto:kangezova97@mail.ru),

<sup>3</sup>e-mail: [Grado.zherugov@mail.ru](mailto:Grado.zherugov@mail.ru)

**Abstract Objectives.** Solving the main tasks of designing construction objects in accordance with environmental standards is impossible without computer-aided design and database management systems. The article discusses a part of the software package that will automate the process of ensuring compliance of the object with the standards of "green" construction. **Method.** The basis of the project development is the criteria of the system of voluntary environmental certification of real estate objects, approved by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia, as well as the criteria of LEED standards. For data analysis, the software complex MapInfo was used. **Result.** The structure of the software product has been developed, which will answer the main questions arising in the design of any building, taking into account the standards of green building. For each category the underlying factors (input data) are the corresponding data for each criterion. **Conclusion.** The developed software package will provide an opportunity to minimize the impact of a construction object on the environment and increase the energy efficiency of the object under construction. Also, improve the quality of organizational and technological decisions of the construction process, reduce the impact of the construction project on the environment and effectively use resources. Full implementation of the algorithm will make it possible to reduce the time and cost of designing buildings and structures, increase the accuracy of drawing details and structural elements, improve the quality and technical and economic level of the design results, and minimize the costs of manual modeling and testing.

**Key words:** system of certification of buildings, evaluation of stability, methods of assessment, eco-efficiency, green building, life cycle, quality, "green" technology

**Введение.** Конструирование целостной информационной модели здания на стадии планирования жизненного цикла (ЖЦ) здания является основным инструментом повышения эффективности организационно-технологических аспектов строительного производства. Формируя многофункциональную модель объекта строительства можно проанализировать возможность изменений в реальном времени, создать режим работы формируемой системы, а также, координировать работу всех подсистем.

При разработке алгоритма программы, для более полного понимания проблематики и специфики данной работы, были проанализированы понятия и аспекты следующей нормативной и правовой документации:

1. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство»;
2. СП 328.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила описания компонентов информационной модели»;
3. СП 331.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах» [1].

Данные документы содержат в себе теоретическую основу, необходимую для проведения дальнейших разработок.

Исследование данных нормативных и правовых документов необходимо для набора методологической терминологии и расчетного материала, с помощью которых и было проведено данное исследование.

Аналізу подверглись и такие международные рейтинговые системы оценки устойчивости среды обитания, как BREEAM и LEED.

**Методы исследования.** В основу проектных разработок положены критерии системы добровольной экологической сертификации объектов недвижимости, утвержденные распоряжением Минприроды России в декабре 2009г., а также критерии стандартов LEED.

Соответствие стандартам зеленого строительства обуславливается следующими категориями [6,12]:

1. Качество и комфорт внешней среды;
2. Качество планировки и архитектуры объекта;
3. Экология и комфорт внутренней среды;
4. Утилизация отходов и качество санитарной защиты;
5. Рациональное водопользование;
6. Энергоэффективность и энергосбережение;
7. Возобновляемая и альтернативная энергия;
8. Экология создания, эксплуатации и утилизации объекта [1].

Алгоритм процесса реализации автоматизированного обеспечения соответствия стандартам зеленого строительства подразумевает работу с базой данных и состоит из четырёх этапов: на первом этапе выбирается одна категория из восьми; вторым этапом пользователь вводит необходимые и дополнительные исходные данные; третий этап направлен на анализ и расчет, на четвертом этапе пользователю предоставляются результаты.

В связи с ограничением по времени и большой трудоемкостью работы, для реализации процесса оптимизации был рассмотрен критерий «Комфорт и качество внешней среды». Этот критерий включает в себя:

1. Дальность общественного транспорта;
2. Доступность объектов социально-бытовой инфраструктуры;
3. Наличие на придомовой территории физкультурно - оздоровительных, спортивных сооружений и игровых площадок;
4. Ландшафтное орошение;
5. Озелененность территории;
6. Доступность экологического транспорта;
7. Близость водной среды и визуальный комфорт.

Категории «зеленого» строительства и их подкритерии подробно описаны в предыдущих научных публикациях [6].

Программный комплекс предназначен для уменьшения трудоемкости работы проектировщиков на разных этапах жизненного цикла объекта. Вторым пунктом, после выбора необходимого нам критерия, идет ввод основных и дополнительных исходных данных. Следующим этапом, после выбора необходимой категории, необходимо ввести основные и дополнительные исходные характеристики.

Основные исходные данные: местоположение объекта; строительный объем; площадь участка; площадь застройки; процент застройки; плотность застройки; площадь благоустройства; высотность; высота первого этажа; высота типового этажа; этажность; средняя площадь двух комнатных квартир; средняя площадь трех комнатных квартир [8].

Сбор дополнительных данных включает в себя изучение фондовых, литературно-справочных, статистических, аэрокосмических и картографических материалов, характеризующих физико-географические условия и особенности строительства как исследуемого региона в целом, так и изучаемых административных образований, входящих в регион.

**Обсуждение результатов.** Для того чтобы измерить доступность нужно обладать такими сведениями, как:

- достоверная информация о дорожной сети, пешеходной и велосипедной инфраструктуры;
- точная информация об общественном транспорте – маршруты, остановки, расписание

движения и пр.;

- демографические данные – информация о том, где проживают и работают люди;
- соответствующие фактическим значениям данные о землепользовании – расположение больниц, парков, школ и продуктовых магазинов.

Для получения информации с картографического материала на сегодняшний день можно использовать готовые платформы и новые инструменты для оценки доступности. Одним из самых эффективных методов получения этих информации являются современные геоинформационные системы (ГИС). Для получения и дальнейшего анализа данных использовался программный комплекс MapInfo [12].

В MapInfo вся информация хранится в базе данных и есть возможность получения информации через математический sql-запрос из любой базы данных; удаления и добавления полей, изменения их порядка, имен, типов, ширины и индекса; проверки на наличие графических объектов.

Также, в MapInfo можно измерять расстояния по кадастровым кварталам и добавить результаты в исходную таблицу, что упрощает во многом нашу работу.

Используя программу MapInfo можно получить такие данные, как:

- дальность пешеходного подхода до остановки общественного транспорта;
- дальность объектов торговли, связи, бытовых, банковских услуг и аптек, и объектов здравоохранения, образования;
- наличие и дальность на придомовой территории бассейнов и игровых залов, открытых спортплощадок, детских спортплощадок;
- наличие и близость искусственных или естественных водных объектов.

Помимо полученных данных через MapInfo для автоматизированного расчета используются такие показатели как:

1.  $t_{инд}$  – Общесреднее время поездки на персональном транспорте, минут;
2.  $t_{общ}$  – Общесреднее время поездки на социальном транспорте, минут;
3.  $I_{инд}$  – Общесредняя длина поездки на персональном транспорте, км;
4.  $I_{общ}$  – Общесредняя длина поездки на социальном транспорте, км;
5.  $n_{наз}$  – Сумма всех маршрутов наземного общественного транспорта, проходящих через ближайшие остановки;
6.  $A * I_{ср}$  – Объем работы поездки, который определяется через объем перевозок и среднюю дальность поездки, в расчетные зимние сутки можно рассчитать по формуле:

$$A * I_{ср} = \frac{\lambda_M * H * I'_{ср}}{365 * k_{пр}} * \alpha_3 * \theta_a, \quad (1)$$

где  $\lambda_M$  - маршрутная подвижность;

$H$  - численность населения города (среднее значение), тыс.чел;

$I'_{ср}$  - сетевая средняя дальность поездки;

$\alpha_3$  - коэффициент, учитывающий увеличение размеров перевозок зимой по сравнению со среднегодовым объемом перевозок;

$\theta_3$  - коэффициент, учитывающий долю перевозок, осваиваемую легковыми автомобилями;

$k_{пр}$  - коэффициент пересадочности сообщений [6].

$A$  - при расчете объема перевозок за один зимний месяц рассчитывается по формуле [6]:

$$A_3^n = \frac{\lambda_M * H}{12} * \alpha_3 * \theta_3, \quad (2)$$

7. Плотность транспортной сети, которая определяется по формуле:

$$\delta = \frac{L_c}{F_c}, \quad (3)$$

где  $L_c$  - протяженность транспортной сети по оси улиц, км;

$F_c$  - селитебная территория города, км [6].

8. Рациональной плотностью транспортной сети будет такая плотность, при которой пассажиры затрачивают минимальное время на передвижение  $T$ , включающее время подхода к остановочному пункту или к стоянке автомобиля  $t_{н1}$ , время ожидания транспорта на остановке

или подготовки автомобиля к движению  $t_{ож}$ , время движения на транспорте  $t_{дв}$ , которое включает время на пересадки, и время подхода от остановки (стоянки) до цели поездки  $t_{п2}$ .

$$T = t_{п1} + t_{ож} + t_{дв} + t_{п2}. \quad (4)$$

Следующим этапом алгоритма процесса реализации автоматизированного обеспечения соответствия стандартам зеленого строительства является автоматический анализ поступающей информации, которая должна обладать свойствами адекватности, непротиворечивости и достаточности для проведения необходимых расчетов по алгоритму (рис.1 и 2).

Под адекватностью понимается совпадение формата (функций/параметров/свойств и т. п.) исходной информации требуемого программой. Непротиворечивость заключается в невыводимости из неё противоречия. А достаточность оценивается полнотой исходной информации.

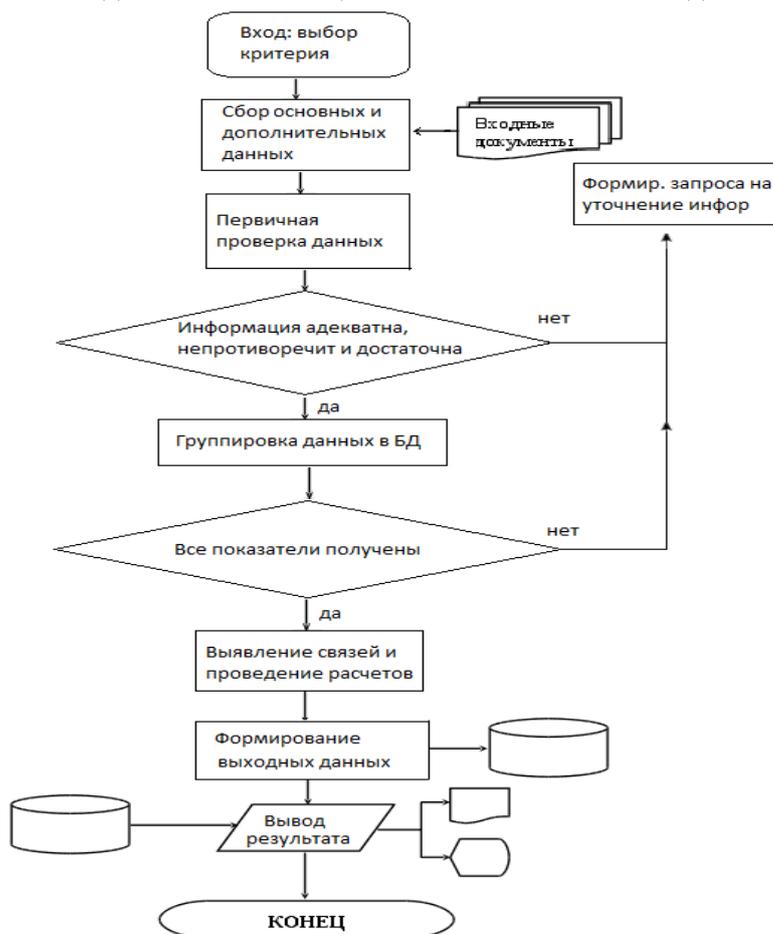


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного анализа данных  
Fig. 1. Algorithm of automated data analysis

После выполнения алгоритма программа предоставляет пользователю степень соответствия стандартам зеленого строительства по выбранному критерию.

Для апробации и проверки разработанного алгоритма программы была разработана BIM-модель жилого комплекса (ЖК) по адресу Краснодарский край, Краснодар, Трамвайная ул., 58.

Проект разработан в соответствии с государственными нормами, правилами, стандартами, исходными данными, техническими условиями и требованиями, а также санитарными, экологическими, противопожарными, ГО и ЧС требованиями, что обеспечивает безопасную эксплуатацию зданий при соблюдении предусмотренных проектом мероприятий.

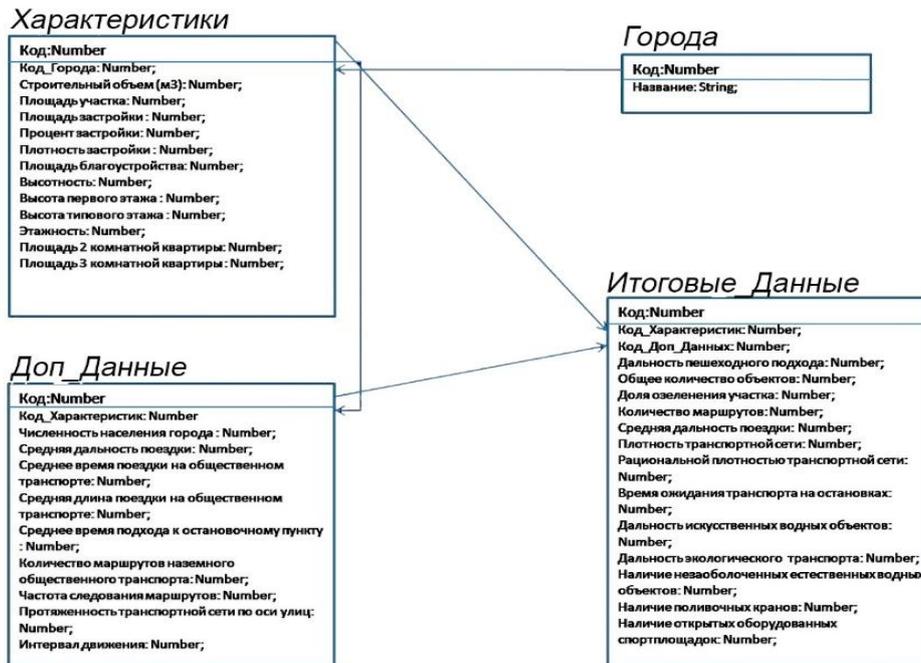


Рис.2 Форма базы данных для автоматизированного анализа данных  
 Fig.2 Database form for automated data analysis

Проектируемое здание – жилой, одиннадцатизэтажный трехсекционный дом точечного типа. В жилой комплекс можно зайти с 8 входов. Сообщение между этажами и обеспечение эвакуации производится посредством лестницы и выходом на улицу. Лестницы отвечают требованиям СНиП 21-01-97\*. Крыша в здании плоская. Высота помещений – 3,3 м. На первом этаже находятся: ресторан, читальный зал, аптека, салон связи, универмаг, цветочный магазин и т.д. Планировочная схема здания разработана с учетом задания на проектирование и действующих нормативных требований. За относительную отметку +0,000 принята отметка чистого пола первого этажа. Спроектированная модель жилого комплекса в программе Archicad (рис. 3), проходила такие этапы, как: предварительная настройка проекта; создание сетки осей; создание несущих конструкции; формирование крыши; создание лестниц и лифтовых шахт; доработка проекта.

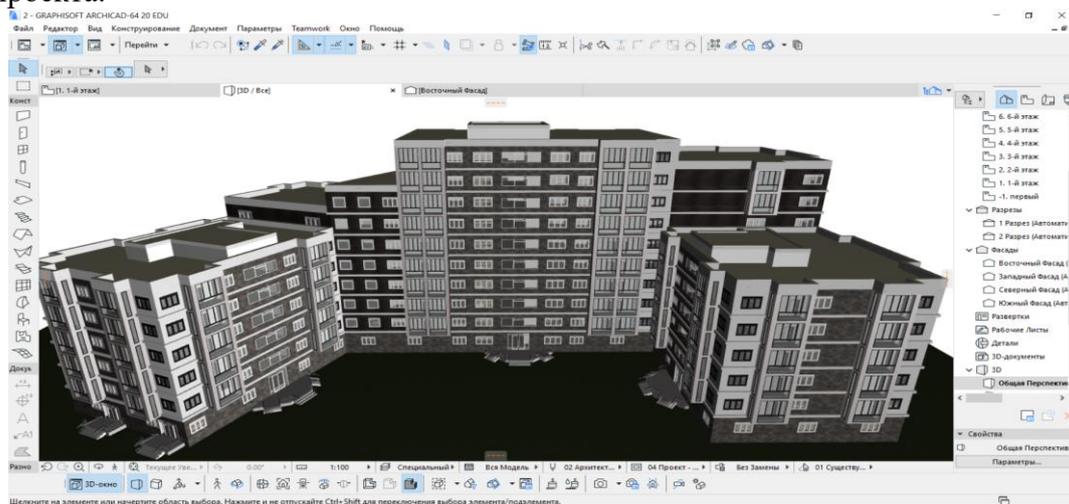


Рис.3. Проект жилого комплекса в Archicad  
 Fig.3. Project residential complex in Archicad

В соответствии с вышеописанным алгоритмом, первым пунктом выбирается необходимый критерии (рис.4).

## Автоматизация обеспечения соответствия объекта "зеленым" стандартам

Выберите критерий

- Качество архитектуры и планировки объекта
- Качество архитектуры и планировки объекта
- Комfort и качество внешней среды
- Комfort и экология внутренней среды
- Качество санитарной защиты и утилизация отходов
- Рациональное водопользование
- Энергосбережение и энергоэффективность
- Альтернативная и возобновляемая энергия
- Экология создания, эксплуатации и утилизации объекта

**Рис.4. Выбор необходимого критерия**  
**Fig.4. Selection of the necessary criteria**

Вторым пунктом вводится исходные и дополнительные данные (рис.5).

<p>Выберите название</p> <input type="text" value="ЖК"/>	<p>Автоматизация обеспечения соответствия объекта "зеленым" стандартам</p> <p>Название</p> <input type="text" value="ЖК"/>
<p>Н - численность населения города:</p> <input type="text"/>	<p>Выберите Город</p> <input type="text" value="Краснодар"/>
<p>I ср - Средняя дальность поездки, км:</p> <input type="text"/>	<p>Строительный объем м3</p> <input type="text" value="34089,8"/>
<p>t дв - Среднее время поездки на общественном транспорте, минут:</p> <input type="text"/>	<p>Площадь участка га</p> <input type="text" value="1"/>
<p>I общ - Средняя длина поездки на общественном транспорте, км</p> <input type="text"/>	<p>Площадь застройки м2</p> <input type="text" value="2700"/>
<p>K n1 - среднее время подхода к остановочному пункту или стоянке автомобиля, мин</p> <input type="text"/>	<p>Процент застройки %</p> <input type="text" value="23"/>
<p>ЛМ - Количество маршрутов наземного общественного транспорта, проходящих через ближайшие остановки</p> <input type="text"/>	<p>Плотность застройки м2</p> <input type="text" value="22309,73"/>
<p>f (t) - Частота следования маршрутов, мин:</p> <input type="text"/>	<p>Площадь благоустройства м2</p> <input type="text" value="420,88"/>
<p>L c - Протяженность транспортной сети по оси улиц</p> <input type="text"/>	<p>Высотность м</p> <input type="text" value="38800"/>
<p><input type="button" value="Занести данные"/></p>	<p>Высота первого этажа м</p> <input type="text" value="3300"/>
	<p>Высота типового этажа м</p> <input type="text" value="3300"/>
	<p>Этажность</p> <input type="text" value="11"/>
	<p>Площадь 2 комнатной квартиры</p> <input type="text" value="83,52"/>
	<p>Площадь 3 комнатной квартиры</p> <input type="text" value="101,41"/>
	<p><input type="button" value="Занести данные"/></p>

**Рис. 5. Ввод исходных и дополнительных данных**  
**Fig. 5. Input of initial and additional data**

В соответствии с проектом были получены следующие результаты автоматизации критерия «Комfort и качество внешней среды» (рис.6):

## Автоматизация обеспечения соответствия объекта "зеленым" стандартам

- Дальность пешеходного подхода до остановки общественного транспорта, метров – 180
- Общее количество объектов торговли, связи, бытовых, банковских услуг и аптек (в радиусе до 400 м от здания) и объектов здравоохранения, образования (в радиусе до 800 м от здания) – 7
- Доля озеленения участка, % - 16%
- Количество маршрутов наземного общественного транспорта, проходящих через ближайšie остановки - 8
- Средняя дальность поездки, км - 9
- Плотность транспортной сети - 2.33
- Рациональной плотностью транспортной сети - 31
- Время ожидания транспорта на остановках - 2
- Дальность искусственных водных объектов на придомовой территории - 260 м
- Дальность экологического транспорта, м (велодорожки, паркинг) - 310 м
- Наличие незаоболоченных естественных водных объектов на расстоянии, м -480 м
- Наличие поливочных кранов, м - 370 м

**Рис.6. Результаты автоматизации критерия «Комфорт и качество внешней среды»**

**Fig.6. The results of the automation of the criterion "Comfort and quality of the external environment"**

**Вывод.** Современные технологии позволяют значительно сократить время и затраты на проектирование зданий и сооружений, увеличить точность прорисовки деталей и элементов конструкции, улучшить качество и технико-экономический уровень итогов проектирования, а также минимизировать затраты на ручное моделирование и испытания. С помощью визуального отображения результатов можно отслеживать состояние здания, что позволяет наглядно отслеживать ход работы.

В статье разработана структура программного продукта, которая будет отвечать на основные вопросы, возникающие при проектировании любого здания с учетом стандартов зеленого строительства. Для каждой категории основополагающими факторами (исходными данными) выступают соответствующие данные каждого критерия.

Следовательно, для обеспечения соответствия стандартам зеленого строительства, расчет производится с учетом особенностей каждой категории. Оптимизация процесса обеспечения соответствия позволит достигать поставленных целей быстрее и использовать заложенную структуру в будущем. Также, были представлены возможности создания проекта с применением стандартов «зеленого» строительства, с помощью современных программных продуктов, которые позволяют автоматизировать проектирование зданий и сооружений

Разработанный алгоритм расчета является лишь малой показательной частью. На базе существующих платформ для создания информационных моделей, необходим ввод модуля, предоставляющего проектировщику данные о принятии им того или иного проектного решения. На следующем этапе планируется написание программы на языке Си++ и разработка структуры базы данных расчетного модуля для каждого критерия стандарта.

### Библиографический список:

1. ГОСТ 31427-2010 Здания жилые и общественные. Состав показателей энергетической эффективности. - М.: ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ, 2012. – 12с.
2. СНиП 3.01.04-87. Приемка в эксплуатацию законченных строительством объектов. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
3. Техническая эксплуатация и ремонт зданий и сооружений: учеб. пособие / С. И. Рощина [и др.]; Владим. гос. унт. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 200 с.
4. Системы автоматизации проектирования в строительстве: учебное пособие/ Гинзбург А.В., Баранова О.М., Блохина Н.С., Волков А.А., Гаряев Н.А., Гинзбург В.М., Истомин Б.С., Каган П.Б., Китайцева Е.Х., Куликов В.Г., Синенко С.А.М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. 664 с.
5. М.Х. Кангезова, А.В. Гинзбург. Применение методов оценки состояния среды жизнедеятельности в строительной практике: breeam и leed, 2017, с. 33-35 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30598678>;
6. Г.А.Менделев. Транспорт в планировке городов: Учебное пособие /МАДИ(ГТУ). М., 2005 135 с.

7. Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A. Shilov L., Implementation of BIM-technologies in Russian Construction Industry According to the International Experience / Journal of Applied Engineering Science, Volume 14, Issue 4, 2016, Pages 457-460.
8. М.Х. Кангезова, Р.С. Петросян. "Зеленые" технологии: методы оценки состояния среды жизнедеятельности в строительстве, 2018, с.184-186. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579670>
9. М.Х. Кангезова, Р.С. Петросян. Зеленое строительство: система сертификации зданий по стандартам leed, 2018, с. 186-187. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671>
10. М.Х. Кангезова, Р.С. Петросян. Имитационное моделирование на основе синхронизации проектной информации и календарного плана, 2017, с. 236-239. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671>
11. A.V. Ginzburg, A.A. Volkov, O.M. Baranova. Construction maintenance automation. The manual. M., MSUCE, 2000.
12. Volkov A.A., Batov E.I. Sistemotekhnika funktsional'nogo modelirovaniya intellektual'nykh zdaniy [System Engineering of Functional Modeling of Intelligent Buildings]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 10, pp. 188—193. (In Russian).
13. Borovkov V.S., Volshansk V.V. Engineering systems of closed pumping water rotation and aeration with ecological reconstruction of the hydrosphere of urbanised territories. Water and Ecology: problems and solutions. 2016; 3(67):67-82. (rus.).
14. Бенуж, А.А. О роли «зелёного» строительства для устойчивого развития /А.А. Бенуж // Бюллетень Института устойчивого развития Общественной палаты РФ. №66, 2013.
15. Король Е.А., Шушунова Н.С. Повышение уровня экологической безопасности мегаполиса при строительстве «зеленых» зданий // Научное обозрение. 2014. № 7—1. С. 144–147.
16. В.И.Теличенко, А.А.Бенуж. Состояние и развитие системы технического регулирования в области зелёных технологий; 2016, с. 118-121.
17. Borkovskaya V.G. Environmental and economic model life cycle of buildings based on the concept of “Green Building”. Applied Mechanics and Materials. 2013; 467:287-290. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.467.287
18. Сертификация зданий по стандартам LEED и BREEAM в России, Режим доступа: [http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya\\_zdaniy\\_po\\_standartam\\_LEED\\_i\\_BREEAM\\_v\\_Rossii](http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya_zdaniy_po_standartam_LEED_i_BREEAM_v_Rossii)
19. Теличенко В.И. От экологического и “зеленого” строительства к экологической безопасности строительства. // Промышленное и гражданское строительство, №2, 2011, С. 47-51.
20. Korol E.A., Shushunova N.S. Increasing the level of environmental safety of a megalopolis during “green” buildings construction. Scientific Review. 2014

#### References:

1. GOST 31427-2010 Zdaniya zhilyye i obshchestvennyye. Sostav pokazateley energeticheskoy effektivnosti. - М.: FGUP STANDARTINFORM, 2012. – 12s. [GOST 31427-2010 Residential and public buildings. The composition of energy efficiency indicators. - М.: FSUE STANDARTINFORM, 2012. - 12s. (In Russ)]
2. SNiP 3.01.04-87. Priyemka v ekspluatatsiyu zakonchennykh stroitel'stvom ob'yektov. Osnovnyye polo-zheniya. – М.: Izd-vo standartov, 1987 [SNiP 3.01.04-87. Acceptance of the completed construction projects. The main provisions. - М.: Publishing house of standards, 1987. (In Russ)]
3. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya i remont zdaniy i sooruzheniy: ucheb. posobiye / S. I. Roshchina [i dr.]; Vladim. gos. unt. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 200 s. [Technical operation and repair of buildings and structures: studies. manual / S. I. Roshchina [et al.]; We hold. state unt - Vladimir: Publishing house Vladim. state University, 2009. - 200 p. (In Russ)]
4. Sistemy avtomatizatsii proyektirovaniya v stroitel'stve: uchebnoye posobiye/ Ginzburg A.V., Baranova O.M., Blokhina N.S., Volkov A.A., Garyayev N.A., Ginzburg V.M., Istomin B.S., Kagan P.B., Kitay-tseva Ye.KH., Kulikov V.G., Sinenko S.A.—М.: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, EBS ASV, 2014. — 664 с. [Design automation systems in construction: study guide / AV Ginzburg, OM Baranova, NS Blokhina, AA Volkov, NA Garyayev, VM Ginzburg, B. Istomin S., Kagan P. B., Kitaytseva E. Kh., Kulikov V. G., Sinenko S. A. M.: Moscow State University of Civil Engineering, EBS DIA, 2014. - 664 p. (In Russ)]
5. М.Х. Кангезова, А.В. Гинзбург. Применения методов оценки состояния среды жизнедеятельности в строительной практике: breeam и leed, 2017, с. 33-35 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30598678>; [M.Kh. Kangezova, A.V. Ginzburg. Application of methods for assessing the state of the living environment in construction practice: breeam and leed, 2017, p. 33-35 Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30598678>; (In Russ)]
6. G.A.Mendelev. Transport v planirovke gorodov: Uchebnoye posobiye /MADI(GTU). М., 2005 135 с. [G.A.Mendelev. Transport in city planning: Tutorial / MADI (STU). М., 2005 135 p. (In Russ)]
7. Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A. Shilova L., Volume 14, Issue 4, 2016, Pages 457-460 .
8. М.Х. Кангезова, Р.С. Петросян. "Зеленые" технологии: методы оценки состояния среды жизнедеятельности в строительстве, 2018, с.184-186. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579670> [M.Kh.

- Kangezov, R.S. Petrosyan. "Green" technology: methods for assessing the state of the living environment in construction, 2018, pp.184-186. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579670>(In Russ)]
9. M.Kh. Kangezova, R.S. Petrosyan. Zelenoye stroitel'stvo: sistema sertifikatsii zdaniy po standartam leed, 2018, s. 186-187. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671> [M.Kh. Kangezov, R.S. Petrosyan. Green building: building certification system according to leed standards, 2018, p. 186-187. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671>(In Russ)]
  10. M.Kh. Kangezova, R.S. Petrosyan. Imitatsionnoye modelirovaniye na osnove sinkhronizatsii proyektnoy informatsii i kalendar'nogo plana, 2017, s. 236-239. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671> [M.H. Kangezov, R.S. Petrosyan. Simulation based on the synchronization of project information and calendar plan, 2017, p. 236-239. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32579671>(In Russ)]
  11. A.V. Ginzburg, A.A. Volkov, O.M. Baranova. Construction maintenance automation. The manual. M., MSUCE, 2000.
  12. Volkov A.A., Batov E.I. Sistemotekhnika funktsional'nogo modelirovaniya intellektual'nykh zdaniy [System Engineering of Intelligent Buildings]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 10, pp. 188–193. (In Russian).
  13. Borovkov V.S., Volshanik V.V. Engineering systems for the urbanized territories. Water and Ecology: problems and solutions. 2016; 3 (67): 67-82. (rus.).
  14. Benuzh, A.A. O roli «zelenogo» stroitel'stva dlya ustoychivogo razvitiya /A.A. Benuzh // Byulleten' Instituta ustoychivogo razvitiya Obshchestvennoy palaty RF. №66, 2013. [Benozh, A.A. On the role of "green" construction for sustainable development / A.A. Benozh // Bulletin of the Institute for Sustainable Development of the Public Chamber of the Russian Federation. №66, 2013. (In Russ)]
  15. Korol' Ye.A., Shushunova N.S. Povysheniye urovnya ekologicheskoy bezopasnosti megapolisa pri stroitel'stve «zelenykh» zdaniy // Nauchnoye obozreniye. 2014. № 7—1. S. 144–147. [Korol' Ye.A., Shushunova N.S. Increasing the level of ecological safety of the megalopolis during the construction of "green" buildings // Scientific Review. 2014. № 7—1. pp. 144–147. (In Russ)]
  16. V.I.Telichenko, A.A.Benuzh. Sostoyaniye i razvitiye sistemy tekhnicheskogo regulirovaniya v oblasti zelonykh tekhnologiy; 2016, s. 118-121. [V.I.Telichenko, A.A.Benuzh. The state and development of the technical regulation system in the field of green technologies; 2016, p. 118-121. (In Russ)]
  17. Borkovskaya V.G. Environmental and economic model of life cycle of buildings based on the concept of "Green Building". Applied Mechanics and Materials. 2013; 467: 287-290. DOI: 10.4028 / [www.scientific.net/amm.467.287](http://www.scientific.net/amm.467.287)
  18. Sertifikatsiya zdaniy po standartam LEED i BREEAM v Rossii, Rezhim dostupa: [http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya\\_zdaniy\\_po\\_standartam\\_LEED\\_i\\_BREEAM\\_v\\_Rossii](http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya_zdaniy_po_standartam_LEED_i_BREEAM_v_Rossii) [Building certification according to LEED and BREEAM standards in Russia, Access mode: [http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya\\_zdaniy\\_po\\_standartam\\_LEED\\_i\\_BREEAM\\_v\\_Rossii](http://zvt.abok.ru/articles/79/Sertifikatsiya_zdaniy_po_standartam_LEED_i_BREEAM_v_Rossii)(In Russ)]
  19. Telichenko V.I. Ot ekologicheskogo i "zelenogo" stroitel'stva k ekologicheskoy bezopasnosti stroitel'stva. // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo, №2, 2011, С. 47-51. [Telichenko V.I. From ecological and "green" construction to ecological safety of construction. // Industrial and civil construction, №2, 2011, С. 47-51. (In Russ)]
  20. Korol' E.A., Shushunova N.S. Megalopolis during "green" buildings construction. Scientific Review. 2014.

**Сведения об авторах:**

**Жеругов Ратмир Арсенович** – бакалавр.

**Кангезова Марьянна Хадисовна** – магистрант.

**Лapidус Азарий Абрамович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и организация строительного производства».

**Information about the authors:**

**Zherugov Ratmir Arsenovich** - Bachelor.

**Kangezova Marianna Hadisovna** - Master student

**Lapidus Azary Abramovich** - Dr.Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of «Technologic and the organization of construction production»

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.12.2018.

Принята в печать 01.02.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.12.2018.

Accepted for publication 01.02.2019.

**Для цитирования:** Попов А.Л. Универсальные информационные блоки в составе системы управления базами данных оперативной дежурной смены центра управления в кризисных ситуациях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(1): 142-151. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-142-151

**For citation:** Popov A.L. Universal information blocks as part of the database management system of the operational duty shift of the Control center in crisis situations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 142-151. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-142-151

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 614.8.013/ 05.13.10

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-142-151

### УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ БЛОКИ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ ОПЕРАТИВНОЙ ДЕЖУРНОЙ СМЕНЫ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ В КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЯХ

**Попов А.Л.**

Государственное казенное учреждение города Москвы «Пожарно-спасательный центр»,  
123458, г. Москва, проспект Маршала Жукова, 79 Россия,  
e-mail: pal\_300353@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка комплекса взаимосвязанных информационных блоков для формирования, последующей обработки и применения данных в процессе подготовки отчетных и функциональных документов. **Метод.** Выбор регулярно применяемых шаблонов в качестве основы для разработки информационных блоков. На основании структуры и форм выбранных шаблонов разработаны программные модули интерфейсов информационных блоков. **Результат.** По результатам выявления и анализа проблемных вопросов в деятельности оперативной дежурной смены для автоматизации и интеллектуализации деятельности специалистов предложена идея разработки и применения универсальных информационных блоков в составе системы управления базами данных автоматизированных рабочих мест. Интерфейсы информационных блоков включены в состав каждого автоматизированного рабочего места и обеспечивают процессы: ввода, изменения, поиска и фильтрации данных; предварительного просмотра, печати и сохранения документов. В разработке алгоритмов применены оригинальные программные решения: объединения данных подготовленных несколькими специалистами, генерации реквизитов документов, передачи информации между разными автоматизированными рабочими местами, контроля времени готовности документов, доступа к необходимой справочной информации. **Вывод.** Внедрение разработанных информационных блоков: «График дежурств ОДС», «Реквизиты», «Журнал несения дежурства», «Контроль», «Справочник» в состав комплекса автоматизированных рабочих мест оперативной дежурной смены в Центре управления в кризисных ситуациях позволяет в результате автоматизации отказаться от ручного заполнения текстовых шаблонов и, как следствие, снизить трудоемкость, увеличить ресурс и улучшить качество подготовки оперативных отчетных документов при возникновении происшествий, чрезвычайных ситуаций, пожаров и функциональных документов в режиме повседневной деятельности в соответствии с регламентными, должностными и функциональными обязанностями специалистов.

**Ключевые слова:** автоматизированное рабочее место, антикризисное управление, интеллектуальная поддержка, подготовка документов, кризисная ситуация, отчетный документ, текстовый шаблон, управление рисками, функциональный документ, чрезвычайная ситуация

## UNIVERSAL INFORMATION BLOCKS AS PART OF THE DATABASE MANAGEMENT SYSTEM OF THE OPERATIONAL DUTY SHIFT OF THE CONTROL CENTER IN CRISIS SITUATIONS

**Alexander L. Popov**

State Public Institution of the city of Moscow «Fire and Rescue Center»,

79 Marshal Zhukov Ave, Moscow 123458, Russia,

e-mail: pal\_300353@mail.ru

**Abstract Objectives.** The aim of the study is to develop a set of interconnected information blocks for the formation, subsequent processing and application of data in the preparation of reporting and functional documents. **Method.** The choice of regularly used templates as a basis for the development of information blocks. Based on the structure and forms of the selected templates, software modules for information block interfaces have been developed. **Result.** Based on the results of identifying and analyzing problematic issues in the activities of the operational duty shift for the automation and intellectualization of the activities of specialists, the idea of developing and using universal information blocks as part of a database management system for automated workplaces was proposed. Interfaces of information blocks are included in the composition of each workstation and provide for the processes of: entering, changing, searching and filtering data; Previewing, printing and saving documents. In the development of algorithms, original software solutions were applied: combining data prepared by several specialists, generating document details, transferring information between different workstations, monitoring the availability of documents, accessing the necessary reference information. **Conclusion.** The introduction of the developed information blocks: “Schedule of SLM duty”, “Requisites”, “Journal of Carriage of Duty”, “Control”, “Reference book” into the complex of automated workplaces of operational duty shift in the Crisis Management Center allows you to refuse as a result of automation from manual filling of text templates and, as a result, reduce labor intensity, increase resource and improve the quality of preparation of operational reporting documents in the event of accidents, emergencies, fires and functions national documents in the mode of daily activities in accordance with the regulatory, job and functional duties of specialists.

**Keywords:** workstation, crisis management, intellectual support, document preparation, crisis situation, reporting document, text template, risk management, functional document, emergency situation

**Введение.** Детальное изучение научных работ посвящённые моделям и алгоритмам обеспечения антикризисного управления с участием должностных лиц (специалистов) Центра управления в кризисных ситуациях (ЦУКС) МЧС России позволяет реализовать поэтапный процесс перехода к интеллектуальной поддержке деятельности специалистов оперативной дежурной смены (ОДС) регионального ЦУКС с точки зрения идентификации, оценки и управления рисками автоматизированного процесса подготовки документов для Национального Центра управления в кризисных ситуациях (НЦУКС).

В основу формирования этой точки зрения положены «Методики оценки рисков чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций» [1]. Этапы данного процесса представлены на рис. 1 [2].

**Постановка задачи.** Целью исследования является разработка комплекса взаимосвязанных информационных блоков для формирования, последующей обработки и применения данных в процессе подготовки отчетных и функциональных документов.

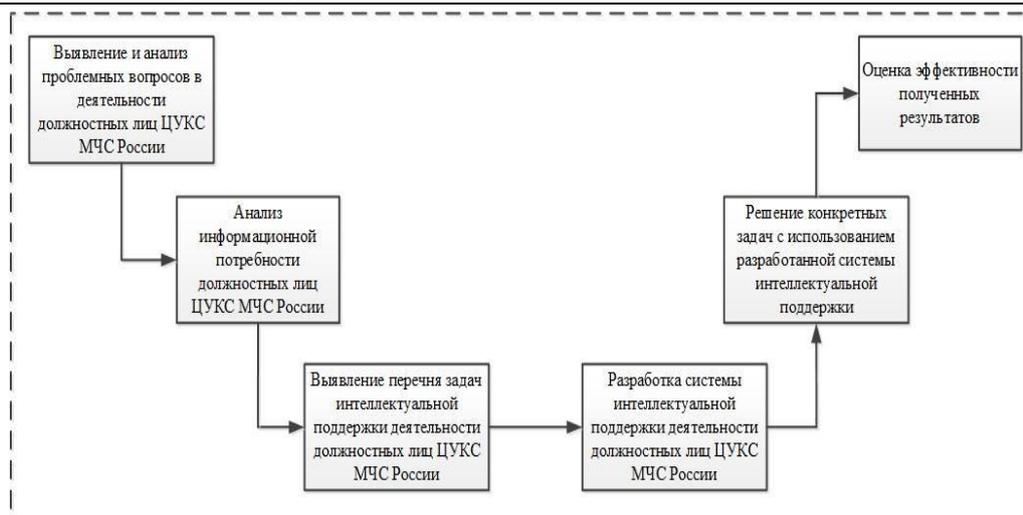


Рис. 1. Этапы перехода к интеллектуальной поддержке

Fig. 1. Stages of transition to intellectual support

**Методы исследования. Выявление и анализ проблемных вопросов.**

На первом этапе определена зависимость эффективности работы ОДС от результатов выявления и анализа проблемных вопросов [3] и зависимых рисков на основании планируемых и фактических показателей регламентированной деятельности специалистов ОДС регионального ЦУКС [4] в части представления донесений (докладов) в НЦУКС) МЧС России представленных в табл. 1.

Табл. 1. Основные планируемые и фактические показатели регламентированной деятельности специалистов ОДС ЦУКС

Tab. 1. The main planned and actual indicators of the regulated activities of SLM CUKS specialists

Вид деятельности	Регламент	Специалист подразделения ОДС	Количество документов	Затраты времени (мин.)	Трудоемкость (мин./док.)	% загрузки за сутки
При возникновении ЧС (происшествия)	Представление в НЦУКС донесений (докладов) по реагированию на ЧС (происшествие)	В среднем на одного специалиста	3	122	54	8,47%
<b>Реагирование и ликвидация в сутки ЧС (происшествий) =</b>			<b>9</b>	<b>за</b>	<b>19,2</b>	<b>часов</b>
При возникновении пожара	Представление в НЦУКС донесений (докладов) по пожарам	В среднем на одного специалиста	2	107	53	7,45%
<b>Реагирование в сутки при возникновении пожаров =</b>			<b>11</b>	<b>за</b>	<b>19,2</b>	<b>часов</b>
Ежедневные донесения	Представление в НЦУКС ежедневных донесений (докладов)	В среднем на одного специалиста	5	287	60	19,91%
<b>Ежедневные донесения в сутки подготовка</b>				<b>за</b>	<b>4,8</b>	<b>часа</b>

Исходя из представленных планируемых и фактических показателей сделан вывод, что реально один специалист ОДС в течение суточного дежурства может подготовить донесения (отчетные документы) в процессе реагирования на 9 ЧС (происшествий) или на 11 пожаров (для большего количества его ресурса уже недостаточно) при среднем количестве регистрируемых в сутки событий (происшествий и пожаров) равном 218-ти.

В совокупности донесения (доклады) представляемые ОДС ЦУКС в НЦУКС в процессе реагирования на ЧС (происшествия), пожары и в повседневной деятельности имеют важное значение для эффективного решения оперативных задач с учетом свойств, распределенных по функциям управления (рис. 2) [5].

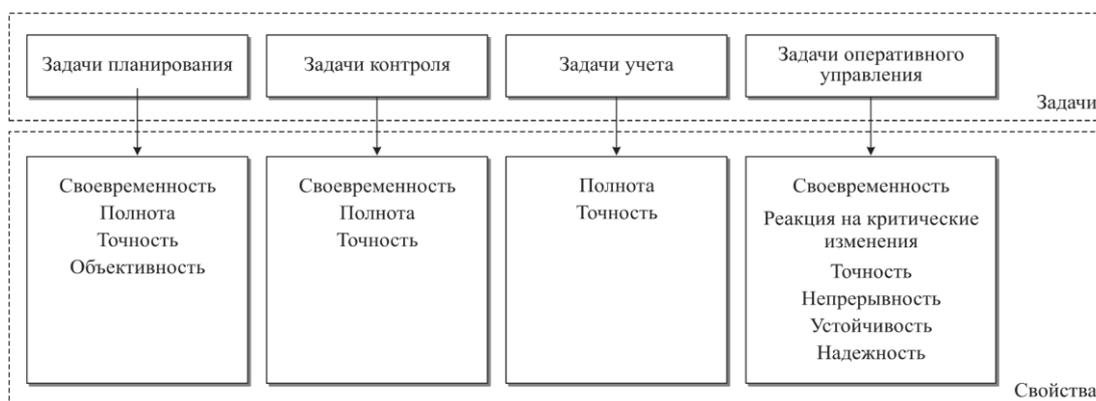


Рис. 2. Совокупность свойств для задач, распределенных по функциям управления

Fig. 2. A set of properties for tasks distributed over control functions

Донесения являются основными информационными документами, определяющими основные этапы анализа риска ЧС и непосредственно влияют на выявление и анализ опасностей ЧС. На основе информации в донесениях разрабатываются рекомендации и меры по предупреждению, локализации и ликвидации ЧС [6]. Таким образом достоверность и актуальность информации в донесениях, предоставляемых ОДС регионального ЦУКС в НЦУКС непосредственно влияют на идентификацию, оценку и управление рисками в процессе реагирования на ЧС (происшествия), пожары.

#### Анализ информационной потребности

На втором этапе, по результатам выявления и анализа проблемных вопросов, определена информационная потребность специалистов ОДС [7] для увеличения возможности реагирования на большее число ЧС (происшествий) или пожаров. На этом этапе проанализированы ниже следующие проблемные вопросы, решение которых влияют на снижение трудоемкости в процессе подготовки документов специалистами.

Для организации процесса руководителями подразделений ОДС ежемесячно в текстовом шаблоне формируются «графики дежурства» специалистов на следующий месяц, которые необходимо объединять в общий «график дежурства ОДС». Такая операция может многократно повторяться при внесении необходимых изменений в «графики дежурства».

В отчетных документах обязательно присутствуют однообразные реквизиты руководителя и ответственного исполнителя (Фамилия Имя Отчество, должность, звание, телефон для связи) соответствующие данным «графика дежурства ОДС». Эти данные специалист указывает в текстовом шаблоне каждого отчетного документа после сверки с изменениями в «графике дежурства ОДС».

В течение суточного дежурства специалист обязан периодически затрачивать время на ручное заполнение оперативной информацией «Журнала несения дежурства» в течение месяца по шаблону. В данном шаблоне также необходимо указывать ежесуточные реквизиты руководителя и ответственного исполнителя. Необходимая актуальная информация не может быть автоматически обработана для последующего анализа, контроля, применения и вручную дублируется на последующие сутки.

Непосредственный руководитель исполнителя обязан своевременно выполнять контроль отчетных документов, а именно время готовности по регламенту, соответствие шаблону и необходимому содержанию. При этом ему необходимо выполнить поиск и доступ к документу в файловой структуре.

Процесс подготовки специалистом документа, как правило, требует многократного поиска и обращения к различной оперативной и справочной информации, распределенной в базах данных, информационных системах, справочниках на нескольких информационных серверах.

Перечисленные результаты анализа вызывают проблемные вопросы, которые увеличивают временные затраты и трудоемкость процесса и, как следствие, снижают эффективность и качество деятельности специалистов ОДС. Указанные, проблемные вопросы, к сожалению, не могут быть решены посредством действующей в региональном ЦУКС МЧС России автоматизированной системы оперативного реагирования, т.к. функции такой системы не поддерживают процессы подготовки документов специалистами ОДС.

#### **Выявление перечня задач**

На третьем этапе по методике [8] выявлены основные задачи интеллектуальной поддержки:

- оптимизация подготовки и контроля документов на действующих АРМ, в том числе: исключение повторного использования одинаковых данных и их интерпретаций в различных документах, снижение ручной обработки данных, соблюдение временных регламентов готовности и предоставления актуальных и достоверных документов руководству;
- автоматизация подготовки и контроля документов на основании методики оценки рисков ЧС, рекомендаций и образцов отчетных и функциональных документов, отказ от дублирования и последующего редактирования ранее подготовленных однотипных документов.

#### **Разработка системы интеллектуальной поддержки**

На четвертом этапе реализована идея разработки и применения универсальных информационных блоков в составе системы управления базами данных (СУБД) автоматизированных рабочих мест (АРМ) специалистов ОДС с целью снижения риска принятия ими необоснованных решений в условиях ЧС природного и техногенного характера.

Данная СУБД позволяет хранить в архивах БД информацию о составе ОДС, готовить данные для отчетных документов и реализовывать схему автоматизированного документооборота. АРМ в составе СУБД позволяет оптимизировать документооборот, исключить ошибки и повысить производительность труда персонала ЦУКС МЧС России [9]. Такая система интеллектуальной поддержки предназначена для оказания помощи должностному лицу в выполнении своих функциональных обязанностей и решении задач в повседневной деятельности и в режиме чрезвычайной ситуации (ЧС) [10].

Разработаны оригинальные алгоритмы следующих процессов: объединения данных подготовленных в различных информационных блоках, автоматического формирования реквизитов, автозагрузки актуальных данных, передачи данных между однотипными информационными блоками, контроля содержания и времени готовности документов, доступа пользователя АРМ к различным информационным справочникам.

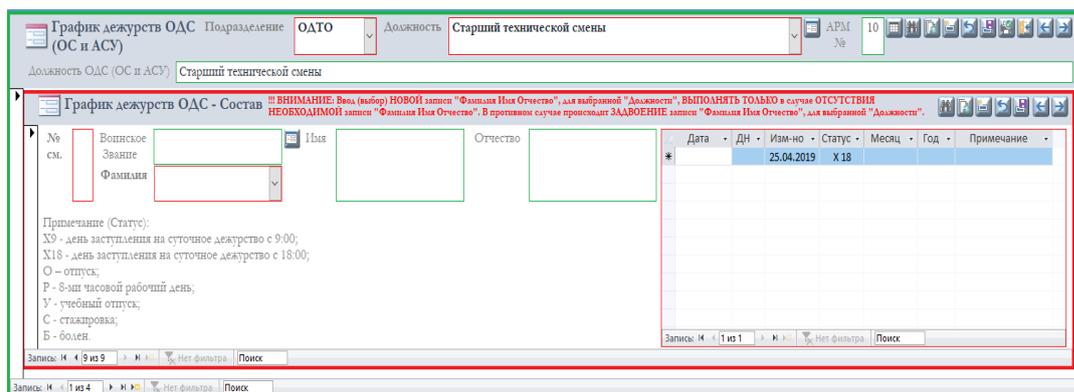
В качестве прототипов информационных блоков выбраны регулярно применяемые шаблоны: «График дежурств ОДС», «Реквизиты», «Журнал несения дежурства», «Контроль», «Справочник», предназначенные для многократного отображения однообразной информации. На основе структуры и форм выбранных шаблонов спроектированы и включены в состав каждого АРМ специалиста программные модули интерфейсов информационных блоков.

#### **Решение конкретных задач**

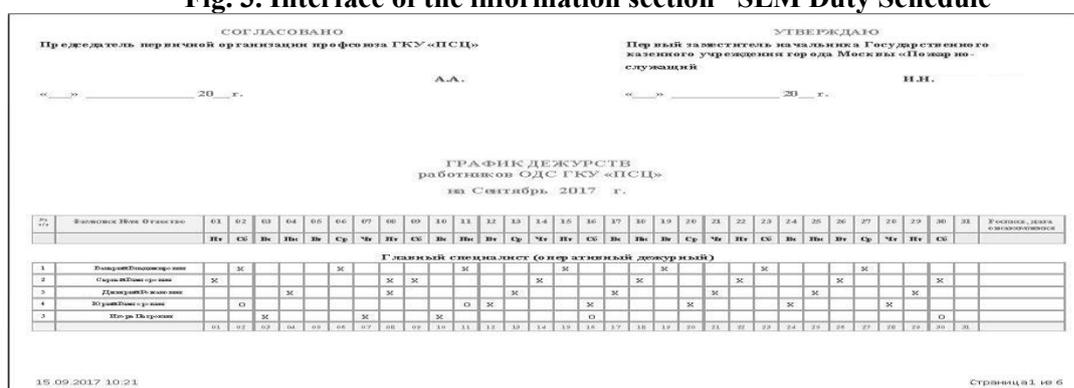
На пятом этапе решены конкретные задачи с использованием программных модулей интерфейсов информационных блоков в составе АРМ специалиста. В каждом интерфейсе поддерживаются процессы: ввода, изменения, поиска и фильтрации данных; предварительного просмотра, печати и сохранения документов в формате структуры и форм выбранных шаблонов.

**Обсуждение результатов.** Интерфейс информационного блока «График дежурств ОДС» (рис. 3) может быть настроен для любого специалиста или группы специалистов для оперативной подготовки графика дежурств на следующий месяц и внесения необходимых изменений.

Формирование общего графика дежурств для всего состава ОДС (рис. 4) выполняется посредством автоматического объединения данных.

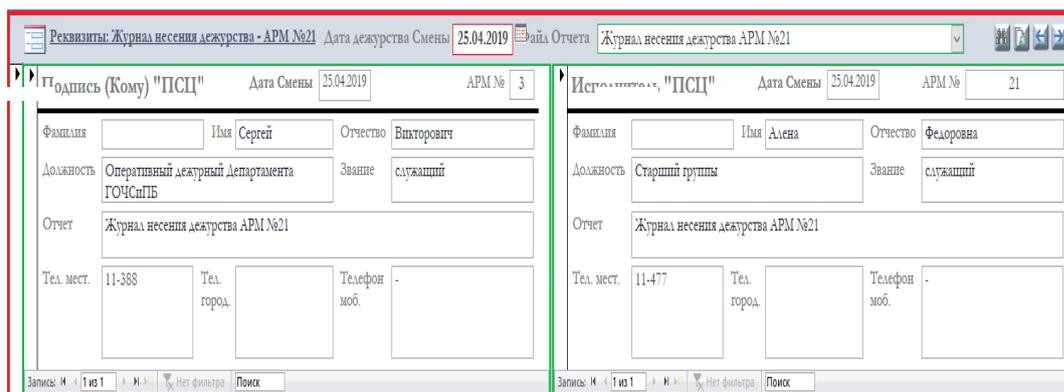


**Рис. 3. Интерфейс информационного блока «График дежурств ОДС»**  
**Fig. 3. Interface of the information section “SLM Duty Schedule”**



**Рис. 4. Отчет «График дежурств ОДС» (фрагмент)**  
**Fig. 4. The report “The schedule of duty SLM” (fragment)**

Использование информационного блока «Реквизиты» (рис. 5) является неотъемлемой частью процесса подготовки любого документа, в котором необходимо отобразить реквизиты руководителя и ответственного исполнителя. Формирование и отображение реквизитов не требует участия специалиста и выполняется автоматически на основании данных сформированного «Графика дежурств ОДС».



**Рис. 5. Информационный блок «Реквизиты»**  
**Fig. 5. Information block "Requisites"**

Интерфейс информационного блока «Журнал несения дежурства» в составе АРМ специалиста соответствует принятому шаблону (рис. 6) и предназначен для обязательного ввода оперативной информации, сопровождающей деятельность специалиста в течение суточного дежурства. Записи, отображаемые в интерфейсе доступны для контроля на АРМ вышестоящего руководителя. Данный информационный блок поддерживает решение задачи ежесуточной пе-

редачи записей и информационной взаимосвязи различных АРМ, а именно обеспечивает загрузку актуальных записей прошедших суток в состав записей текущих суток и передачу, выбранных записей между АРМ специалиста и АРМ непосредственного руководителя.

Раздел	ПодРаздел	Дата и Время Записи	Актуально до	№ п.п.	Несение дежурства	Для Специалистов ОДС
1. На контроле:	Выполнение!!!	21.03.2019 10:56:46	21.03.2019	1	Тест	Начальник ОДС ЦУКС
3. Общая информация (Указания, документы, организационные мероприятия, состояние работы технических и программных средств):	Контроль:	20.11.2017 12:52:32	21.03.2019		Старший Аналитик (АРМ №7): ТЕСТ	
3. Общая информация (Указания, документы, организационные мероприятия, состояние работы технических и программных средств):	Контроль:	20.11.2017 11:14:12	21.03.2019		Специалист по учету сил и контролю за обстановкой с пожарами (АРМ №6): ТЕСТ	
3. Общая информация (Указания, документы, организационные мероприятия, состояние работы технических и программных средств):	Контроль:	20.11.2017 10:23:19	21.03.2019		Специалист по ГИС технологиям (АРМ №8): ТЕСТ	
3. Общая информация (Указания, документы, организационные мероприятия, состояние работы технических и программных средств):	Выполнение!!!	20.11.2017 12:18:38	21.03.2019		Начальник оперативной дежурной смены (АРМ №2): ТЕСТ	

**Рис. 6. Интерфейс информационного блока «Журнал несения дежурства»**  
**Fig. 6. Interface of information block “Duty log”**

Интерфейс информационного блока «Контроль» (рис. 7) в составе АРМ руководителя и АРМ подчиненного сотрудника обеспечивает фиксирование и обязательный контроль времени готовности документа по регламенту, а также контроль соответствия документа шаблону и требуемому содержанию. Специалист на момент готовности документа проставляет в форме интерфейса метку «Выполнено», которая инициирует автоматическое фиксирование времени готовности документа и отображение контрольных временных параметров. В данном информационном блоке предусмотрена ссылка на «Файл Отчета» для непосредственного доступа руководителя к готовому документу исполнителя.

Контроль: Журнал несения дежурства АРМ №1  Выполнено

АРМ № 1 | Должность ОДС Старший оперативный дежурный | Статус Ситуации Ежедневно | По Регламенту | ± 18:30 ч | Прошло

Отчет Журнал несения дежурства АРМ №1 | Контрольное время 18:00 | Осталось 12:51

Дата Текущая 22.03.2019 | Время Текущее 14:08 | Дата Смены 21.03.2019 | Время Нач. Смены 18:00 | Длительность 9:00 | Выполнено в 14:22

Файл Отчета [\\10.25.26\kpr\en\document\rsc\02 ОПЕРАТИВНАЯ ДЕЖУРНАЯ СЛУЖБА\ПАПКА ОПЕРАТИВНОГО ДЕЖУРНОГО\01 Книга протоколов дежурства и рабочих тетрадей \(АРМ №1\)](#) | Дата Выполнено 22.03.2019 | Время Затрачено | Просрочено на

**Рис. 7. Интерфейс информационного блока «Контроль»**  
**Fig. 7. Interface of the information unit “Control”**

Интерфейс информационного блока «Справочник» (рис. 8) предназначен для обеспечения многократного непосредственного доступа к различной оперативной и справочной информации в базах данных, информационных системах и справочниках, распределенных на нескольких информационных серверах.

Регион	АО	Район	Улицы	Дом	Корпус	Строение	Отряд	Район выезда ПСО	Район выезда ПЧ	Подрайон выезда ПЧ
г. Москва	-	-	-	-	-	-	АСО № 2	-	-	-
г. Москва	-	-	А-107	-	-	-	ПСО № 204	ПСО № 304 (Десеновское)	-	42 ПЧ
г. Москва	-	-	б-р. Химкинский	6	-	-	АСО № 9	АСО № 9 (Северное Тушино)	-	39 ПЧ
г. Москва	-	-	Варшавское шоссе, 21-й километр	23	-	-	ГБУ Автодорож- Юг	ПСО № 215 (МКАД внут 20-24 Орехово Борисово Юж)	-	123 ПЧ
г. Москва	-	-	Волго	53	-	-	ПСО №209 (А 209)	-	-	-
г. Москва	-	-	д. Анудиново	-	-	-	ПСО № 206	ПСО № 206 (Внуково)	-	ПСО № 206
г. Москва	-	-	д. валуево	13	-	-	Мосгаз	ПСО № 206 (Внуково)	-	ПСО № 303
г. Москва	-	-	д. Изварино	-	-	-	ПСО № 206	ПСО № 206 (Внуково)	-	ПСО № 206
г. Москва	-	-	км. МКАД 71-й	0	0	0	АСО № 9	АСО № 1 (Беговой)	-	35 ПЧ
г. Москва	-	-	км. Новорязское шоссе	-	-	-	ПСО № 204	ПСО № 204 (Строгино)	-	38 ПЧ
г. Москва	-	-	ис	-	-	-	ПСО № 211	ПСО № 211 (Волжино-Жулебино)	-	64 ПЧ

**Рис. 8. Интерфейс информационного блока «Справочник»**  
**Fig. 8. Interface information block "Reference"**

**Оценка эффективности.** На шестом этапе выполнена оценка эффективности полученных результатов. В процессе оценки отмечается оригинальность программных решений (примененных в информационных блоках), которые непосредственно влияют на эффективность деятельности специалистов ОДС при выполнении задач планирования, контроля, учета и оперативного управления в процессе подготовки документов.

Исходя из представленных в табл. 2 показателей сделан вывод, что в результате снижения трудоемкости примерно на 50% реально специалист подразделения ОДС ЦУКС в течение суточного дежурства увеличил собственный ресурс и улучшил качество подготовки документов в процессе реагирования на регистрируемые события: с 9 до 21 ЧС (происшествия) или с 11 до 24 пожаров.

**Таблица 2. Улучшение плановых и фактических показателей процесса подготовки документов специалистами ОДС**

**Table 2. Improvement of planned and actual indicators of the process of preparing documents by SLM specialists**

Показатели после внедрения универсальных информационных блоков						
Вид деятельности	Регламент	Специалист ОДС	Количество документов	Затраты времени (мин.)	Трудоемкость (мин./док.)	Уровень загрузки за сутки (%)
При возникновении ЧС (происшествия)	Представление в НЦУКС донесений (докладов) по реагированию на ЧС (происшествие)	В среднем на одного специалиста	3	61	24	4,24%
<b>Реагирование и ликвидация в сутки ЧС (происшествий) =</b>			<b>21</b>	<b>за</b>	<b>21,6</b>	<b>часов</b>
При возникновении пожара	Представление в НЦУКС донесений (докладов) по пожарам	В среднем на одного специалиста	2	54	32	3,72%
<b>Реагирование в сутки при возникновении пожаров =</b>			<b>24</b>	<b>за</b>	<b>21,6</b>	<b>часов</b>
Ежедневные донесения	Представление в НЦУКС ежедневных донесений (докладов)	В среднем на одного специалиста	5	143	30	9,95%
<b>Ежедневные донесения в сутки подготовка</b>				<b>за</b>	<b>2,4</b>	<b>часа</b>

Программные решения, примененные в информационных блоках, позволяют объединять данные подготовленные несколькими специалистами, выполнять автоматическую генерацию реквизитов документов, передавать информацию между разными АРМ, фиксировать и контролировать время готовности документов, обеспечивать непосредственный доступ к необходимым документам и к справочной информации.

Интеллектуальная поддержка деятельности специалистов подразделений ОДС регионального ЦУКС, реализованная в результате внедрения в состав комплекса АРМ ОДС в ЦУКС информационных блоков: «График дежурств ОДС», «Реквизиты», «Журнал несения дежурства», «Контроль», «Справочник» позволила отказаться от ручного заполнения текстовых шаблонов и использовать автоматическую обработку информации для последующего анализа, контроля и применения отчетных документов при возникновении происшествий, ЧС, пожаров и функциональных документов в режиме повседневной деятельности в соответствии с регламентными, должностными и функциональными обязанностями специалистов.

**Вывод.** В результате внедрения предлагаемых универсальных информационных блоков в качестве интеллектуальной поддержки деятельности специалистов подразделений ОДС регионального ЦУКС уменьшились затраты времени на одного специалиста ОДС и существенно улучшились показатели процесса подготовки документов специалистами ОДС.

#### **Библиографический список:**

1. Акимов В.А. и др. Методики оценки рисков чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций // Проблемы анализа риска. - 2007. - т. 4, № 4. - С. 368-377.
2. Антюхов В.И., Остудин Н. В. Алгоритмизация деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Технологии техносферной безопасности. 2017. - № 2 (42). С. 10-15.
3. Антюхов В. И., Остудин Н. В. Методика выявления и анализа проблемных вопросов в деятельности должностных лиц ЦУКС МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. - № 1. С. 97-106.
4. Попов П. А. Наставление по организации деятельности центров управления в кризисных ситуациях МЧС России. - НЦУКС МЧС России, М., 2012. - 238 с.
5. Онов В. А., Остудин Н. В., Сафонов Д. П., Иванов А. Ю. Модель информационной поддержки принятия решения при оценке деятельности сотрудников МЧС России // Пожаровзрывобезопасность. 2017. - т. 26, № 2. С. 5-13.
6. Сосунов И. В. Нормативная и методологическая база анализа риска ЧС: реальность и перспективы // Технологии гражданской безопасности. 2010. - т. 7, № 3 (25). С. 52 – 57.
7. Остудин Н. В. Модели и алгоритмы информационно-аналитической поддержки антикризисного управления: автореф. дис. канд. техн. наук. - СПб УГПС МЧС России, 2018. - 24 с.
8. Антюхов В. И., Остудин Н. В., Сорока А. В. Методика выявления перечня задач интеллектуальной поддержки деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. - № 4. С. 63-76.
9. Ражников С. В., Попов А. Л., Бутузов С. Ю. А.с. 2018621459 РФ. База данных автоматизированного рабочего места «Комплексной системы экстренного оповещения населения» «Комплексной информационной системы мониторинга и управления силами и средствами МЧС г. Москвы» / № 2018621203; заявл. 27.08.2018; опубл. 06.09.2018, ФИПС, 1 с.
10. Антюхов В. И., Остудин Н. В. Моделирование процесса интеллектуальной поддержки деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2017. № 2. С. 78-94.

#### **References:**

1. Akimov V.A. i dr. Metodiki otsenki riskov chrezvychaynykh situatsiy i normativy priyemlemogo riska chrezvychaynykh situatsiy // Problemy analiza riska. - 2007. - t. 4, № 4. - С. 368-377. [Akimov V.A. i dr. Metodiki ochenki riskov chrezvychajnyh situacij i normativy priemlemogo riska chrezvychajnyh situacij [Methods of risk assessment of emergency situations and the norms of acceptable risk of emergency situations] // Problemy analiza riska. - 2007. - V 4, N 4. P. 368-377. (In Russ)]
2. Antyukhov V.I., Ostudin N. V. Algoritmizatsiya deyatel'nosti dolzhnostnykh lits tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2017. - № 2 (42). С. 10-15. [Antyukhov V.I., Ostudin N. V. Algorithmization of the activities of officials of control centers in crisis situations of EMERCOM of Russia [Algorithmization of the activities of officials of control centers in crisis situations of EMERCOM of Russia] // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2017. N 2 (42). pp. 10-15. (In Russ)]

3. Antyukhov V. I., Ostudin N. V. Metodika vyyavleniya i analiza problemnykh voprosov v deya-tel'nosti dolzhnostnykh lits TSUKS MCHS Rossii // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2016. - № 1. С. 97-106. [Antyuhov V. I., Ostudin N. V. Metodika vyyavleniya i analiza problemnykh voprosov v deyatel'nosti dolzhnostnykh lic CUKS MCHS Rossii [Methods of identification and analysis of problematic issues in the activities of officials of the EMERCOM of Russia] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. – 2016. - N 1. P. 97-106. (In Russ)]

4. Popov P. A. Nastavleniye po organizatsii deyatel'nosti tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii. - NTSUKS MCHS Rossii, M., 2012. - 238 s. [Popov P. A. Nastavlenie po organizatsii deyatel'nosti centrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii [Instruction on organization of activity of control centers in crisis situations of EMERCOM of Russia]. – M. NCUKS MCHS Rossii. 2012. 159 p. (In Russ)]

5. Onov V. A., Ostudin N. V., Safonov D. P., Ivanov A. YU. Model' informatsionnoy podderzhki prinyatiya resheniya pri otsenke deyatel'nosti sotrudnikov MCHS Rossii // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. - t. 26, № 2. С. 5-13. [Onov V. A., Ostudin N. V., Safonov D. P., Ivanov A. YU. Model' informatsionnoy podderzhki prinyatiya resheniya pri ocenke deyatel'nosti sotrudnikov MCHS Rossii [Model of information support of decision-making in the performance assessment of employees of EMERCOM of Russia] // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2017. - V 26, N 2. P. 5-13. (In Russ)]

6. Sosunov I. V. Normativnaya i metodologicheskaya baza analiza riska CHS: real'nost' i perspektivy // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. 2010. - t. [Sosunov I. V. Normativnaya i metodologicheskaya baza analiza riska CHS: real'nost' i perspektivy [Normative and methodological base of emergency risk analysis: reality and prospects]. // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. 2010. V 7, N 3 (25). P. 52 – 57. (In Russ)]

7. Ostudin N. V. Modeli i algoritmy informatsionno-analiticheskoy podderzhki antikrizisnogo upravleniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. - SPb UGPS MCHS Rossii, 2018. - 24 s. [Ostudin N. V. Modeli i algoritmy informatsionno-analiticheskoy podderzhki antikrizisnogo upravleniya. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Models and algorithms of information and analytical support of crisis management. Cand. tech. sci. autoref. diss.], SPb UGPS MCHS Rossii. 2018. 24 p. (In Russ)]

8. Antyukhov V. I., Ostudin N. V., Soroka A. V. Metodika vyyavleniya perechnya zadach intellektual'noy podderzhki deyatel'nosti dolzhnostnykh lits tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2016. - № 4. С. 63-76. [Antyuhov V. I., Ostudin N. V., Soroka A. V. Metodika vyyavleniya perechnya zadach intellektual'noy podderzhki deyatel'nosti dolzhnostnykh lic centrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii [the Method of identification of the list of tasks of intellectual support of activity of officials of control centers in crisis situations of EMERCOM of Russia]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2016. N 4. P. 63-76. (In Russ)]

9. Razhnikov S. V., Popov A. L., Butuzov S. YU. A.s. 2018621459 RF. Baza dannykh avtomatizirovannogo rabocheho mesta «Kompleksnoy sistemy ekstretnogo opoveshcheniya naseleniya» «Kompleksnoy informatsionnoy sistemy monitoringa i upravleniya silami i sredstvami MCHS g. Moskvy» / № 2018621203; za-yavl. 27.08.2018; opubl. 06.09.2018, FIPS, 1 с. [Razhnikov S. V., Popov A. L., S. Butuzov YU. A.s. 2018621459 Rossijskaya Federaciya. Baza dannykh avtomatizirovannogo rabocheho mesta «Kompleksnoy sistemy ehkstretnogo opoveshcheniya naseleniya» «Kompleksnoy informatsionnoy sistemy monitoringa i upravleniya silami i sredstvami MCHS g. Moskvy» [Database workstation «Integrated system of emergency public notification» «Integrated information system for monitoring and control of forces and means of EMERCOM of Moscow»], № 2018621459, opubl. 06.09.2018. FIPS. 1 p. (In Russ)]

10. Antyukhov V. I., Ostudin N. V. Modelirovaniye protsessa intellektual'noy podderzhki deya-tel'nosti dolzhnostnykh lits tsentrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2017. № 2. С. 78-94. [Antyuhov V. I., Ostudin N. V. Modelirovanie protsessa intellektual'noy podderzhki deyatel'nosti dolzhnostnykh lic centrov upravleniya v krizisnykh situatsiyakh MCHS Rossii [Modeling of the process of intellectual support of the officials of the control centers in crisis situations of EMERCOM of Russia]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2017. N 2. P. 78-94. (In Russ)]

#### **Сведения об авторе:**

**Попов Александр Леонидович** – главный специалист отдела технического обеспечения оперативной дежурной смены.

#### **Information about the authors.**

**Alexander L. Popov** – Chief specialist of the technical support department of the operational shift.

#### **Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.02.2019.

Received 15.10.2019.

Принята в печать 19.03.2019.

Accepted for publication 19.03.2019.

**Для цитирования:** Гайшун А.С., Гайшун Е.С., Ковалеристова Е.В., Явруян Х.С. Стеновые керамические материалы на основе техногенного сырья угольного ряда. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (1): 152-159. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-152-159

**For citation:** Gaishun A.S., Gaishun E.S., Kovaleristova E.V., Yavruyan Kh.S. Wall ceramic materials based on technogenic raw materials of coal series. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 152-159. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-152-159

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК: 691.42

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-152-159

### СТЕНОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ УГОЛЬНОГО РЯДА

*Гайшун А.С.<sup>4</sup>, Гайшун Е.С.<sup>2</sup>, Ковалеристова Е.В.<sup>3</sup>, Явруян Х.С.<sup>1</sup>*

<sup>1-4</sup> Донской государственный технический университет,

<sup>1-4</sup> 344002, Ростов -на-Дону, площадь Гагарина, 1, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: khungianos@mail.ru, <sup>2,4</sup> e-mail: subaru156@yandex.ru,

<sup>3</sup> e-mail: kovaleristova@mail.ru

**Резюме. Цель.** В работе рассматривается целесообразность применения техногенного сырья угольного ряда при изготовлении высокоэффективной стеновой керамики. Интерес к техногенному сырью угольного ряда (шлам, отсеv и кек), как к сырью, используемому при производстве керамических изделий в настоящее время сильно возрос. Причиной этому послужило сокращение базы качественного глиняного сырья, удорожание его использования при производстве стеновой керамики, большое количество скопившегося запасов различных пород техногенного сырья угольного ряда. **Метод.** В исследованиях использовался следующий состав сырьевой смеси: 70% техногенного сырья угольного ряда (отсеv) и 30% глинистого сырья. Определение физико-механических свойств образцов проводилось по ГОСТ 530-2012. Угольные отвалы представляют собой тонкозернистые продукты, в твердой части которых содержится значительное количество угля. **Результат.** Определены технологические параметры получения стеновых керамических изделий на основе угольных шламов. Изучены основные физико-технические характеристики полученных материалов. Изучены фазовые преобразования, протекающие при обжиге и закономерности формирования структуры черепка. Показана целесообразность производства высокоэффективных керамических изделий с пониженной теплопроводностью и плотностью на основе техногенного сырья угольного ряда с использованием технологии компрессионного формования. **Вывод.** Результаты теоретических исследований подтверждаются практическими данными, заключающимися в том, что в сырьевых смесях, содержащих техногенное сырье угольного ряда, резкое увеличение прочности, с учётом полного выгорания углерода, наступает при температурах 1000 -1060°C. Приведённые изменения в процессе производства изделий данным способом помогут достигнуть существенного энергосбережения газа и оптимизации режима обжига.

**Ключевые слова:** угольные шламы, керамические камни, компрессионное формование, прочность, плотность

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### WALL CERAMIC MATERIALS BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS OF COAL SERIES

Alexey S. Gaishun<sup>4</sup>, Eugene S. Gaishun<sup>2</sup>, Ekaterina V. Kovaleristova<sup>3</sup>, Khungianos S. Yavruyan<sup>1</sup>

<sup>1-4</sup>Don State Technical University,

<sup>1-4</sup>1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344002, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: khungianos@mail.ru, <sup>2,4</sup>e-mail: subaru156@yandex.ru,

<sup>3</sup>e-mail: kovaleristova@mail.ru

**Abstract Objectives.** The paper discusses the feasibility of using the technogenic raw materials of the coal series in the production of highly efficient wall ceramics. The interest in the man-made raw materials of the coal series (sludge, screenings and cake) as the raw materials used in the manufacture of ceramic products has now greatly increased. The reason for this was the reduction of the base of high-quality clay raw materials, the appreciation of its use in the production of wall ceramics, a large amount of accumulated reserves of various rocks of coal-based man-made raw materials. **Method.** The research used the following composition of the raw mix: 70% of technogenic raw materials of the coal series (screenings) and 30% of the clay raw materials. The determination of the physico-mechanical properties of the samples was carried out according to GOST 530-2012. Coal dumps are fine-grained products, the solid part of which contains a significant amount of coal. **Result.** The technological parameters of obtaining wall ceramic products based on coal slimes are determined. Studied the main physico-technical characteristics of the materials obtained. Phase transformations occurring during the burning and patterns of the formation of the structure of the shard were studied. The feasibility of the production of highly efficient ceramic products with low thermal conductivity and density based on technogenic raw materials of the coal series using the technology of compression molding is shown. **Conclusion.** The results of theoretical studies are confirmed by practical data, which consist in the fact that in raw mixtures containing technogenic raw materials of coal series, a sharp increase in strength, taking into account the complete burning of carbon, occurs at temperatures of 1000-1060 °C. The changes introduced during the production of products using this method will help achieve a significant energy saving of gas and optimization of the firing mode.

**Keywords:** coal slimes, ceramic stones, compression molding, strength, density

**Введение.** Развитие стройиндустрии влечёт за собой расширение номенклатуры изделий строительной стеновой керамики и увеличение объемов их производства. Одним из перспективных направлений развития может считаться производство крупногабаритных изделий со средней плотностью менее 700-800 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью менее 0,2 Вт/(м·°C). Сдерживающим фактором увеличения объемов производства является сырьевая база, так как качественное глинистое сырье увеличивает себестоимость производимых изделий и вынуждает предприятия использовать сырье с вредными примесями. Поэтому важной и актуальной задачей в решении данной проблемы является использование нового нетрадиционного сырья при производстве высокоэффективных изделий стеновой керамики – из техногенного сырья угольного ряда, получаемого при переработке угольных терриконов и отвалов, которых в России очень много.

Изначально себестоимость изделия в общем виде складывается из затрат на строительство завода и производственных расходов.

Для её снижения перспективным направлением является технология компрессионного формования. Она уменьшает себестоимость продукции на 20-35% за счёт снижения удельных капитальных затрат на строительство предприятия, сокращения технологического цикла производства, уменьшения трудовых затрат и расхода топлива. Снизить затраты на обжиг можно при использовании угольных шламов, кека, отсева в качестве основного сырья, которое ко всему

прочему позволяют снизить плотность и теплопроводность изделий, за счёт образования пористой структуры черепка и пустотности изделия.

Терриконики представляют собой горные породы угленосной толщи, вскрышные породы, включения в углях, угольные и угольно-породные шламы и низкосортные угли. Продукты угледобычи группируются как минеральные ресурсы, попутно извлеченные из недр при добыче основного полезного ископаемого, т.е. как техногенное сырье, которое может быть вовлечено в безубыточный оборот. Таким образом, они являются минеральными компонентами, поднятые на поверхность в процессе угледобычи либо выделившиеся при углеобогащении и не вошедшие в состав конечного продукта, т.е. товарного угля, – угле вмещающие горные породы, угле породные сростки, включения в углях, угольные и угольнопородные шламы, отсеvy (рис.1).



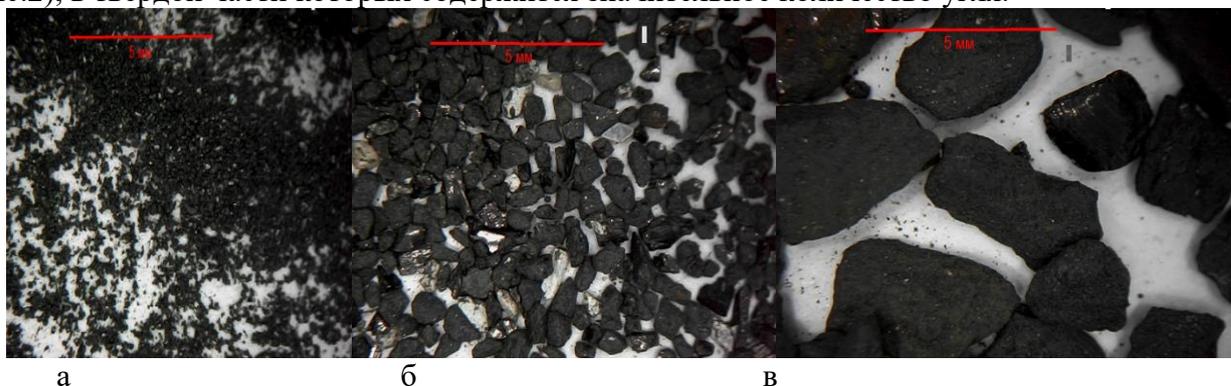
**Рис.1 Отвалы отходов угледобычи Ростовской области**  
**Fig.1 Dumps of coal mining waste of the Rostov region**

Интерес к техногенному сырью угольного ряда (шлам, отсев и кек), как к сырью, используемому при производстве керамических изделий в настоящее время сильно возрос [1-4]. Исследовательские работы, проведенные в их отношении, показали высокую перспективность использования данного вида сырья при изготовлении различных видов стеновой керамики.

**Постановка задачи.** Исследования проводились с целью разработки научно-технологической базы, получения высокоэффективных изделий стеновой керамики на основе техногенного сырья угольного ряда. Основные задачи исследовательской работы:

- определение технологических параметров получения стеновых керамических изделий на основе угольных шламов;
- изучение свойств получаемых изделий;
- изучение фазовых преобразований протекающие при обжиге и закономерности формирования структуры черепка.

**Методы исследования.** Определение физико-механических свойств образцов проводилось по ГОСТ 530-2012. Угольные отсеvy представляют собой тонкозернистые продукты (рис.2), в твердой части которых содержится значительное количество угля.



**Рис.2 Микрофотографии отсеvов углетходов фракций (а) 0,315–0,63 мм; (б) 0,63–1,25 мм, (в) 1,25–2,5 мм.**

**Fig.2 Micrographs of screenings of coal waste fractions (a) 0.315–0.63 mm; (b) 0.63–1.25 mm, (c) 1.25–2.5 mm.**

В исследованиях использовался следующий состав сырьевой смеси: 70% техногенного сырья угольного ряда (отсев) и 30% глинистого сырья

Состав и характеристики шламов могут отличаться друг от друга из-за колебаний зольности и теплотворной способности.

Техногенное сырье угольного ряда в керамических массах играют роль порообразующей и топливо содержащей составляющих, а глинистое сырье вводится в качестве добавки.

В глинистых массах, за счёт их невысокой газопроницаемости, проблемой при добавлении угольных шламов является лишь частичное выгорание угольной составляющей[5].

Наибольшая скорость выгорания углерода находится в пределах 900-950 °С, т.е. ниже оптимальной температуры обжига изделий, что способствует значительной экономии топлива.

**Обсуждение результатов.** Проведённые нами исследования показали, что приготовление отсевов в качестве сырья для изготовления строительной керамики заключается в их измельчении до фракций (0-0,63)–(0-0,16) мм.

Особенно соответствующим оборудованием для этого являются щековая дробилка. При этом зерновой состав может характеризоваться как непрерывным, так и прерывистым зерновым составом. Чем более тонко измельчено исходное сырьё, тем больше прочность обожжённых изделий [6-8].

На рис. 3 приведены зависимости прочности и водопоглощения обожжённых образцов от температуры обжига и степени измельчения исходного сырья.

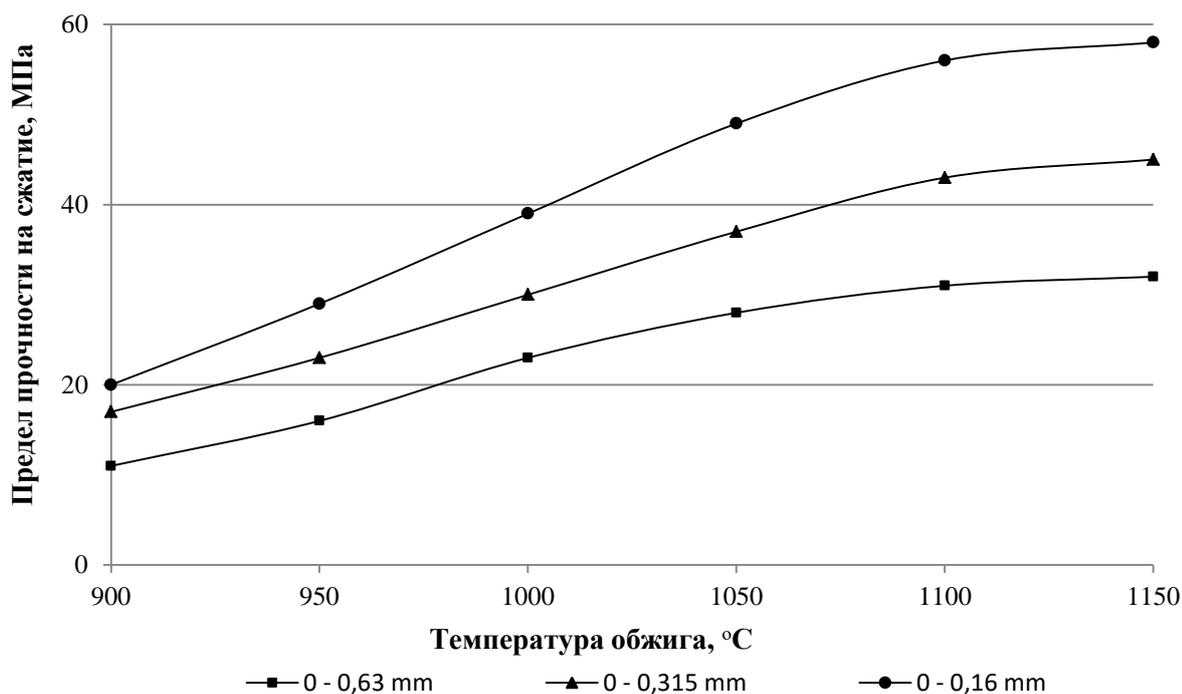
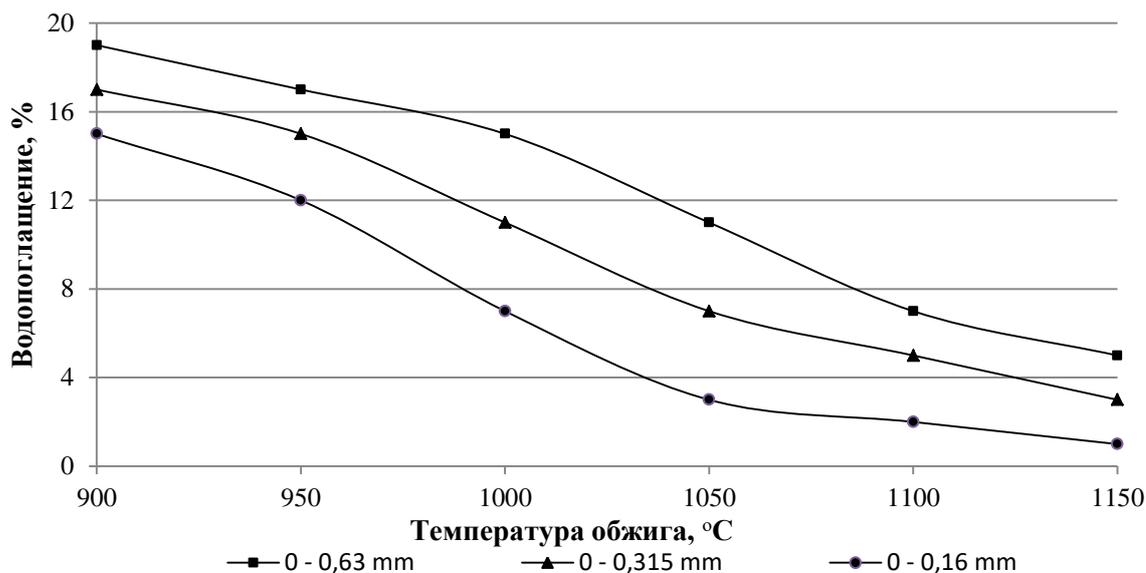


Рис. 3 Влияние степени измельчения и температуры обжига на предел прочности при сжатии

Fig. 3 The effect of grinding and calcination temperature on compressive strength

На рис. 4, приведены зависимости влияния степени измельчения и температуры обжига на водопоглощение образцов.

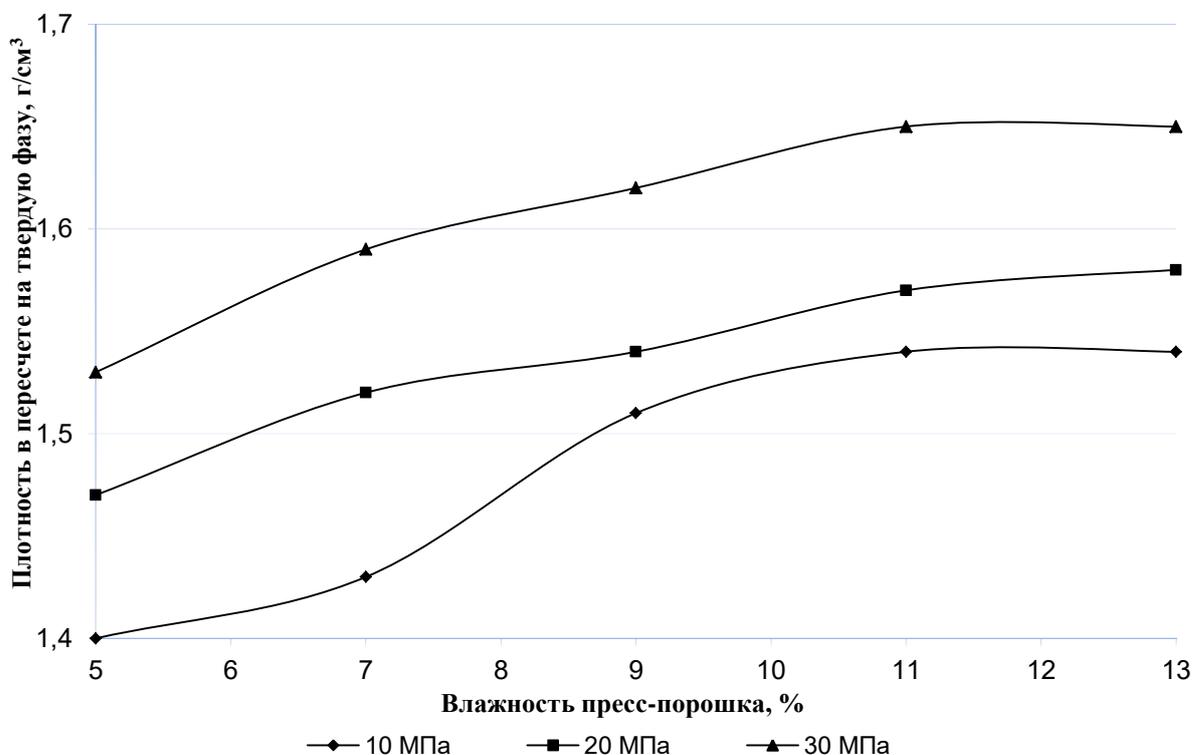
Как видно из графиков, уже при температуре обжига от 1000 °С и выше достигаются высокие показатели по прочности при достаточно низком водопоглощении образцов [9-14].



**Рис. 4** Влияние степени измельчения и температуры обжига на водопоглощение образцов  
**Fig. 4** The influence of the degree of grinding and the firing temperature on the water absorption of samples

Помимо этого, угольные шламы улучшают прессуемость пресс-порошков рис.5. Фотографии отпрессованных и обожжённых образцов представлены на рис. 6 и 7.

При использовании угольных шламов в качестве основного сырья поднимается прочность прессовок, снижается коэффициент сжатия и влажность пресс-порошка, уменьшается внутреннее и внешнее трение при прессовании, увеличивается срок службы оснастки пресса, достигается равномерность обжига изделий и возрастает их морозостойкость.



**Рис.5** Влияние влажности пресс-порошков на прессуемость образцов  
**Fig.5** Influence of moisture of press powders on the compressibility of samples



**Рис.6 Отпрессованные образцы на основе отсевов отходов угледобычи**  
**Fig.6 Pressed samples based on screenings of coal waste**



**Рис. 7 Обожженные образцы на основе отсевов отходов угледобычи**  
**Fig. 7 Burned samples based on coal mining screenings**

**Вывод.** Технология производства керамических камней на основе техногенного сырья угольного ряда имеет свои особенности, которые связаны с некоторыми технологическими процессами. Результаты теоретических исследований подтверждаются практическими данными, заключающимися в том, что в сырьевых смесях, содержащих техногенное сырье угольного ряда, резкое увеличение прочности, с учётом полного выгорания углерода, наступает при температурах 1000 -1060°C. Требуется тщательного изучения вопроса о форме размера пор с учётом технологичности процесса прессования, теплопроводности изделий, их физико-механических свойств [15-18].

Доказана целесообразность производства высокоэффективных керамических изделий с пониженной теплопроводностью и плотностью на основе техногенного сырья угольного ряда с использованием технологии компрессионного формования.

Приведённые изменения в процессе производства изделий данным способом помогут достигнуть существенного энергосбережения газа и оптимизации режима обжига.

#### **Библиографический список:**

1. Явруян Х.С., Гайшун Е.С., Котляр В.Д. Особенности компрессионного формования тонкодисперсных продуктов углеобогащения при производстве керамического кирпича // Строительные материалы. 2017. №12. С. 14-17.
2. Явруян Х.С., Гайшун Е.С., Власова Т.А. Производство стеновой керамики с применением тонкодисперсных продуктов углеобогащения // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. №9. С. 125-128.
3. Котляр В.Д., Явруян Х.С. Стеновые керамические изделия на основе тонкодисперсных продуктов переработки терриконов // Строительные материалы. 2017. №4. С. 38-41.
4. Гайшун Е.С., Рогочая М.В., Явруян Х.С. Техногенное сырьё угольного ряда в производстве стеновой керамики // Строительство и архитектура – 2015. 2015. С. 266-268.
5. Столбоушкин А.Ю., Стороженко Г.И. Отходы углеобогащения как сырьевая и энергетическая база заводов керамических стеновых материалов // Строительные материалы. 2011. №4. С. 43-46.
6. Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Сыромьясов В.А., Фомина О.А., Дружинин М. С., Злобин В. И. Влияние температуры обжига на спекание керамических черепков из отходов обогащения угля аргиллиты // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. №10. С. 39-48.

7. Котляр В.Д., Явруян Х.С. Стеновые керамические изделия на основе тонкодисперсных продуктов переработки терриконигов // *Строительные материалы*. 2017. №4. С. 38-41.
8. Явруян Х.С., Котляр В.Д., Лотошникова Е.О., Гайшун Е.С. Исследование среднефракционных материалов переработки терриконигов для производства изделий стеновой керамики // *Строительные материалы*. 2018. №4. С. 17-20.
9. Божко Ю.А., Гайшун Е.С., Дымченко М.Е., Козлов А.В., Козлов Г.А. и др. *Архитектура. Строительство. Дизайн: история, опыт, новации* / Божко Ю.А., Гайшун Е.С., Дымченко М.Е. №2. 2018. С.83
10. Котляр В.Д., Устинов А.В., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Особенности процесса обжига угольных шламов при производстве стеновой керамики // *Техника и технология силикатов*. 2014. № 4. С. 8–15.
11. Явруян Х.С., Гайшун Е.С., Котляр А.В. Особенности компрессионного формования тонкодисперсных продуктов углеобогащения при производстве керамического кирпича // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 14–17.
12. Ссылка на СПб Yavruyan K.S., Gaishun E.S., Y. Teryokhina. Comprehensive approach to the processing of East Donbass Spopl Tip // *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development" (WASTE'2018)*. October, 2018. St. Petersburg, Russia. P. 22-24.
13. A.Yu. Stolboushkin, A.I. Ivanov, O.A. Fomina. Use of Coal-Mining and Processing Wastes in Production of Bricks and Fuel for Their Burning // *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Procedia Engineering 150 (2016) 1496 – 1502*.
14. Kh.S. Yavruyan, V.D. Kotlyar, E.S. Gaishun "Medium-Fraction Materials for Processing of Coal-Thread Waste Drains for the Production of Wall Ceramics», *Materials and Technologies in Construction and Architecture // Materials Science Forum*. Vol. 931, pp 532-536, May 2018.
15. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Методика испытаний камневидного сырья для производства стеновых изделий компрессионного формования // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 24-27.
16. Котляр В.Д., Устинов А.В., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Особенности процесса обжига угольных шламов при производстве стеновой керамики // *Техника и технология силикатов*. 2014. № 4, С. 8-15.
17. Серегин А.И. *Переработка угольных шламов в товарные продукты нетрадиционным физико-химическим воздействием: дис. канд. техн. наук. М., 2009. 183 с.*
18. Золотарский А.З., Шейман Е.Ш. *Производство керамического кирпича. М.: ВШ. 1989. 264 с.*

#### References:

1. Yavruyan K.H.S., Gayshun Ye.S., Kotlyar V.D. Osobennosti kompressiionnogo formovaniya tonkodispersnykh produktov ugleobogashcheniya pri proizvodstve keramicheskogo kirpicha // *Stroitel'nyye materialy*. 2017. №12. S. 14-17. [Yavruyan K.H.S., Gaishun E.S., Kotlyar V.D. Features of the compression molding of fine products of coal preparation in the production of ceramic bricks // *Construction materials*. 2017. №12. P. 14-17. (In Russ)]
2. Yavruyan K.H.S., Gayshun Ye.S., Vlasova T.A. Proizvodstvo stenovoy keramiki s primeneniye tonko-dispersnykh produktov ugleobogashcheniya // *Resursoenergoeffektivnyye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2018. №9. S. 125-128. [Yavruyan K.H.S., Gaishun E.S., Vlasova T.A. Production of wall ceramics using fine-dispersed products of coal enrichment // *Resource-energy efficient technologies in the building complex of the region*. 2018. №9. Pp. 125-128. (In Russ)]
3. Kotlyar V.D., Yavruyan K.H.S. Stenovyye keramicheskiye izdeliya na osnove tonkodispersnykh produktov pererabotki terrikonikov // *Stroitel'nyye materialy*. 2017. №4. S. 38-41. [Kotlyar V.D., Yavruyan K.H.S. Ceramic wall articles based on finely dispersed waste products of heaps. *Building Materials*. 2017. №4. Pp. 38-41. (In Russ)]
4. Gayshun Ye.S., Rogochaya M.V., K.H.S. Yavruyan Tekhnogennoye syr'yo ugol'nogo ryada v proizvodstve stenovoy keramiki // *Stroitel'stvo i arkhitektura – 2015*. 2015. S. 266-268. [Gaishun E.S., Rogochaya M.V., H.S. Yavruyan Technogenic raw materials of the coal series in the production of wall ceramics // *Construction and Architecture - 2015*. 2015. P. 266-268. (In Russ)]
5. Stolboushkin A.YU., Storozhenko G.I. Otkhody ugleobogashcheniya kak syr'yevaya i energeticheskaya baza zavodov keramicheskikh stenovykh materialov // *Stroitel'nyye materialy*. 2011. №4. S. 43-46. [Stolboushkin A.Yu., Storozhenko G.I. Coal Beneficiation Waste as a Raw Material and Energy Base of Ceramic Wall Material Plants // *Construction Materials*. 2011. №4. Pp. 43-46. (In Russ)]
6. Stolboushkin A.YU., Ivanov A.I., Syromyasov V.A., Fomina O.A., Druzhinin M. S., Zlobin V. I. Vliyaniye temperatury obzhiga na spekanie keramicheskikh cherepkov iz otkhodov obogashcheniya uglya argillity // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2015. №10. S. 39-48. [Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Syromyasov V.A., Fomina O.A., Druzhinin M.S., Zlobin V.I. Influence of the firing temperature on sintering of ceramic shards from coal enrichment waste argillites / *Proceedings of higher educational institutions. Building*. 2015. №10. Pp. 39-48. (In Russ)]
7. Kotlyar V.D., Yavruyan K.H.S. Stenovyye keramicheskiye izdeliya na osnove tonkodispersnykh produktov pererabotki terrikonikov // *Stroitel'nyye materialy*. 2017. №4. S. 38-41. [Kotlyar V.D., Yavruyan K.H.S. Stenovyye ceramic products based on finely dispersed products of processing of heaps // *Construction Materials*. 2017. №4. pp. 38-41. (In Russ)]
8. Yavruyan K.H.S., Kotlyar V.D., Lotoshnikova Ye.O., Gayshun Ye.S. Issledovaniye srednefraktsionnykh materialov pererabotki terrikonikov dlya proizvodstva izdeliy stenovoy keramiki // *Stroitel'nyye materialy*. 2018. №4. S. 17-20. [Ya-

- vruyan Kh.S., Kotlyar V.D., Lotoshnikova E.O., Gaishun E.S. Investigation of medium fractional materials of processing of heaps for the production of wall ceramics // Construction Materials. 2018. №4. pp. 17-20. (In Russ)]
9. Bozhko YU.A., Gayshun Ye.S., Dymchenko M.Ye., Kozlov A.V., Kozlov G.A. i dr. Arkhitektura. Stroitel'-stvo. Dizayn: istoriya, opyt, novatsii/ Bozhko YU.A., Gayshun Ye.S., Dymchenko M.Ye.- №2.- 2018.-S.83 [Bozhko Yu.A., Gaishun E.S., Dymchenko M.E., Kozlov A.V., Kozlov G.A. and others. Architecture. Building. Design: history, experience, innovations / Bozhko Yu.A., Gaishun E.S., Dymchenko M.E.- №2.- 2018.-P.83(In Russ)]
10. Kotlyar V.D., Ustinov A.V., Terekhina YU.V., Kotlyar A.V. Osobennosti protsessy obzhiga ugol'nykh shlamov pri proizvodstve stenovoy keramiki // Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2014. № 4. S. 8–15. [Kotlyar V.D., Ustinov A.V., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V. Features of the process of burning coal sludge in the production of wall ceramics // Technique and technology of silicates. 2014. No. 4. pp. 8–15. (In Russ)]
11. Yavruyan KH.S., Gayshun Ye.S., Kotlyar A.V. Osobennosti kompressionnogo formovaniya tonkodispers-nykh produktov ugleobogashcheniya pri proizvodstve keramicheskogo kirpicha // Stroitel'nyye materialy. 2017. № 12. S. 14–17. [Yavruyan Kh.S., Gaishun E.S., Kotlyar A.V. Features of compression molding of fine-dispersed coal preparation products in the production of ceramic bricks. Stroitel'nyye materialy, 2013, no. 2017. No. 12. pp. 14–17. (In Russ)]
12. Reference to St. Petersburg Yavruyan K.S., Gaishun E.S., Y. Teryokhina. Comprehensive approach to the East Donbass Spopl Tip // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Sustainable Urban Development" (WASTE'2018). October, 2018. St. Petersburg, Russia. P. 22-24.
13. A.Yu. Stolboushkin, A.I. Ivanov, O.A. Fomina. Use of Coal-Mining and Fuel Burning // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Procedures En-gineering 150 (2016) 1496-1502.
14. Kh.S. Yavruyan, V.D. Kotlyar, E.S. "For Coal-Threading of Wall Ceramics", Materials & Technologies and Materials / Technologies Science Forum Submitte. Vol. 931, pp. 532-536, May 2018.
15. Kotlyar V.D., Terokhina YU.V., Kotlyar A.V. Metodika ispytaniy kamnevidnogo syr'ya dlya proizvodstva stenovykh izdeliy kompressionnogo formovaniya // Stroitel'nyye materialy. 2014. № 4. S. 24-27. [Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V. Test method kamnevidnogo raw materials for the production of wall products of compression molding // Construction materials. 2014. No. 4. P. 24-27. (In Russ)]
16. Kotlyar V.D., Ustinov A.V., Terokhina YU.V., Kotlyar A.V. Osobennosti protsessy obzhiga ugol'nykh shlamov pri proizvodstve stenovoy keramiki // Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2014. № 4, S. 8-15. [Kotlyar V.D., Ustinov A.V., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V. Features of the process of burning coal sludge in the production of wall ceramics // Technique and technology of silicates. 2014. № 4, p. 8-15. (In Russ)]
17. Seregin A.I. Pererabotka ugol'nykh shlamov v tovarnyye produkty netrادي-tsiionnym fiziko-khimicheskim vozdeystviyem: dic. kand. tekhn. nauk. M., 2009. 183 s. [Seregin A.I. Processing of coal sludge into marketable products by non-traditional physicochemical effects: diss. Cand. tech. sciences. M., 2009. 183 p. (In Russ)]
18. Zolotarskiy A.Z., Sheyman Ye.SH. Proizvodstvo keramicheskogo kirpicha. M.: VSH.1989. 264 s. [Zolotarsky, A.Z., Sheyman, E.Sh. Production of ceramic bricks. M. : VS..1989. 264 s. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Гайшун Алексей Сергеевич** – бакалавр.

**Гайшун Евгений Сергеевич** – аспирант.

**Ковалеристова Екатерина Владимировна** – магистрант.

**Явруян Хунгианос Степанович** - кандидат технических наук, доцент.

**Information about the authors.**

**Alexey S. Gaishun** – Bachelor.

**Eugene S. Gaishun** - Graduate Student.

**Ekaterina V. Kovaleristova** - Master Student.

**Hungianos S. Yavruyan** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof.

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 16.01.2019.

**Принята в печать** 9.03.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

**Received** 16.01.2019.

**Accepted for publication** 9.03.2019.

**Для цитирования:** Жуков К. Ю., Левченко А.А., Поценья К.Н. Оценка эффективности применения дополнительных удерживающих устройств для повышения устойчивости шпунтовых свай, изготовленных из поливинилхлорида. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 160-168. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-160-168

**For citation:** Zhukov K. Y., Levchenko A. A., Potsepnaya K. N. Assessment of the efficiency of the use of additional holding devices to improve the stability of sheet piles made of polyvinylchloride. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 160-168. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-160-168

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК: 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-160-168

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ШПУНТОВЫХ СВАЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

*Жуков К.Ю.<sup>1</sup>, Левченко А.А.<sup>2</sup>, Поценья К.Н.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ООО «Таежный Кислород»,

<sup>1</sup>660093, г. Красноярск, ул. Академика Вавилова, 2, Россия,

<sup>2,3</sup>ГК «ТехПолимер»,

<sup>2,3</sup>660016, г. Красноярск ул. Матросова, 10Д, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: kirillsiber@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail:nastyshka\_l@mail.ru, <sup>3</sup>e-mail hueberq@mail.ru

**Резюме. Цель.** В данной статье рассматриваются варианты дополнительных удерживающих устройств для подпорных конструкций, изготовленных из полимерных шпунтов. Вопрос повышения устойчивости полимерных шпунтовых свай играет одну из ключевых ролей в проектировании и строительстве сооружений с применением данного вида материала. В статье приведено сравнение двух вариантов удерживающих устройств и сравнение их с неукрепленным вариантом на примере выемки одинаковой глубины. **Метод.** Расчеты проводятся методами Кулона-Мора, реализованными в программном комплексе GEO5 модуль «Ограждение котлованов – анализ». **Результат.** Полученные расчеты показали возможность применения обоих типов удерживающих устройств в подпорных конструкциях из полимерных шпунтов. **Вывод.** Расчеты показали эффективность обоих методов при их использовании в качестве дополнительных удерживающих устройств для подпорных конструкций с использованием поливинилхлоридных шпунтов. Вариант с установкой опорной трубы позволяет несколько снизить деформацию шпунтовой конструкции, но при этом у него отсутствует возможность регулировки вертикального положения стенки, которая присутствует в варианте с анкерной системой за счет приваривания резьбовых шпилек к концам металлических тяг, либо использования талрепов.

**Ключевые слова:** шпунт, поливинилхлорид, подпорные стены, повышение устойчивости

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF ADDITIONAL HOLDING DEVICES TO IMPROVE THE STABILITY OF SHEET PILES MADE OF POLYVINYLCHLORIDE

Kirill Y. Zhukov<sup>1</sup>, Anastasia A. Levchenko<sup>2</sup>, Kirill N. Potsepya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LLC Taiga Oxygen,

<sup>1,2</sup>Academician Vavilov Str., Krasnoyarsk 660093, Russia,

<sup>2,3</sup>GC «TehPolimer»,

<sup>2,3</sup>10D Matrosova Str., Krasnoyarsk 660016, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: kirillsiber@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: nastyshka\_1@mail.ru, <sup>3</sup>e-mail hueberq@mail.ru

**Abstract Objectives.** This article discusses options for additional restraints for support structures made from polymer dowels. The issue of increasing the stability of polymer sheet piles plays a key role in the design and construction of facilities using this type of material. The article compares two variants of the restraining devices and compares them with the non-reinforced version using the example of a notch of the same depth. **Methods.** The calculations are carried out by the Coulomb-Mohr methods implemented in the GEO5 software package module "Pit Fencing - Analysis. **Result.** The obtained calculations showed the possibility of using both types of restraints in retaining structures made of polymer dowels. **Conclusion.** Calculations have shown the effectiveness of both methods in their use as additional restraints for supporting structures using PVC dowels. The variant with the installation of the support pipe allows to slightly reduce the deformation of the sheet pile structure, but it does not have the ability to adjust the vertical position of the wall, which is present in the variant with the anchor system by welding the threaded rods to the ends of the metal braces or using talreeps.

**Keywords:** sheet piling, PVC, retaining walls, increasing stability

**Введение.** Подпорные конструкции на основе полимерных шпунтовых свай на сегодняшний день являются одной из наиболее перспективных технологий. Использование шпунтов, изготовленных из поливинилхлорида, началось в начале 60-х годов 20 века в США. Основными преимуществами использования полимерных шпунтов, по сравнению с металлическим шпунтом Л5, являются:

1. Удельный вес  $1\text{ м}^2$  в 2.8 раза меньше;
2. Стоимость  $1\text{ м}^2$  в 3.5-4 раза ниже;
3. Полная стойкость к коррозии.

К недостаткам следует отнести более низкую несущую способность.

**Постановка задачи.** Для компенсации этого недостатка следует предусматривать дополнительные удерживающие устройства (анкерные системы, опорные конструкции, и т.п.), которые принимают на себя основные нагрузки от грунта и позволяют осуществлять устройство подпорных конструкций большой высоты.

**Методы исследования.** Объектом исследования принята подпорная конструкция с высотой консоли 3,5 м. (рис. 1, 2).

В статье рассмотрены два варианта дополнительных удерживающих устройств для шпунтовых конструкций.

1. Анкерные системы, представляющие из себя гибкие тяги, соединяющие шпунтовую стену через распределительный пояс к якорям, погруженным в грунт на расстоянии от стены.
2. Анкерные трубы, располагаемые непосредственно перед, либо, за поверхностью шпунта, физико-механические характеристики которого, представлены в табл. 1.

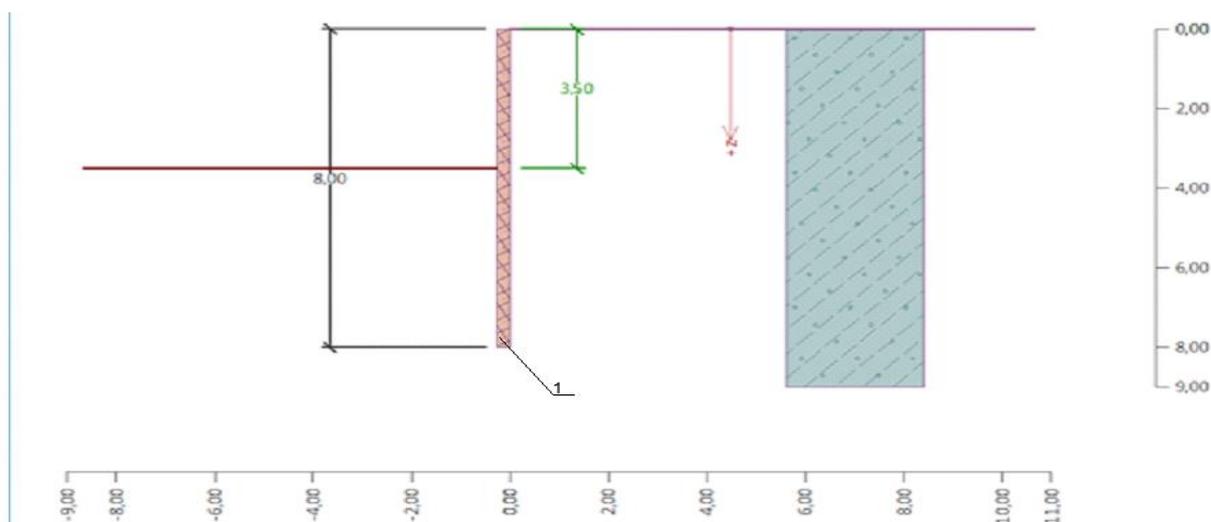


Рис. 1. Расчетная схема конструкции шпунтовой подпорной стенки  
 Fig. 1. Design scheme for sheet pile retaining wall

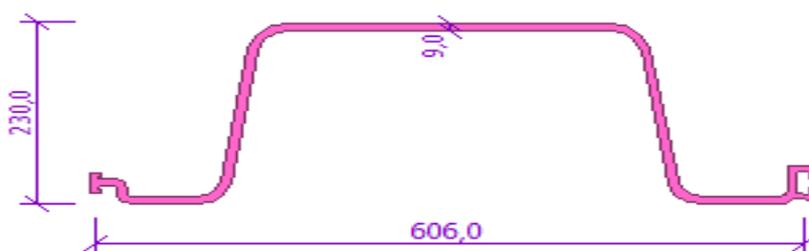


Рис. 2. Поперечное сечение полимерного шпунта  
 Fig. 2. Cross section of polymer sheet pile

Таблица 1. Физико-механические характеристики полимерного шпунта  
 Table 1. Physico-mechanical characteristics of the polymer sheet pile

Показатель Indicator	Значение Value
Площадь сечения, м <sup>2</sup> Section area, m <sup>2</sup>	9471 * 10 <sup>-2</sup>
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	2600
Модуль Гука, МПа Hooke's module, MPa	1653
Момент сопротивления сечения, см <sup>3</sup> The moment of resistance of the section, cm <sup>3</sup>	1014
Максимально допустимый момент, кН*м Maximum allowable moment, kN * m	23,68
Максимально допустимое значение поперечной силы, кН Maximum allowable value of shear force, kN	23,65

В качестве грунта был принят суглинок полутвердый со следующими физико-механическими характеристиками (табл.2):

Таблица 2. Физико-механические характеристики грунта  
 Table 2. Physical and mechanical characteristics of the soil

Показатель Indicator	Значение Value
Удельный вес, кН/м <sup>3</sup> Specific weight, kN / m <sup>3</sup>	18,00
Удельное сцепление, кПа Specific grip, kPa	15,00
Угол внутреннего трения, град Angle of internal friction, hail	25,00

Расчеты проведены в программном комплексе GEO5 модуль «Ограждение котлованов – анализ».

В качестве методики определения активного и пассивного воздействия грунта применяется теория Кулона-Мора согласно [1].

Анализ устойчивости шпунтовой конструкции включает в себя:

1. Определение деформации конструкции;
2. Определение экстремумов поперечных сил и моментов.

Максимально допустимое отклонение верхней кромки шпунта определяется в соответствии с ОДМ 218.2.092-2018.

$$\Delta = 0.01 * h \quad (1)$$

где h- полная длина шпунта.

При полной длине шпунта 8500мм допустимое отклонение составляет 8.5мм.

**Обсуждение результатов. Расчет устойчивости шпунтовой конструкции.** В качестве эталона был принят вариант без дополнительного укрепления для последующего сравнения с ним укрепленных конструкций (рис. 3).

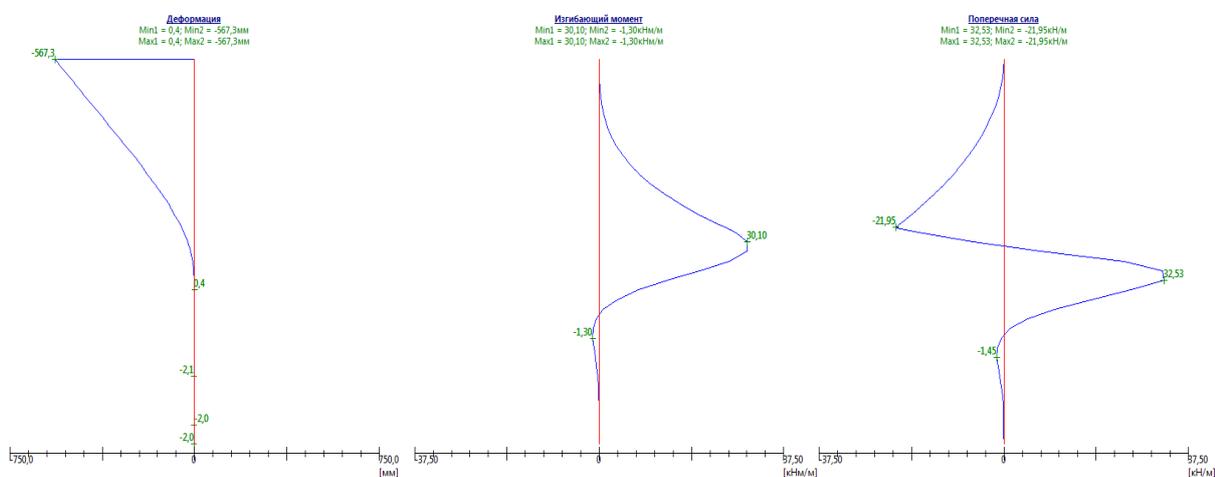


Рис. 3. Эпюры деформации, изгибающего момента и поперечной силы без удерживающих устройств

Fig. 3. Diagrams of deformation, bending moment and shear force without holding devices

Таблица 3. Результаты расчета неукрепленной конструкции

Table 3. The results of the calculation of unfortified structure

Показатель Indicator	Значение Value
Отклонение, мм Deviation, mm	567,3 > 8,5
Изгибающий момент, кН*м Bending moment, kN * m	30,1 > 23,68
Поперечная сила, кН Shear force, kN	32,53 > 23,65

Так как полученное значение отклонения существенно превышает допустимое, необходимо применение дополнительных удерживающих устройств.

Моделирование вариантов удерживающих устройств в модуле «Ограждение котлованов-анализ» осуществляется путем добавления опоры с заданными степенями свободы (рис.4-9).

В случае варианта с гибкими тягами добавляется опора с возможностью поворота, но жестко закрепленная от смещения. В случае опоры непосредственно за стенкой, происходит жёсткое защемление опоры. Отметка погружения и шаг опор в обоих случаях одинаковы.

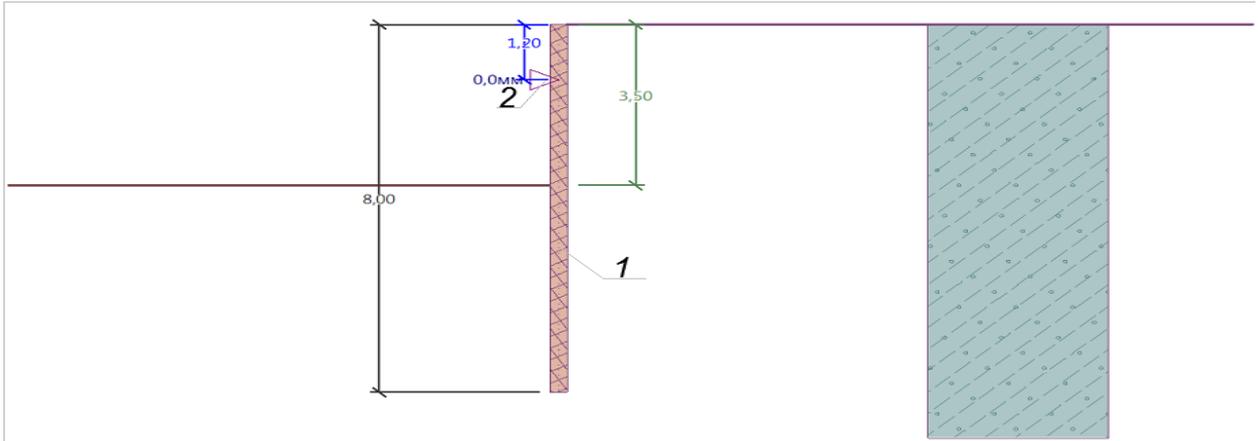


Рис. 4. Расчетная схема конструкции шпунтовой подпорной стенки с анкерной системой  
 Fig. 4. Design scheme for sheet pile retaining wall with anchor system

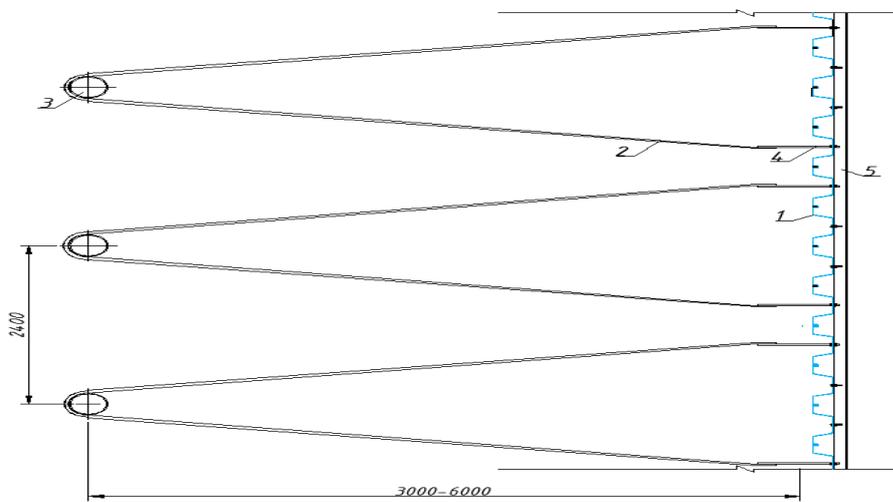


Рис. 5. Конструкция шпунтовой подпорной стенки с анкерной системой  
 Fig. 5. The construction of sheet pile retaining wall with anchor system

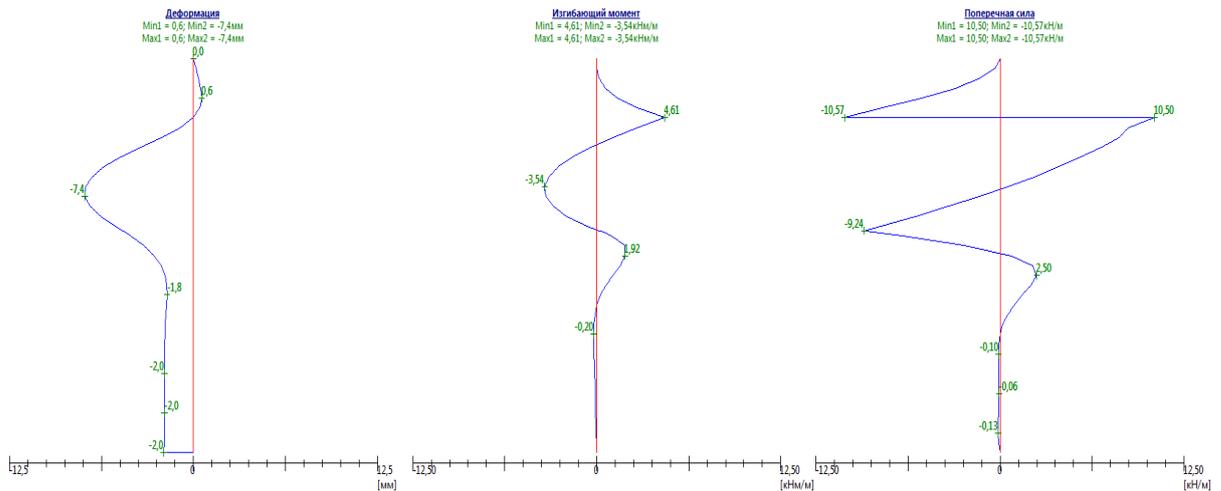


Рис. 6. Эпюры деформации, изгибающего момента и поперечной силы шпунтовой конструкции с анкерной системой

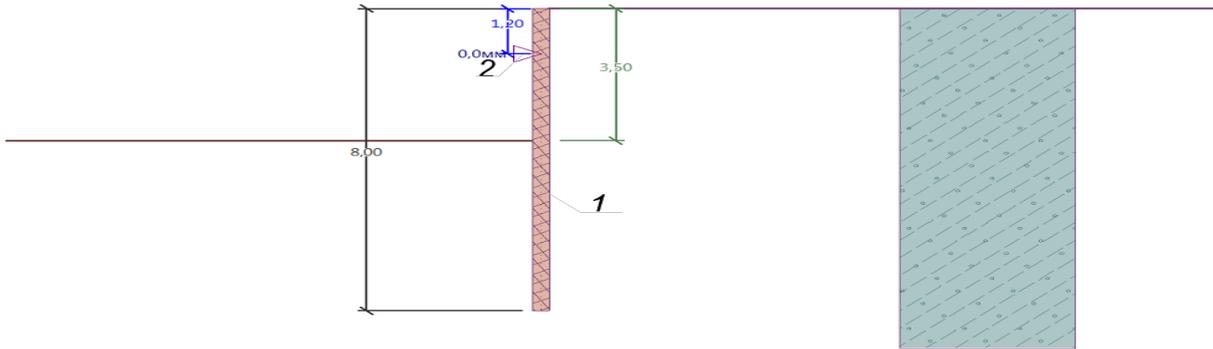
Fig. 6. Diagrams of deformation, bending moment and lateral force of the sheet pile structure with the anchor system

**Таблица 4. Результаты расчета конструкции с анкерной системой**

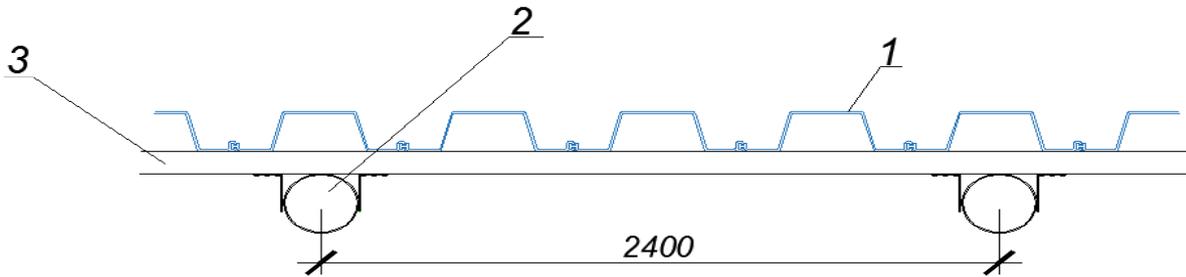
**Table 4. The results of the design calculation with anchor system**

Показатель Indicator	Значение Value
Отклонение, мм Deviation, mm	7,4 < 8,5
Изгибающий момент, кН*м Bending moment, kN * m	4,61 < 23,68
Поперечная сила, кН Shear force, kN	10,57 < 23,65

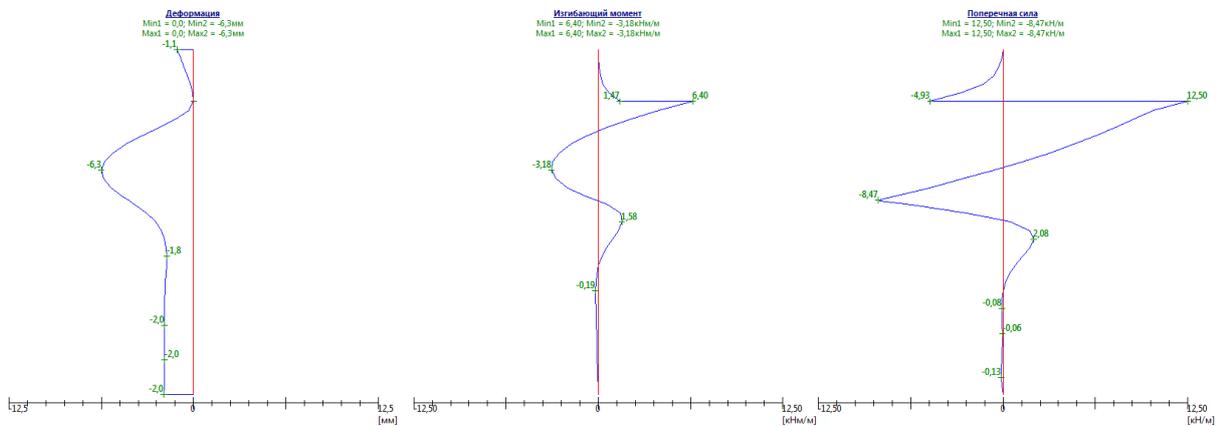
Сравнивая полученные значения с допустимыми (табл.4), делаем вывод, что конструкция устойчива.



**Рис. 7. Расчетная схема конструкции шпунтовой подпорной стенки с опорной трубой**  
**Fig. 7. Design scheme for sheet pile retaining wall with support pipe**



**Рис. 8. Конструкция шпунтовой подпорной стенки с опорной трубой**  
**Fig. 8. The construction of sheet pile retaining wall with support pipe**



**Рис. 9. Эпюры деформации, изгибающего момента и поперечной силы с опорной трубой в качестве жесткой опоры**

**Fig. 9. Diagrams of deformation, bending moment and shear force with a support pipe as a rigid support**

**Таблица 5. Результаты расчета конструкции с опорной трубой**  
**Table 5. The results of the design calculation with the support pipe**

Показатель Indicator	Значение Value
Отклонение, мм Deviation, mm	6,3 < 8,5
Изгибающий момент, кН*м Bending moment, kN * m	6,40 < 23,68
Поперечная сила, кН Shear force, kN	12,50 < 23,65

**Обсуждение результатов.** Расчеты (табл. 3-5) показали эффективность обоих методов при их использовании в качестве дополнительных удерживающих устройств для подпорных конструкций с использованием поливинилхлоридных шпунтов.

Вариант с установкой опорной трубы позволяет несколько снизить деформацию шпунтовой конструкции, но при этом у него отсутствует возможность регулировки вертикального положения стенки, которая присутствует в варианте с анкерной системой за счет приваривания резьбовых шпилек к концам металлических тяг, либо использования талрепов.

**Вывод.** Выбор типа удерживающей конструкции необходимо делать в зависимости от наличия свободного пространства, материалов и пожеланий заказчика.

#### Библиографический список:

1. Алексеев С.И., Хисамов Р.Р. Трение грунта о вертикальную стенку и его влияние на работу основания в шпунтовой обойме// Общетеchnические задачи и пути их решения, 2014, №4. стр. 79-87.
2. Конюхов Д.С., Свиридов А.И, Расчет технологических деформаций существующих зданий в процессе изготовления ограждающих конструкций котлованов// Вестник МГСУ, 2011, №5. – стр. 99-103.
3. Корчагин Е.А., Вишняков И.Н. Зависимость характеристик больверков от метода расчета// Вестник МГСУ, 2010, №4. стр. 198-201.
4. Кириллов В.М., Романов П.Л. Сравнение отечественных и европейских методик расчета больверков// Журнал университета водных коммуникаций, 2008, №3. – стр. 190-193
5. Сливцев К.В. Натурные наблюдения за деформациями ограждающих конструкций опытного котлована и грунтового массива//Известия ПГУПС, 2008, №3. – стр. 249-258
6. Левачев С.Н., Халецкий В.С. Анкерные и якорные устройства в гидротехническом строительстве// Вестник МГСУ, 2010, №5. стр. 58-67
7. Серова Е.А., Чунюк Д.Ю. Качественный анализ составляющих геотехнического риска при строительстве подземных и заглубленных сооружений// Вестник МГСУ, 2010, №4. стр. 136-142
8. Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния гибких ограждений с распоркой в процессе поэтапной разборки грунта// Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2011, №2. стр. 129-135
9. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Моделирование поведения и оценка несущей способности системы тонкостенная конструкция – грунт с учетом ползучести и деградации грунта// Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки, 2011, №4. стр. 68-74
10. Раскутин А.Е. Российские полимерные композитные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях// Авиационные материалы и технологии, 2017, №1. – стр. 349-366
11. Дмитриева К.В. Расчет жесткой стенки в упругой весомой полуплоскости// Наука и техника, 2016, №6. – стр. 493-503
12. Тищенко А.И., Чертов В.В. Новое решение анкеровки причальных стен типа “больверк”//Мелиорация и водное хозяйство. Современные проблемы мелиорации земель и пути их решения, 2013. – стр. 127-134
13. Vaars S.V. Design of sheet pile installation by vibration// Geotechnical and geological engineering, 2004, №3. – стр. 391-400
14. Ma J., Berggren B.S., Stille H., Hintze S. Deformation of anchor-sheet pile wall retaining system at deep excavations in soft soils overlying bedrock// Geotechnical special publication, 2010, - стр. 126-131
15. Верстов В.В., Филиппов Е.Н. Обоснование рациональных видов воздействий при погружении в грунт полимерного шпунта// Вестник гражданских инженеров, 2011, №4. – стр. 74-81
16. Клейн Г.К. Расчет подпорных стены// Ярославль, Главполиграфпром, 1964. – 196 стр.
17. Бухарцев В.Н., Волков Е.Н. Оценка устойчивости шпунтовых стен// Транспортное строительство, 2014, №8. – стр. 27-30
18. Рязанов В.С., Чесноков А.М. Влияние расположения анкера на определение рационального варианта шпунтовой стенки// Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая, 2013, №1. –стр. 407-412

19. Меньшиков Е.А., Румянцев И.А. Применение композитного шпунта в гидротехническом строительстве // Прочность, ползучесть и разрушение строительных и машиностроительных материалов и конструкций. Труды Международной молодежной научной конференции, посвященной 55- летию РУДН, 2014, - стр. 184-190
20. Li Z.Y., Deng Z.W., Study of dynamic response rule of prestressed anchor sheet-pile wall // Yantuli xue, 2010, №2, - стр. 645-648

#### References:

1. Alekseev S.I., Hisamov R.R. Trenie grunta o vertikal'nyuyustenku i ego vliyaniye na rabotu osnovaniya v shpuntovoj obojme. *Obshe tekhnicheskie zadachi i puti ihresheniya*, 2014, №4. - str. 79-87. [Alekseev S.I., Hisamov R.R. Ground friction on the vertical wall and its influence on the work of the foundation in the sheet piling. *General technical problems and their solutions* 2014, №4. - p. 79-87 (in Russ.)]
2. Konyukhov D.S., Sviridov A.I. Raschet tekhnologicheskikh deformatsiy sushchestvuyushchih zdaniy v processe izgotovleniya ograždayushchih konstrukcij kotlovanov. *Vestnik MGSU*, 2011, №5. - str. 99-103. [Konyukhov D.S., Sviridov A.I. Calculation of technological deformations of existing buildings in the process of manufacturing walling pits. *Vestnik MGSU*, 2011, №5. - p. 99-103. (in Russ.)]
3. Korchagin E.A., Vishnyakov I.N. Zavisimost' harakteristik bol'verkot metod rascheta. *Vestnik MGSU*, 2010, №4. - str. 198-201 [Korchagin E.A., Vishnyakov I.N. The dependence of the characteristics of the bolvorks on the calculation method. *Vestnik MGSU*, 2010, №4. - p. 198-201 (in Russ.)]
4. Kirillov V.M., Romanov P.L. Sravneniye otechestvennykh i yevropeyskikh metodik rascheta bol'verkov // *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*, 2008, №3. str. 190-193 [Kirillov V.M., Romanov P.L. Comparison of domestic and European methods for calculating Bolvorks. *Journal of the University of Water Communications*, 2008, №3. - p. 190-193 (in Russ.)]
5. Slivec K.V. Naturnye nablyudeniya za deformatsiyami ograždayushchih konstrukcij o pytnogokotlovanii gruntovogo massiva. *Izvestiya PGUPS*, 2008, №3. - str. 249-258 [Slivets K.V. Field observations of deformations of the enclosing structures of an experimental excavation and a soil mass. *News of PGUPS*, 2008, №3. - p. 249-258 (in Russ.)]
6. Levachev S.N., Haleckij V.S. Ankernye i yakovnye ustrojstva v gidrotekhnicheskom stroitel'stve. *Vestnik MGSU*, 2010, №5. - str. 58-67 [Levachev S.N., Khaletsky V.S. Anchor and anchor devices in hydraulic engineering construction. *Vestnik MGSU*, 2010, №5. - p. 58-67 (in Russ.)]
7. Serova Ye.A., Chunyuk D.YU. Kachestvennyy analiz sostavlyayushchikh geotekhnicheskogo riska pri stroitel'stve podzemnykh i zaglublennykh sooruzheniy // *Vestnik MGSU*, 2010, №4. - str. 136-142 [Serova, Ye.A., Chunyuk, D.Yu. Qualitative analysis of the components of geotechnical risk in the construction of underground and buried structures. *Vestnik MGSU*, 2010, №4. - p. 136-142 (in Russ.)]
8. Mirsayapov I.T., Khasanov R.R. Eksperimental'nyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gibkikh ograždений s rasporkoy v protsesse po etapnoy razborki grunta // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2011, №2. - str. 129-135 [Mirsayapov I.T., Khasanov R.R. Experimental studies of the stress-strain state of flexible fences with a spacer in the process of phased disassembly of the soil. *News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2011, №2. - p. 129-135 (in Russ.)]
9. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Modelirovaniye povedeniya i otsenka nesushchey sposobnosti sistemy tonkostennaya konstruktsiya – grunt s uchetom polzuchesti i degradatsii grunta // *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskiye nauki*, 2011, №4. - str. 68-74 [Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Behavior modeling and assessment of the carrying capacity of a thin-walled system — ground with allowance for creep and soil degradation. *Uchenyye zapiski Kazan University. Series Physics and Mathematics*, 2011, №4. - p. 68-74 (in Russ.)]
10. Raskutin A.Ye. Rossiyskiye polimernyye kompozitnyye materialy novogo pokoleniya, ikh osvoyeniye i vnedreniye v perspektivnykh razrabatyvayemykh konstruktsiyakh // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2017, №1. - str. 349-366 [Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of a new generation, their development and implementation in promising developed structures. *Aviation materials and technologies*, 2017, №1. - p. 349-366 (in Russ.)]
11. Dmitriyeva K.V. Raschet zhestkoy stenki v uprugoy vesomoy poluploskosti // *Nauka i tekhnika*, 2016, №6. - str. 493-503 [Dmitriyeva K.V. Calculation of a rigid wall in the elastic weighing half-plane. *Science and technology*, 2016, №6. - p. 493-503 (in Russ.)]
12. Tishchenko A.I., Chertov V.V. Novoye resheniye ankerovki prichal'nykh sten tipa "bol'verk" // *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo. Sovremennyye problemy melioratsii zemel' i puti ikh resheniya*, 2013. - str. 127-134 [Tishchenko A.I., Chertov V.V. New solution for anchoring of bolvorka-type quay walls. *Melioration and Water Economy. Modern problems of land reclamation and their solutions*, 2013. - p. 127-134 (in Russ.)]
13. Baars S.V. Design of sheet pile installation by vibration. *Geotechnical and geological engineering*, 2004, №3. -p. 391-400
14. Ma J., Berggren B.S., Stille H., Hintze S. Deformation of anchor-sheet pile wall retaining system at deep excavations in soft soils overlying bedrock. *Geotechnical special publication*, 2010, - p. 126-131

15. Verstov V.V., Fillipov E.N. Obosnovanieracional'nyhvidovvozdeystvijpripogruzhonii v grunt polimernogo shpunta. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2011, №4. – str. 74-81 [Verstov V.V., Fillipov E.N. Justification of rational types of impacts when immersed in the soil of a polymer sheet pile. Bulletin of Civil Engineers, 2011, №4. - p. 74-81 (in Russ.)]
16. Kleyn G.K. Raschet podpornykh steny// Yaroslavl', Glavpoligrafprom, 1964. – 196 str. [Klein G.K. Calculation of retaining walls. Yaroslavl, Glavpoligrafprom, 1964. - 196 p. (in Russ.)]
17. Buharcev V.N., Volkov E.N. Ocenka ustojchivosti shpuntovykh sten. Transportnoe stroitel'stvo, 2014, №8. – str. 27-30 [Bukhartsev V.N., Volkov E.N. Evaluation of the stability of sheet pile walls. Transport Construction, 2014, №8. p. 27-30 (in Russ.)]
18. Ryazanov V.S., Chesnokov A.M. Vliyaniye raspolozheniya ankera na opredeleniye ratsional'nogo varianta shpuntovoy stenki// Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya, 2013, №1. str. 407-412 [Ryazanov V.S., Chesnokov A.M. The influence of the location of the anchor on the definition of a rational variant of the sheet pile wall. Proceedings of the Volga State Technological University. Series: Technological, 2013, №1. - p. 407-412 (in Russ.)]
19. Men'shikov E.A., Rumyantseva I.A. Primeneniye kompozitnogo shpunta v gidrotekhnicheskoy stroitel'stve// Prochnost', polzuchest' i razrusheniye stroitel'nykh mashin i stroitel'nykh materialov i konstruktsiy trudy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchonnoy 55- letiyu RUDN, 2014, - str. 184-190 [Menshikov E.A., Rumyantseva I.A. The use of composite tongue in hydraulic engineering construction. Durability, creep and destruction of building and engineering materials and structures works of the International Youth Scientific Conference dedicated to the 55th anniversary of RUDN, 2014, - p. 184-190 (in Russ.)]
20. Li Z.Y., Deng Z.W., Study of dynamic response rule of prestressed anchor sheet-pile wall// Yantuli xue, 2010, №2, - p. 645-648

**Сведения об авторах:**

**Жуков Кирилл Юрьевич** – инженер проектировщик.

**Левченко Анастасия Андреевна** – инженер проектировщик.

**Поцепня Кирилл Николаевич** – специалист научно технического обеспечения.

**Information about authors:**

**Zhukov Kirill Y.** – Design Engineer.

**Anastasia A. Levchenko** – Design Engineer.

**Kirill N. Potsepnya** – Specialist in scientific and technical support.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 14.02.2019.

**Принята в печать** 21.03.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 14.02.2019.

**Accepted for publication** 21.03.2019.

**Для цитирования:** Зотов И.М., Чепурненко А.С., Языев С.Б. Расчет на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения с учетом ползучести. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 169-176. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

**For citation:** Zotov I.M., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B. Calculation of the flat bending shape stability of rectangular cross section beams with regard to creep. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 169-176. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

### РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА БАЛОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

**Зотов И.М.<sup>2</sup>, Чепурненко А.С.<sup>2</sup>, Языев С.Б.<sup>1</sup>**

<sup>1-3</sup> Донской государственный технический университет,

<sup>1-3</sup> 344002, Ростов -на-Дону, площадь Гагарина, 1, Россия,

<sup>1</sup>e-mail:ps62@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail:anton\_chepurnenk@mail.ru, <sup>3</sup>e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru

**Резюме. Цель.** В статье приводится вывод разрешающего уравнения для расчета на устойчивость плоской формы деформирования призматических балок с учетом реологических свойств материала. **Метод.** Задача сводится к дифференциальному уравнению второго порядка относительно угла закручивания, решение которого выполняется численно методом конечных разностей в сочетании с методом Эйлера. **Результат.** Полученное дифференциальное уравнение позволяет учесть наличие начальных несовершенств в виде начального прогиба балки, начального угла закручивания, а также эксцентриситета приложения нагрузки. Представлено решение тестовой задачи для консольной полимерной балки под действием сосредоточенной силы. В качестве закона ползучести используется нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича. Введена величина длительной критической нагрузки и показано, что при нагрузке меньше длительной критической ползучесть носит ограниченный характер. Установлено, что, как и для сжатых стержней, при нагрузке меньше длительной критической скорость роста перемещений во времени затухает. При  $F = F_{дл}$  перемещения растут с постоянной скоростью, и при  $F > F_{дл}$  скорость роста перемещений возрастает во времени. Полученные результаты подтверждают достоверность выбранной методики. **Вывод.** Получено универсальное разрешающее уравнение для расчета на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения, подходящее для произвольных законов ползучести.

**Ключевые слова:** устойчивость, плоская форма изгиба, ползучесть, численные методы, начальные несовершенства

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### CALCULATION OF THE FLAT BENDING SHAPE STABILITY OF RECTANGULAR CROSS SECTION BEAMS WITH REGARD TO CREEP

Ivan M. Zotov<sup>3</sup>, Anton S. Chepurnenko<sup>2</sup>, Serdar B. Yazyev<sup>1</sup>

<sup>1-3</sup>Don State Technical University,

<sup>1-3</sup>1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344002, Russia,

<sup>1</sup>e-mail:ps62@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail:anton\_chepurnenk@mail.ru, <sup>3</sup>e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru

**Abstract Objectives.** The article presents the conclusion of the resolving equation for calculating the stability of the flat form of deformation of prismatic beams, taking into account the rheological properties of the material. **Method.** The problem is reduced to a second-order differential equation for the twist angle, which is solved numerically by the finite difference method in combination with the Euler method. **Result.** The obtained differential equation allows one to take into account the presence of initial imperfections in the form of the initial deflection of the beam, the initial angle of twist, and also the eccentricity of the applied load. The solution of the test problem for a cantilever polymer beam under the action of a concentrated force is presented. The non-linear Maxwell-Gurevich equation is used as the creep law. The value of the long-term critical load is introduced and it is shown that with a load less than the long-term critical creep is limited. It has been established that, as with the squeezed rods, with a load less than the long-term critical, the growth rate of the displacements with time decays. When  $F = F_{dl}$ , the displacements grow at a constant speed, and when  $F > F_{dl}$ , the growth rate of displacements increases with time. The results obtained confirm the validity of the chosen method. **Conclusion.** A universal resolving equation is obtained for calculating the stability of a flat shape of bending of rectangular beams, suitable for arbitrary creep laws.

**Keywords:** stability, flat bending shape, creep, numerical methods, initial imperfections

**Введение.** При проектировании балок прямоугольного сечения в целях снижения расхода материала стремятся повысить отношение высоты поперечного сечения к ширине, откуда вытекает необходимость проверки конструкции на устойчивость плоской формы изгиба. Расчету призматических балок на устойчивость плоской формы деформирования посвящено большое количество работ, включая [1-9]. Однако во всех указанных публикациях решение выполняется в упругой постановке.

**Постановка задачи.** В настоящей работе будет рассмотрено решение данной задачи с учетом ползучести.

**Методы исследования. Вывод разрешающих уравнений.**

При выводе основного уравнения в качестве критерия устойчивости будем использовать критерий начальных несовершенств. Начальные неправильности задаются в виде начальной погиби  $v_0(x)$ , начального угла закручивания  $\theta_0(x)$  и эксцентриситета  $e$ . Критическое время при использовании указанного критерия определяется условно путем задания предельной величины перемещений или предельной скорости их роста.

Элемент балки после выпучивания представлен на рис. 1.

При боковом выпучивании балки в ней возникает крутящий момент  $M_x$ .

Сумму моментов запишем для оси  $x$  идеальной недеформированной балки:

$$M_x + dM_x + qdx \left( \frac{v + v_0 + (v + v_0 + d(v + v_0))}{2} + e + a(\theta + \theta_0) \right) - M_x = 0. \quad (1)$$

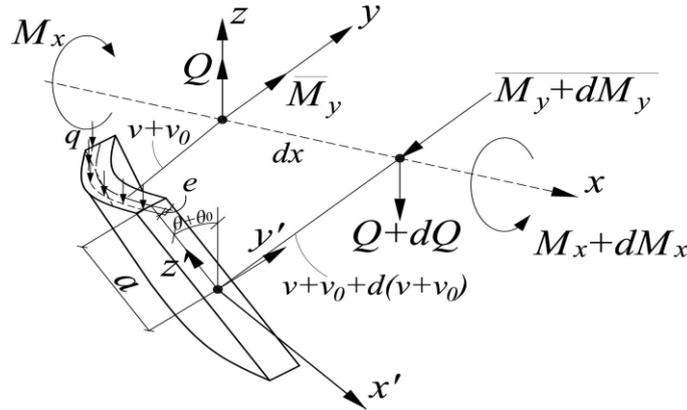


Рис.1. Элемент балки после деформации  
 Fig.1. Beam element after deformation

После отбрасывания величин более высокого порядка малости, получим:

$$\frac{dM_x}{dx} = -q(v + v_0 + e + a(\theta + \theta_0)). \quad (2)$$

Крутящий момент, действующий относительно оси  $x'$ , можно вычислить по формуле:

$$M_{x'} = M_x - Q(v + v_0) + M_y \left( \frac{dv}{dx} + \frac{dv_0}{dx} \right). \quad (3)$$

Для балки, испытывающей изгиб в двух плоскостях, полные линейные деформации на основе гипотезы плоских сечений можно определить по формуле:

$$\varepsilon_x = -y \frac{d^2v}{dx^2} - z \frac{d^2w}{dx^2}. \quad (4)$$

С другой стороны, полные деформации  $\varepsilon_x$  представляют сумму упругих деформаций и деформаций ползучести:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \varepsilon_x^*. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) и выражая напряжения через деформации, получим:

$$\sigma_x = -E \left( y \frac{d^2v}{dx^2} + z \frac{d^2w}{dx^2} + \varepsilon_x^* \right). \quad (6)$$

Изгибающие моменты вычисляются следующим образом:

$$M_y = - \int_A \sigma_x z dA; \quad M_{z'} = \int_A \sigma_x y dA. \quad (7)$$

Подставив (6) в (7), получим:

$$M_y = EI_y \frac{d^2w}{dx^2} - M_y^*; \quad M_{z'} = -EI_z \frac{d^2v}{dx^2} - M_{z'}^*, \quad (8)$$

где  $M_y^* = -E \int_A \varepsilon_x^* \cdot z dA$ ,  $M_{z'}^* = E \int_A \varepsilon_x^* \cdot y dA$ .

В работе [10] рассматривалась задача кручения стержней некруглого поперечного сечения с учетом ползучести, и была получена следующая связь между углом закручивания и крутящим моментом:

$$M_{x'} = M_k = GI_k \frac{d\theta}{dx} - M_k^*, \quad (9)$$

где  $M_k^* = G \int_A (-\gamma_{xy}^* z + \gamma_{xz}^* y) dA$ ,  $I_k$  – момент инерции при кручении.

Приравняв (9) к (3), получим:

$$GI_k \frac{d\theta}{dx} - M_k^* = M_x - Q(v + v_0) + M_y \left( \frac{dv}{dx} + \frac{dv_0}{dx} \right). \quad (10)$$

Продифференцируем далее равенство (10) по  $x$ , учитывая, что балка может иметь переменную жесткость, т.е. крутильная жесткость  $GI_k$  является функцией от  $x$ :

$$GI_{\kappa} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_{\kappa})}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_{\kappa}^*}{dx} = \frac{dM_x}{dx} - \frac{dQ}{dx} (v + v_0) - Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + \frac{dM_y}{dx} \frac{d(v + v_0)}{dx} + M_y \frac{d^2(v + v_0)}{dx^2}. \quad (11)$$

Подставим далее (2) в (11) и учтем, что  $\frac{dQ}{dx} = -q$ , а  $\frac{dM_y}{dx} = Q$ :

$$GI_{\kappa} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_{\kappa})}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_{\kappa}^*}{dx} = -q(v + v_0 + e + a(\theta + \theta_0)) + q(v + v_0) - Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + M_y \frac{d^2v}{dx^2} + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2}. \quad (12)$$

После упрощений равенство (12)(12) примет вид:

$$GI_{\kappa} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_{\kappa})}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_{\kappa}^*}{dx} = -q(e + a(\theta + \theta_0)) + M_y \frac{d^2v}{dx^2} + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2}. \quad (13)$$

Выразим из (8)(8) величину  $\frac{d^2v}{dx^2}$ :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M_{z'} + M_z^*}{EI_z}. \quad (14)$$

Учитывая, что  $M_{z'} = M_y(\theta + \theta_0)$ , перепишем равенство (14) в виде:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M_y(\theta + \theta_0)}{EI_z} - \frac{M_z^*}{EI_z}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (13), получим основное разрешающее уравнение:

$$GI_{\kappa} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_{\kappa})}{dx} \frac{d\theta}{dx} + \left( \frac{M_y^2}{GI_{\kappa}EI_z} + qa \right) \theta = \frac{dM_{\kappa}^*}{dx} - q(e + a\theta_0) + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2} - \frac{M_y M_z^*}{EI_z} - \frac{M_y^2 \theta_0}{EI_z}. \quad (16)$$

Для расчета вводится сетка по времени  $t$ , координате  $x$ , а также поперечное сечение разбивается на отрезки  $\Delta y$  и  $\Delta z$ .

На первом этапе выполняется решение уравнения (16)(16) методом конечных разностей при  $t = 0$ ,  $\varepsilon_x^* = 0$ ,  $\gamma_{xz}^* = \gamma_{xy}^* = 0$ ,  $M_{\kappa}^* = 0$ ,  $M_y^* = 0$ ,  $M_z^* = 0$ .

Определив из уравнения (16) угол закручивания  $\theta(x)$ , вычисляем для каждого сечения относительный угол закручивания  $\vartheta = \frac{d\theta}{dx}$ .

Далее для каждого сечения по  $x$  вычисляются касательные напряжения путем решения, полученного в [10] дифференциального уравнения:

$$\nabla^2 \Phi(y, z) + 2G\vartheta - G \left( \frac{\partial \gamma_{xz}^*}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}^*}{\partial z} \right) = 0, \quad (17)$$

где  $\Phi$  – функция напряжений, задаваемая формулами:

$$\tau_{xy} = \frac{\partial \Phi}{\partial z}; \tau_{xz} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (18)$$

Также определяются изменения кривизны.

Величина  $\frac{d^2v}{dx^2}$  определяется по формуле (14), а значения  $\frac{d^2w}{dx^2}$  можно вычислить по формуле:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M_y + M_y^*}{EI_y}. \quad (19)$$

Зная изменения кривизн, можно определить нормальные напряжения по формуле (6). Далее по величинам нормальных и касательных напряжений определяются скорости роста деформаций ползучести.

Затем при помощи метода Эйлера находятся деформации  $\gamma_{xz}^*, \gamma_{xy}^*, \varepsilon_x^*$  в момент времени  $t + \Delta t$ , а также величины  $M_x^*, M_y^*, M_z^*$ .

Далее процесс повторяется для следующего шага.

**Обсуждение результатов.** С целью контроля достоверности полученного уравнения и разработанной методики была решена тестовая задача для полимерной консольной балки из ПВХ, к которой приложена сила  $F$  с эксцентриситетом  $e$  (рис. 2).

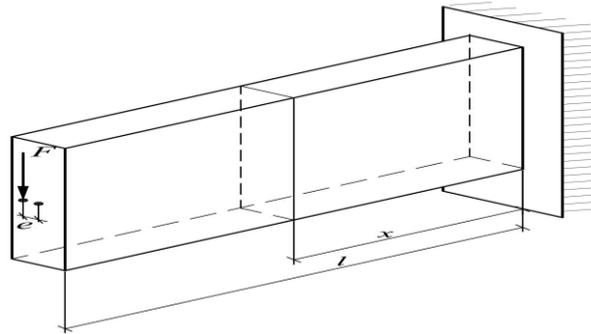


Рис.2. Расчетная схема  
 Fig.2. Design scheme

В качестве закона ползучести использовалось обобщенное уравнение Максвелла-Гуревича, имеющее вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^*}{\partial t} = \frac{f_{ij}^*}{\eta^*}, \quad i = (x, y, z), j = (x, y, z), \quad (20)$$

где  $\varepsilon_{ij}^*$  – деформации ползучести,  $f_{ij}^*$  – функции напряжений,  $\eta^*$  – релаксационная вязкость.

$$f_{ij}^* = \frac{3}{2}(\sigma_{ij} - p\delta_{ij}) - E_\infty \varepsilon_{ij}^*; \quad \frac{1}{\eta^*} = \frac{1}{\eta_0^*} \exp\left(\frac{|f_{\max}^*|}{m^*}\right). \quad (21)$$

В работе [11] для сжатых стержней, материал которых подчиняется нелинейному уравнению Максвелла-Гуревича вводится понятие длительной критической нагрузки.

При определении ее величины в выражении для мгновенной критической силы модуль упругости  $E$  заменяется на длительный модуль деформации  $E_{дл}$ .

В случае учета только одного члена спектра времен релаксации полимера выражение для длительного модуля  $E_{дл}$  принимает вид:

$$E_{дл} = \frac{E \cdot E_\infty}{E + E_\infty}. \quad (22)$$

Характер роста перемещений сжатого стержня с начальной погибью при ползучести зависит от того, в каком интервале находится величина сжимающей силы. Если она меньше длительной критической  $F_{дл}$ , то ползучесть носит ограниченный характер, и потеря устойчивости не происходит.

При  $F = F_{дл}$  рост перемещений происходит с постоянной скоростью, а если же  $F > F_{дл}$  то скорость роста перемещений во времени возрастает. При  $F \geq F_{дл}$  можно условно определить критическое время, ограничив величину максимального перемещения, либо скорость роста прогибов.

Для идеальной упругой балки потеря устойчивости плоской формы деформирования происходит при следующей величине критической силы [12]:

$$F_{кр} = \frac{4.01}{l^2} \sqrt{GI_k EI_z}. \quad (23)$$

Была введена величина длительной критической нагрузки по формуле:

$$F_{\text{дл}} = \frac{4.01}{l^2} \sqrt{G_{\text{дл}} I_{\text{к}} E_{\text{дл}} I_z}, \quad (24)$$

где  $G_{\text{дл}} = \frac{G \cdot G_{\infty}}{G + G_{\infty}}$ ,  $G_{\infty} = E_{\infty} / 3$ .

Исследовалось поведение балки при  $F < F_{\text{дл}}$ ,  $F = F_{\text{дл}}$  и  $F > F_{\text{дл}}$ .

Исходные данные принимались следующие:  $b = 1$  см,  $h = 10$  см,  $E = 1480$  МПа,  $E_{\infty} = 5990$  МПа,  $\eta_0^* = 9.04 \cdot 10^5$  МПа · мин,  $m^* = 12.6$  МПа,  $\nu = 0.3$ ,  $e = 0.01$  см.

Длительная критическая сила для рассматриваемой балки составляет  $F_{\text{дл}} = 0.0465$  кН.

На рис.3 представлены графики изменения во времени максимальной величины угла закручивания при трех значениях нагрузки ( $F = 0.044$  кН  $< F_{\text{дл}}$ ,  $F = 0.0465$  кН  $= F_{\text{дл}}$  и  $F = 0.048$  кН  $> F_{\text{дл}}$ ).

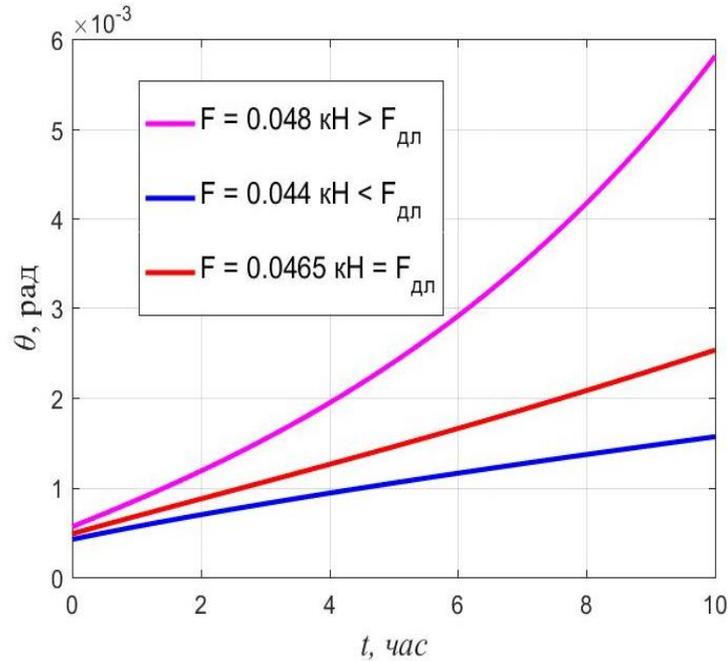


Рис.3. Изменение во времени максимального угла закручивания при различных величинах силы  $F$

Fig.3. The change in time of the maximum angle of twisting at different values of the force  $F$

Из рис. 3 видно, что, как и для сжатых стержней, при нагрузке меньше длительной критической скорость роста перемещений во времени затухает. При  $F = F_{\text{дл}}$  перемещения растут с постоянной скоростью, и при  $F > F_{\text{дл}}$  скорость роста перемещений возрастает во времени. Полученные результаты подтверждают достоверность методики.

**Вывод.** Получено универсальное разрешающее уравнение для расчета на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения, подходящее для произвольных законов ползучести и позволяющее учесть переменную жесткость, а также начальные несовершенства в виде начальной погиби, начального угла закручивания и эксцентриситета приложения нагрузки.

Исследовано явление бокового выпучивания балок при ползучести на примере консольной полимерной балки.

Введена величина длительной критической нагрузки и установлена аналогия с задачами устойчивости сжатых стержней при ползучести.

#### Библиографический список:

1. Карамышева, А.А. Расчет на устойчивость плоской формы деформирования односкатной балки / А.А. Карамышева, Н.И. Никора, С.Б. Языев // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2015. С. 32-35.

2. Карамышева, А.А. Расчет деревянных балок переменного сечения на устойчивость плоской формы изгиба при проектировании уникальных зданий и сооружений / А.А. Карамышева // Сборник статей II строительной международной студенческой школы-семинара института ПГС «Проблемы проектирования и строительства высотных, уникальных зданий и сооружений». – Ростов н/Д: «Каллиграф», 2016. – С. 44-48.
3. Карамышева, А.А. Выпучивание двухскатной балки при чистом изгибе / А.А. Карамышева, С.Б. Языев, А.Е. Дудник // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 35-37.
4. Карамышева, А.А. Расчет на устойчивость плоской формы изгиба балок переменной жесткости / А. А. Карамышева, С. Б. Языева, А. С. Чепурненко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2016. — № 1 (186). — С. 95-98.
5. Карамышева, А.А. Устойчивость плоской формы изгиба односкатной дощатоклееной балки / А.А. Карамышева, А.С. Чепурненко, Б.М. Языев // Научное обозрение. — 2016. — № 7. — С. 25-27.
6. Чепурненко, А. С. Численный расчет балок прямоугольного поперечного сечения на устойчивость плоской формы изгиба / А. С. Чепурненко, В. В. Ульяновская, Д. А. Высоковский, И. М. Зотов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4854>
7. Chepurnenko, A.S. Calculation of wooden beams on the stability of a flat bending shape enhancement / A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 196. – URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf\\_rsp2018\\_01003](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003)
8. Ищенко, А.В. Энергетический метод в расчетах балок прямоугольного поперечного сечения при боковом выпучивании / А.В. Ищенко, И.М. Зотов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №1. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5583>
9. Karamisheva, A.A. Calculation of Plane Bending Stability of Beams with Variable Stiffness / A.A. Karamisheva, S.B. Yazyev, A.A. Avakov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. pp. 1872-1877.
10. Andreev, V.I. Free Torsion of Viscoelastic Rod with Non-circular Cross-section / V.I. Andreev, A.S. Chepurnenko, B.M. Jazyev // Procedia Engineering. 2016. Vol.165. pp. 1147–1151.
11. Никора, Н.И. Определение длительных критических нагрузок для сжатых полимерных стержней при нелинейной ползучести / Н. И. Никора, А. С. Чепурненко, С. В. Литвинов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796).
12. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем. / А.С. Вольмир. М.: Наука, 1975. 984 с.

#### References:

1. Karamysheva, A.A. Raschet na ustoychivost' ploskoy formy deformirovaniya odnoskatnoy balki / A.A. Karamysheva, N.I. Nikora, S.B. YAzyyev // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 32-35. [Karamysheva, A.A. Calculation of the stability of the flat form of deformation of a single-beam beam / A.A. Karamysheva, N.I. Nikora, S.B. Yazyev // Actual problems of technical sciences in Russia and abroad. Collection of materials of the international scientific-practical conference. - Ufa: Aethern, 2015. - p. 32-35. (In Russ)]
2. Karamysheva, A.A. Raschet derevyannykh balok peremennogo secheniya na ustoychivost' ploskoy formy izgiba pri proyektirovaniy unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy / A.A. Karamysheva // Sbornik statey II stroitel'noy mezhdunarodnoy studencheskoy shkoly-seminara instituta PGS «Problemy proyekt-tirovaniya i stroitel'stva vysotnykh, unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy». – Rostov n/D: «Kalligraf», 2016. – S. 44-48. [Karamysheva, A.A. Calculation of wooden beams of variable cross section for the stability of the flat shape of the bend when designing unique buildings and structures / A.A. Karamysheva // Collection of articles of the II Construction International Student School-Seminar of the Institute of Industrial and Civil Engineering “Problems of the design and construction of high-rise, unique buildings and structures”. - Rostov n / a: “Calligrapher”, 2016. - p. 44-48. (In Russ)]
3. Karamysheva, A.A. Vypuchivaniye dvukhskatnoy balki pri chistom izgibe / A.A. Karamysheva, S.B. YAzyyev, A.Ye. Dudnik // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik ma-terialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 35-37. Karamysheva, A.A. Vypuchivaniye dvukhskatnoy balki pri chistom izgibe / A.A. Karamysheva, S.B. YAzyyev, A.Ye. Dudnik // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik ma-terialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 35-37. [Karamysheva, A.A. Buoyancy of a double-slope beam with a pure bend / A.A. Karamysheva, S.B. Yazyev, A.E. Dudnik // Actual Problems of Technical Sciences in Russia and Abroad. Collection of materials of the international scientific-practical conference. - Ufa: Aethern, 2015. - p. 35-37. (In Russ)]
4. Karamysheva, A.A. Raschet na ustoychivost' ploskoy formy izgiba balok peremennoy zhestkosti / A. A. Karamysheva, S. B. YAzyyeva, A. S. Chepurnenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki. — 2016. — № 1 (186). — S. 95-98. [ Karamysheva, A.A. Calculation of the stability of the flat shape of bending of beams of variable stiffness / A. A. Karamysheva, S. B. Yazyiyeva, A. S. Chepurnenko // News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Engineering. - 2016. - № 1 (186). - pp. 95-98. (In Russ)]
5. Karamysheva, A.A. Ustoychivost' ploskoy formy izgiba odnoskatnoy doshchatokleyenoy balki / A.A. Karamysheva, A.S. Chepurnenko, B.M. YAzyyev // Nauchnoye obozreniye. — 2016. — № 7. — S. 25-27 [Karamysheva, A.A. Stability

- of a flat form of bending of a single-sided glue-beam / A.A. Karamysheva, A.S. Chepurnenko, B.M. Yazyev // Scientific Review. - 2016. - № 7. - p. 25-27. (In Russ)]
6. Chepurnenko, A. S. Chislennyi raschet balok pryamougol'nogo poperechnogo secheniya na ustoychivost' ploskoy formy izgiba / A. S. Chepurnenko, V. V. Ul'yanskaya, D. A. Vysokovskiy, I. M. Zotov // In-zhenernyy vestnik Dona. – 2018. – №2. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/4854> [Chepurnenko, A. S. Numerical calculation of rectangular cross-section beams on the stability of a flat bend / A. S. Chepurnenko, V. V. Ulianskaya, D. A. Vysokovsky, I. M. Zotov // In-Donor Bulletin. 2018. №2. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/4854>(In Russ)]
7. Chepurnenko, A.S. Calculation of wooden beams on the stability of a flat bending shape enhancement / A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf\\_rsp2018\\_01003/mateconf\\_rsp2018\\_01003.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003/mateconf_rsp2018_01003.html) Chepurnenko, A.S. A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf\\_rsp2018\\_01003/mateconf\\_rsp2018\\_01003.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003/mateconf_rsp2018_01003.html) (In Russ)]
8. Ishchenko, A.V. Energeticheskiy metod v raschetakh balok pryamougol'nogo poperechnogo secheniya pri bo-kovom vypuchivaniy / A.V. Ishchenko, I.M. Zotov // Inzhenernyy vestnik Dona. – 2019. – №1. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5583> [Ishchenko, A.V. Energy method in calculations of rectangular cross-section beams with side bulging / A.V. Ischenko, I.M. Zotov // Engineering Herald of the Don. - 2019. - №1. - URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5583>(In Russ)]
9. Karamisheva, A.A. Calculation of Plane Bending Stability of Beams with Variable Stiffness / A.A. Kar-amisheva, S.B. Yazyev, A.A. Avakov // Procedures Engineering. - 2016. - Vol. 150. - Pp. 1872-1877.
10. Andreev, V.I. Free Torsion of Viscoelastic Rod with Non-circular Cross-section / V.I. Andreev, A.S. Chepurnenko, B.M. Jazyev // Procedia Engineering. - 2016. - Vol.165. Pp. 1147–1151.
11. Nikora, N.I. Opredeleniye dlitel'nykh kriticheskikh nagruzok dlya szhatykh polimernykh sterzhney pri nelineynoy polzuchesti / N. I. Nikora, A. S. Chepurnenko, S. V. Litvinov // Inzhenernyy vestnik Dona. — 2015. — № 1. —URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796). [Nikora, N.I. Determination of long-term critical loads for compressed polymer rods with nonlinear creep / N.I. Nikora, A.S. Chepurnenko, S.V. Litvinov // Dona Engineering Bulletin. 2015. № 1.URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796).
12. Vol'mir, A. S. Ustoychivost' deformiruyemykh sistem. / A.S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1975. – 984 s. [Volmir, A.S. Stability of deformable systems. / A.S. Volmir. - M.: Science, 1975. 984 p.1. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Зотов Иван Михайлович** – аспирант кафедры «Сопrotивление материалов».

**Чепурненко Антон Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопrotивление материалов».

**Языев Сердар Батырович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика».

**Information about authors:**

**Ivan M. Zotov** - Postgraduate Student, Department "Strength of Materials".

**Anton S. Chepurnenko** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department "Strength of Materials".

**Serdar B. Yazyev** - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department "Technical mechanics".

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Поступила в редакцию** 17.02.2019.

**Received** 17.02.2019.

**Принята в печать** 27.03.2019.

**Accepted for publication** 27.03.2019.

**Для цитирования:** Карпов Д. Ф., Сеницын А. А. Возможности комплексного контроля энерго-экологических характеристик строительных конструкций на исследовательском стенде. Технические науки. 2019; 46 (1): 177-186. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-177-186

**For citation:** Karpov D. F., Sinityn A. A. Possibilities of integrated control of energy and environmental characteristics of building structures at the research bench. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 177-186. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-177-186

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.133

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-177-186

### ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ СТЕНДЕ

**Карпов Д.Ф.<sup>2</sup>, Сеницын А. А.<sup>1</sup>**

<sup>1,2</sup> Вологодский государственный университет,

<sup>1,2</sup> 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: nee-energo@yandex.ru, <sup>2</sup> e-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru

**Резюме. Цель.** Обозначены и проанализированы актуальные в настоящее время вопросы энергетической и экологической безопасности строительных объектов и обслуживающих их инженерных систем климатизации. **Метод.** Используя тепловые методы и средства контроля теплоэнергетических параметров в переходных условиях подвода и отвода энергии в системе «источник энергии – приемник энергии», рассмотрена возможность идентификации ее силовых и потоковых характеристик, определяющих и формирующих процессы и режимы, отражающие основные количественные и качественные уровни текущих энергоформопреобразований. **Результат.** Предложены варианты решения данной проблемы посредством комплексного контроля некоторых энерго-экологических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений на лабораторно-экспериментальном научно-исследовательском стенде «источник энергии – приемник энергии». Представлены алгоритм идентификации термодинамических сил, потоков, свойств, изменения и воспроизводства энтропии в системе «источник энергии – приемник энергии», функциональная модель и иерархическое представление трехуровневой открытой термодинамической системы «источник энергии – приемник энергии», некоторые результаты расчетно-экспериментального определения экоэнергетических характеристик фрагмента ограждающей строительной конструкции на примере кирпичной стенки. **Вывод.** Предположено и доказано, что опыт совместного использования законов неравновесной и феноменологической термодинамики для исследования и моделирования неравновесных термодинамических процессов, протекающих в системах различного рода, позволяет контролировать их экологическое состояние и повышает точность прогнозирования затрат и рационального использования энергоресурсов.

**Ключевые слова:** окружающая среда, экологическая безопасность, энерго- и ресурсосбережение, строительные конструкции, строительная обложка, потоки, силы, свойства, энтропия

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### POSSIBILITIES OF INTEGRATED CONTROL OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF BUILDING STRUCTURES AT THE RESEARCH BENCH

*Denis F. Karpov<sup>2</sup>, Anton A. Sinitsyn<sup>1</sup>*

*Vologda State University,*

*15 Lenin Str., Vologda 160000, Russia,*

*<sup>1</sup>e-mail: nee-energo@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru*

**Abstract Objectives.** *The current topical issues of energy and environmental safety of construction sites and the air-conditioning systems that serve them are identified and analyzed. **Method.** Using thermal methods and means of controlling heat and power parameters in transitional conditions of energy supply and removal in the system “energy source - energy receiver”, the possibility of identifying its power and flow characteristics that determine and form the processes and modes reflecting the basic quantitative and qualitative levels of current energy transformations. **Result.** Options have been proposed to solve this problem through the integrated monitoring of some energy-ecological characteristics of the building structures of buildings and structures at the laboratory-experimental research stand “energy source - energy receiver”. The algorithm for identification of thermodynamic forces, flows, properties, changes and reproduction of entropy in the system “energy source - energy receiver”, a functional model and hierarchical representation of a three-level open thermodynamic system “energy source - energy receiver” are presented, some calculated results -experimental determination of the eco-energy characteristics of a fragment of the building envelope by the example of a brick wall. **Conclusion.** It has been suggested and proved that the experience of joint use of the laws of nonequilibrium and phenomenological thermodynamics for research and modeling of nonequilibrium thermodynamic processes occurring in systems of various kinds, allows you to control their ecological state and increases the accuracy of forecasting costs and rational use of energy resources.*

**Keywords:** *environment, environmental safety, energy and resource saving, building structures, construction area, flows, forces, properties, entropy*

**Ведение.** В настоящее время вопросы экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения, повышения энергетической эффективности являются приоритетными и становятся все более актуальными.

Энергетическая стратегия России [1] и Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» [2] направлены на решение этих жизненно важных проблем. В [1, 2] рассматриваются следующие мероприятия: энергосбережение в теплоэнергетических комплексах, жилищно-коммунальном хозяйстве, энергоемких отраслях промышленности; производство энергосберегающей электротехники, приборов учета и регулирования; введение классов энергоэффективности объектов различного назначения; проведение энергообследований, энергоаудитов, мониторингов и др.

Значительное внимание также уделяется повышению экологической безопасности и стабилизации экологической обстановки в стране и мире [3, 4]. Причем особое место занимают вопросы идентификации тепловых загрязнений окружающей среды через различные типы строительных конструкций и разработки методологических особенностей моделирования количественной и качественной оценки диссипативных и аккумуляционных свойств в них при различных теплоэнергетических воздействиях с учетом процессов энергоформопреобразования [5, 6].

В [4] говорится о том, что экологическая безопасность строительных объектов и обслуживающих их инженерных систем климатизации вызывает широкий интерес у специалистов. В последнее время эта тема приобрела особую актуальность в силу объективной необходимости и

реакции общественности на рост числа примеров изменения климата и окружающей среды в результате жизнедеятельности человека.

Необходимость проектирования зданий, сооружений, систем кондиционирования микроклимата с учетом их экологичности возникла именно как следствие такого положения, и Киотский протокол, подписанный большинством стран, явился определяющим фактором в практическом применении данной концепции.

В сфере строительства зданий и сооружений, оборудованных системами климатизации, экологически безопасной считается такая взаимосвязь строительного объекта и инженерных систем, которая на протяжении всего срока службы обеспечивает их эффективную эксплуатацию при соблюдении следующих условий [4, 7]: минимальные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, в частности, веществ, способствующих созданию парникового эффекта, глобальному потеплению, выпадению кислотных дождей; минимальные объемы потребляемой энергии из невозобновляемых источников, сокращение энергопотребления и энергосбережение; минимальные объемы твердых и жидких отходов, в том числе от ликвидации самого строительного объекта и утилизации частей инженерного оборудования по истечении срока службы и выработке ресурса; минимальное влияние на экосистемы окружающей среды по месту нахождения объекта; наилучшее качество микроклимата в помещениях зданий и сооружений, санитарно-эпидемиологическая безопасность помещений, оптимальный температурно-влажностный режим, высокое качество воздуха, качественная акустика, освещение.

**Постановка задачи.** За последнее десятилетие и ранее разработано немало технологий, способствующих существенному увеличению экологической безопасности проектов. К приоритетным способам борьбы с тепловыми загрязнениями относятся [3, 8]: утилизация теплоты удаляемого воздуха для подогрева приточного; использование теплоты солнечной радиации; применение систем с регенерацией теплоты; использование теплонаносных и абсорбционных систем; автономная выработка электрической энергии.

К сожалению возможности инструментального измерения большинства загрязнителей и экологической безопасности жилища или отсутствуют, или недостаточно развиты. Особую опасность представляет собой экологическая обстановка в помещениях многоэтажных зданий современного массового строительства с естественной вентиляцией.

Таким образом, в связи с тепловым загрязнением окружающей среды через ограждающие строительные конструкции возникают проблемы более строгого учета переменных режимов работы подобного рода систем через уточнение ранее созданных различного рода моделей и методик расчета.

В частности возникает задача по регулированию и оценке качества воспринимаемой и отдаваемой энергии строительной конструкцией или оболочкой. При этом необходимо учитывать аккумуляционные свойства эксплуатируемой системы.

Переходные режимы работы системы обычно возникают под действием внешних и внутренних факторов. Таковыми являются потоковые воздействия окружающей среды на внешние ее поверхности и источники тепловыделения внутри оболочки. Внешние и внутренние воздействия осуществляются за счет необратимых процессов теплообмена: конвекции, излучения и теплопроводности.

Расчет переходных режимов работы теплообменной системы наталкивается на многие трудности, связанные с тем, что уравнения, описывающие условия связи между средами, включают в себя коэффициенты, которые получены для стационарных условий работы строительной конструкции. Не учет нестационарности приводит к значительным отличиям в результатах расчетов. Так, в [9] приводятся примеры, показывающие, что для отдельных случаев превышения расчетного перепада температуры над нормативным составляет 25-55 %. А не учет раздельного влияния, например излучения и конвекции, дает различие в 15 % по сравнению с наблюдаемыми значениями [10]. С другой стороны вопросы оптимального управления расходом энергии в такого рода системах поставлены многими исследователями. На это указывает список литературы [9]. Авторы пишут о задачах оптимального управления, в которых ставится вопрос о том,

какое схемное решение нужно выбрать, чтобы показатель эффективности имел наибольшую величину. В данном случае выбор идет между мощностью источника излучения и теплоемкостью приемника энергии. Учет этих соотношений может привести к экономии энергии до 50 %.

**Методы исследования.** В последнее время обсуждается возможность использования для получения обобщенной функции энергетического состояния системы понятия энтропии [11, 12]. В [12] упоминается о возможности определения термодинамического состояния бетона с помощью функции его энергетического состояния – энтропии.

Однако упоминается лишь о возможности построения модели воспроизводства энтропии в системе через термодинамические потоки и силы. В [12] указывается на возможность путем регулирования скорости изменения энтропии управлять процессом ее воспроизводства. В [13] подробно рассматривается проблема описания неравновесных процессов в энергетических системах методами равновесной термодинамики.

Авторы говорят о том, что расширение спектра и усложнения задач термодинамического анализа, делают актуальными создание равновесных описаний необратимых процессов переноса в энергетических установках. Эти описания должны составить новый виток в развитии классической равновесной термодинамики. Хотя указывается на необходимость поиска новых соотношений между формализмами разделов неравновесной и равновесной термодинамики.

В [9, 10] рассматриваются возможности учета связи энергетического потенциала внутри здания, его строительной оболочке и окружающей среде. Однако не рассматриваются термодинамические особенности такого рода явлений комплексно, чтобы была возможность в одном исследовании определять не только обобщенную функцию состояния системы, но и свойства материала, регулируемые условиями связи системы с окружающей средой. Комплексное рассмотрение задачи в рамках модели «состав-строение-свойство» приведено в работе [12]. Однако не рассмотрены проблемы описания динамического режима работы системы через потоки и силы.

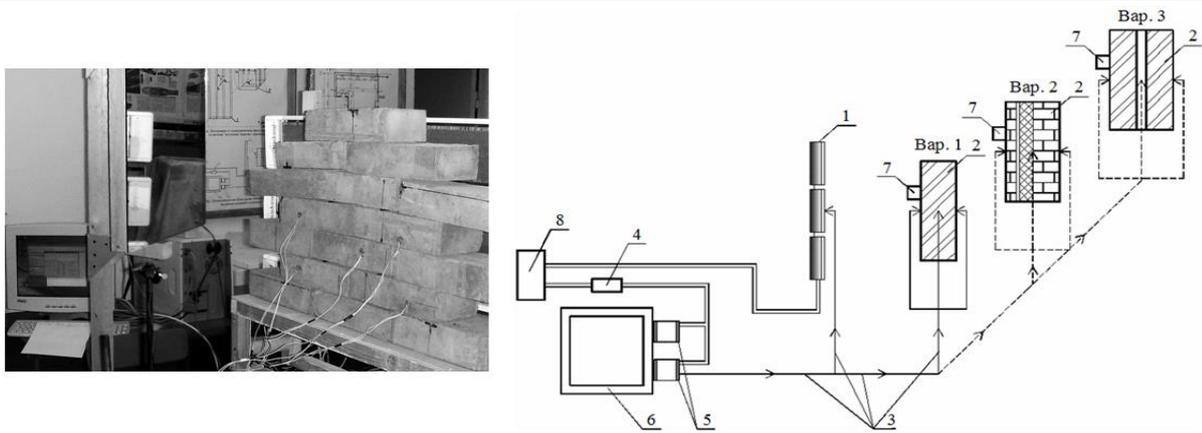
Методика энергопредставления через потоки и силы позволяет получать новые зависимости, указывающие на направление и степень отклонения переходного режима в системе с неравновесными процессами.

Алгоритм может быть использован для анализа различных энерготехнологических систем. В общем виде такого рода исследования можно найти в работах И. Дьярмрти, И. Р. Пригожина, А. В. Лыкова, Ю. А. Михайлова. Преимущества такого представления описываются в [11, 14–17].

**Обсуждение результатов.** Основной целью настоящей работы является представление возможности комплексного контроля энерго-экологических характеристик строительных конструкций на лабораторно-экспериментальном научно-исследовательском стенде «источник энергии – приемник энергии» (рис. 1).

Используя тепловые методы и средства контроля теплоэнергетических параметров в переходных условиях подвода и отвода энергии в системе «источник энергии – приемник энергии» [18, 19], рассмотрим вопрос идентификации ее силовых и потоковых характеристик, определяющих и формирующих процессы и режимы, отражающие основные количественные и качественные уровни текущих энергоформопреобразований.

Данный стенд является модернизируемым универсальным схмотехническим измерительно-вычислительным комплексом, служащим для выполнения научно-исследовательских и учебно-лабораторных работ, состоящим из ряда структурных взаимозаменяемых элементов, комбинации которых позволяют собирать и демонстрировать разнообразные технологические решения, реализующие основные процессы энергоформопреобразования энергии [20]. Универсальность исследовательского стенда вытекает из условий его открытости как технически организуемой системы.



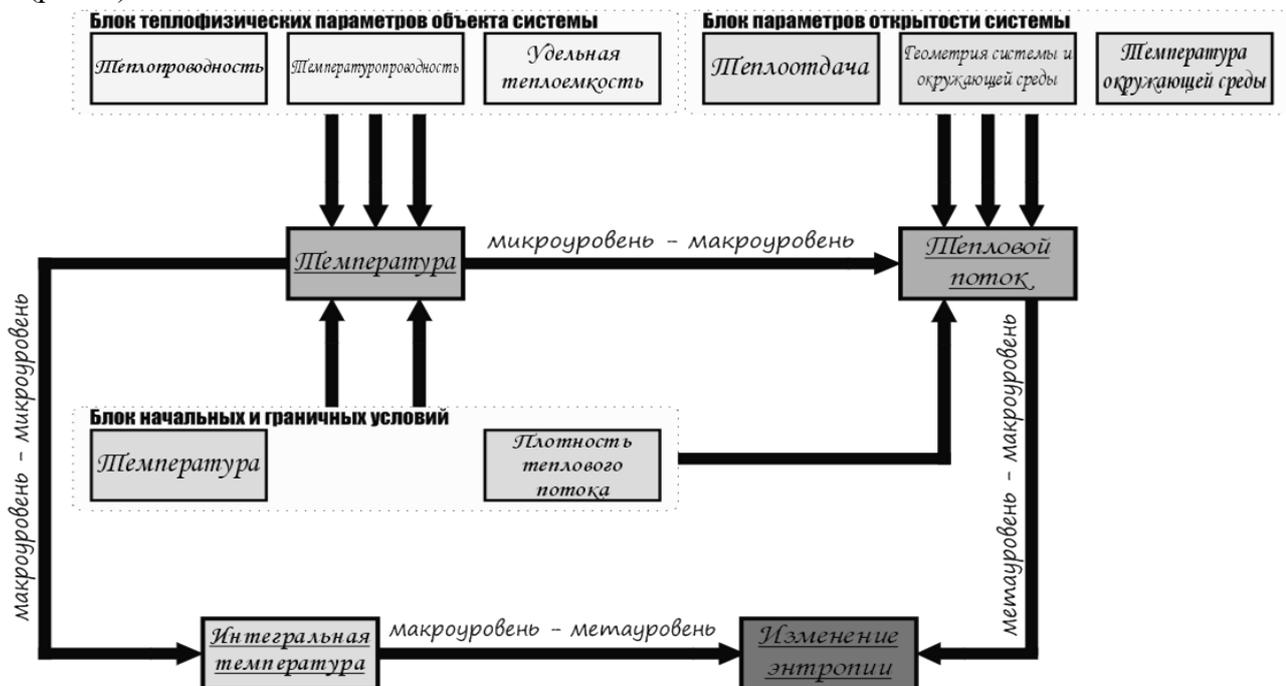
**Рис. 1. Лабораторно-экспериментальный научно-исследовательский стенд «источник энергии – приемник энергии»:** 1 – источник энергии; 2 – приемник энергии (различные варианты ограждающих строительных конструкций); 3 – система термопреобразователей; 4 – электрический понижающий блок питания; 5 – блоки аналого-цифрового преобразователя; 6 – персональный компьютер; 7 – измеритель плотности теплового потока; 8 – сеть – источник электрической энергии

**Fig. 1. Laboratory experimental research stand “energy source - energy receiver”:** 1 - energy source; 2 - energy receiver (various options for enclosing building structures); 3 - system of thermal converters;

4 - electric step-down power supply; 5 - blocks of analog-to-digital converter; 6 - personal computer; 7 - heat flux density meter; 8 - network - source of electrical energy

Свойство открытости дает возможность формировать различного типа термодинамические установки, собирая источники и приемники энергии в той или иной последовательной энергетической связи с соответствующими, для изучаемых режимных условий преобразования энергии приборным, информационным, программным обеспечением.

Для обработки экспериментальной информации разработаны алгоритмы и программы, позволяющие идентифицировать термодинамические силы, потоки, свойства, изменение и воспроизводство энтропии в элементах в зависимости от начальных и граничных условий в системе (рис. 2).



**Рис. 2. Алгоритм идентификации термодинамических сил, потоков, свойств, изменения и воспроизводства энтропии в системе «источник энергии – приемник энергии»**

**Fig. 2. Algorithm of identification of thermodynamic forces, flows, properties, changes and reproduction of entropy in the system "energy source - energy receiver"**

С целью составления потокового энергетического и энтропийного функционала для системы, выявления оптимальных условий воздействия на неё окружающей среды, определения коэффициентов преобразования и трансформации энергии, коэффициента полезного действия, разработана обобщенная блок-схема преобразования энергии (рис. 3).

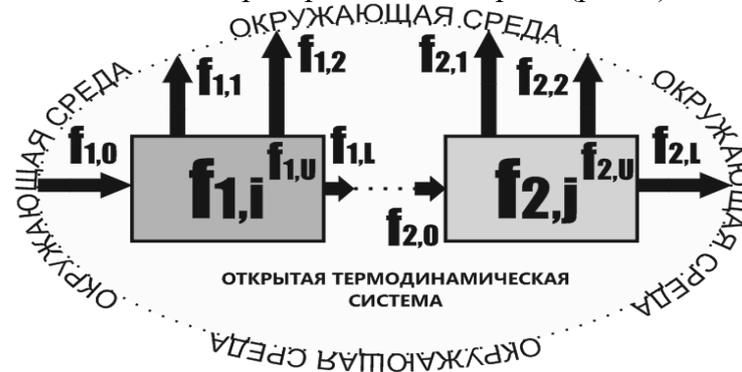


Рис. 3. Функциональная модель открытой термодинамической системы «источник энергии – приемник энергии»:

$f_{1,i}$  – источник энергии – электрический инфракрасный излучатель ( $f_{1,0}$  – форма энергии в виде электричества,  $f_{1,U}$  – изменение внутренней энергии,  $f_{1,L}$  – полезная работа,  $f_{1,1}$  – диссипация энергии в виде конвекции,  $f_{1,2}$  – диссипация энергии в виде излучения);  $f_{2,j}$  – приемник энергии: фрагмент ограждающей строительной конструкции ( $f_{2,0}$  – форма энергии в виде инфракрасного электромагнитного излучения,  $f_{2,U}$  – изменение внутренней энергии,  $f_{2,L}$  – полезная работа,  $f_{2,1}$  – диссипация энергии в виде конвекции,  $f_{2,2}$  – диссипация энергии в виде излучения)

Fig. 3. Functional model of an open thermodynamic system "energy source - energy receiver":

$f_{1,i}$  - energy source - electric infrared emitter ( $f_{1,0}$  - form of energy in the form of electricity,  $f_{1,U}$  - change in internal energy,  $f_{1,L}$  - useful work,  $f_{1,1}$  - energy dissipation in the form of convection,  $f_{1,2}$  - energy dissipation in the form of radiation);  $f_{2,j}$  - energy receiver: a fragment of the building envelope ( $f_{2,0}$  is the form of energy in the form of infrared electromagnetic radiation,  $f_{2,U}$  is the change in internal energy,  $f_{2,L}$  is useful work,  $f_{2,1}$  is energy dissipation in the form of convection,  $f_{2,2}$  - energy dissipation in the form of radiation)

На рис. 4 показано иерархическое представление трехуровневой системы «источник энергии – приемник энергии». Применение системного структурного анализа к системам типа «источник энергии – приёмник» показало, что одним и тем же алгоритмом описывается множество производственных схем.

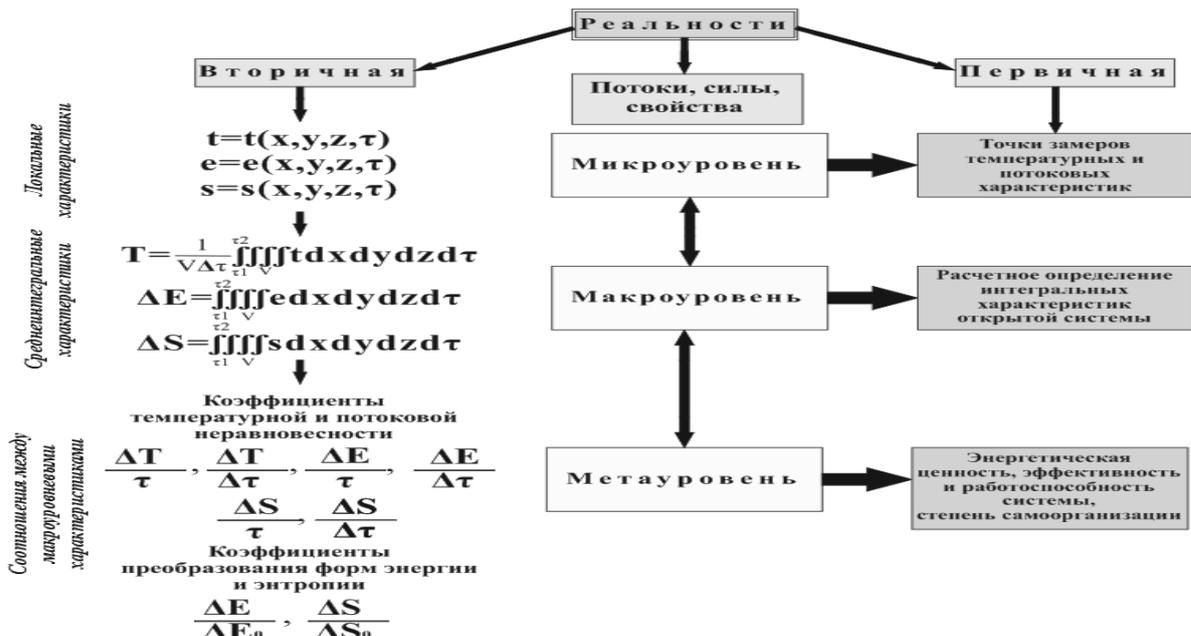


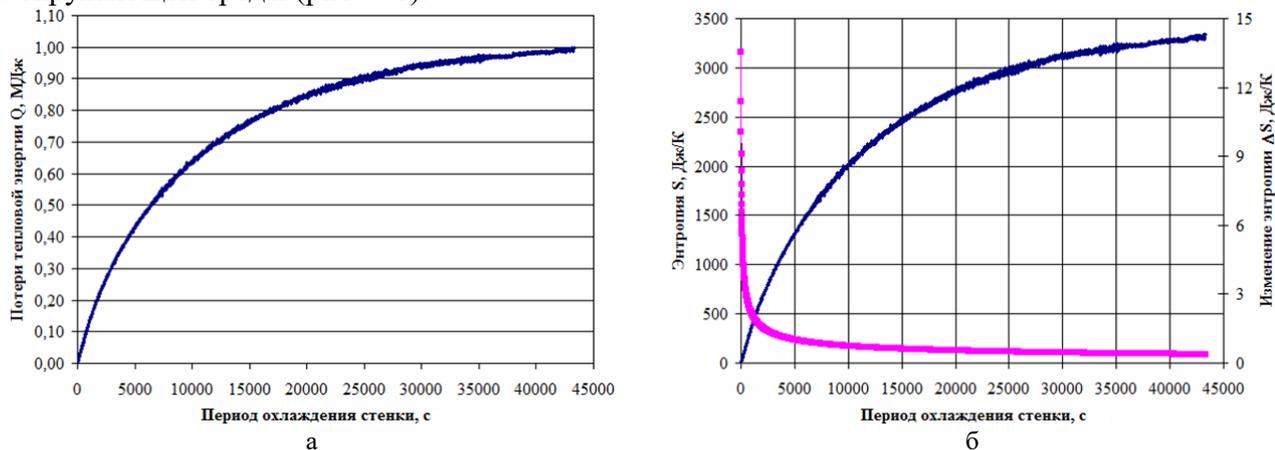
Рис. 4. Иерархическое представление трехуровневой системы «источник энергии – приемник энергии»

Fig. 4. Hierarchical representation of the three-level system “energy source - energy receiver”

На рис. 5 представлены некоторые результаты определения энерго-экологических характеристик ограждающей строительной конструкции на примере фрагмента стенки из керамического кирпича на исследовательском стенде.

Потоки энергии, входящие в систему и выходящие из неё (рис. 5 а), от всех источников теплоты, создают суммарный поток, направленный к приемнику энергии.

Входящий суммарный поток учитывает энергетическое состояние окружающих приемник энергии предметов, имеющих более высокий температурный потенциал. Для выходящего суммарного потока выполняются условия конечной разности потенциалов относительно потенциала окружающей среды (рис. 5 б).



**Рис. 5. Некоторые результаты определения энерго-экологических характеристик строительной конструкции: а – потери теплоты строительной конструкцией в окружающую среду; б – параметры неравновесности системы «источник энергии – приемник энергии»**

**Fig. 5. Some results of determining the energy-ecological characteristics of the building structure: a - heat loss by the building structure to the environment; b - non-equilibrium parameters of the system “energy source - energy receiver”**

**Вывод.** Итогами проведенного исследования являются следующие положения:

1. Разработан и сконструирован лабораторно-экспериментальный научно-исследовательский стенд, позволяющий контролировать комплекс энерго-экологических характеристик строительных конструкций. Стенд позволяет методами имитационного моделирования воспроизводить условия работы локальной строительной экотехнической системы.

2. Представлены алгоритм идентификации термодинамических сил, потоков, свойств, изменения и воспроизводства энтропии в системе «источник энергии – приемник энергии», функциональная модель и иерархическое представление трехуровневой открытой термодинамической системы «источник энергии – приемник энергии», некоторые результаты расчетно-экспериментального определения экоэнергетических характеристик фрагмента ограждающей строительной конструкции на примере кирпичной стенки.

3. На основе блока коэффициентов теплофизической и температурной неравновесности (рис. 2) сформированы функции управления энергетическим состоянием фрагмента ограждающей строительной конструкции на примере кирпичной стенки, позволяющие контролировать степень теплового загрязнения окружающей источник и приемник энергии среды и с большей точностью прогнозировать параметры микроклимата в жилых и общественных зданиях и сооружениях.

4. Разработаны принципы и методика контроля и прогнозирования теплоэнергетического загрязнения локальной окружающей среды в виде локального строительного объема с работающей в нем системе типа «источник энергии – приемник энергии».

5. Предложенная модель исследования процессов теплообмена с использованием понятий неравновесной термодинамики, позволяет проводить оценку аккумуляционного энергетического состояния системы при различных сценариях ее термостимулирования с последующим ра-

циональным использованием для регулирования степени загрязнения окружающей среды, в которую помещен исследовательский стенд.

6. В качестве наглядного примера применимости предложенной методики представлены некоторые графические результаты определения энерго-экологических характеристик строительной конструкции: потерь теплоты и энтропии.

#### **Библиографический список:**

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715-р. – М.: Правительство РФ. – 104 с.
2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ // Ведомости Федерального Собрания Российской Федерации. – М.: ООО «Рид Групп», 2012. – 80 с.
3. Табунщиков, Ю.А. Экологическая безопасность жилища / Ю.А. Табунщиков // НП «АВОК», 2007. – № 4. – С. 4-7.
4. Шилкин Н.В. Экологическая безопасность. Взаимосвязь здания и инженерного оборудования / Н.В. Шилкин // НП «АВОК», 2006. – № 4. – С. 70-83.
5. Амерханов Р.А. Основы расчетно-экспериментального подхода при исследовании тепловых режимов зданий / Р.А. Амерханов // Энергосбережение и водоподготовка, 2007. – № 3. – С. 48-49.
6. Бегдай С.Н. Экспериментальные исследования сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции / С.Н. Бегдай // Энергосбережение и водоподготовка, 2007. – № 4 (48). – С. 69-70.
7. Дацюк, Т.А. Инженерные аспекты энергосбережения зданий / Т.А. Дацюк // Academia. Архитектура и строительство. Строительные науки. – М.: НИИСФ РААСН, 2009. – С. 313-318.
8. Еремкин, А.И. Тепловой режим зданий: учеб. пособие для вузов / А.И. Еремкин, Т.И. Королева // Ростов-на-Дону, Феникс. – 2008. – 363 с.
9. Табунщиков, Ю.А. Расчет теплопотерь помещения при раздельном учете конвективного и лучистого теплообмена / Ю.А. Табунщиков // НП «АВОК», 2007. – № 8. – С. 32-35.
10. Табунщиков Ю.А. Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // Academia. Архитектура и строительство. Строительные науки. – М.: НИИСФ РААСН, 2009. – С. 277-282.
11. Игонин В.И. Пути повышения эффективности теплоэнергетических систем: монография / В.И. Игонин. – Вологда: ВоГТУ. – 2007. – 119 с.
12. Грызлов, В.С. Элементы термодинамики бетона: учеб. пособие. / В.С. Грызлов, Е.В. Меньшикова. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ. – 2005. – 169 с.
13. Игонин В. И. К расчетно-экспериментальному определению энергетических параметров и балансовой модели теплообмена в приемнике лучистой энергии / В.И. Игонин, Д.А. Белянский. – Самара: Вестник СГТУ. – 2009. – № 1 (23). – С. 175-183.
14. Игонин В.И. Некоторые результаты применения белого инфракрасного излучателя / В.И. Игонин, В.Н. Чучин, Д.А. Белянский // НП «АВОК», 2007. – № 4. – С. 72-74.
15. Игонин В.И. Энтропийная модель элемента промышленной теплоэнергетической системы / В.И. Игонин, Д.В. Титов. – Череповец: Вестник ЧГУ, 2007. – № 3. – С. 42-54.
16. Игонин В.И. Методологические особенности эффективного энергоиспользования и энергосбережения / В.И. Игонин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования. – Вологда, ВоГТУ. – 2008. – Т. 1. – С. 16-20.
17. Игонин В.И. К локально-модульной организации лучисто-конвективного энергообмена элемента промышленной теплоэнергетической системы / В.И. Игонин, В.Н. Чучин, Д.В. Титов // Вестник МАИ, 2007. – Т. 14. – № 4. – С. 4.
18. George S., Goravar, S., Mishra, D., Shyamsunder, M.T., Sharma, P., Padmashree, G.K., Kumar, P.S., Bremond, P., Mukherjee, K. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography // Insight, 2010. – Vol. 52. – No. 9. – Pp. 470-474.
19. Vijayraghavan G.K., Majumder, M.C., Ramachandran, K.P. NDTE using flash thermography: numerical model and analysis of delaminations in GRP pipes // Insight, 2010. – Vol. 52. – No. 9. – Pp. 481-487.
20. Пат. 2379668 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ теплового неразрушающего контроля рабочего тела / В.И. Игонин, Д.Ф. Карпов; заявитель и патентообладатель Вологодский государственный технический университет. – № 2008140634/28; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.01.2010. – Б. и. – 2010. – № 2.

#### **References:**

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 13.11.2009 № 1715-r. – М.: Pravitel'stvo RF. – 104 s. [Russia's energy strategy for the period until 2030: Order of the Government of the Russian Federation of 13.11.2009 No. 1715-r. - M.: Government of the Russian Federation. - 104 s.(In Russ)]

2. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii: Feder. zakon ot 23 noyabrya 2009 g. № 261-FZ // Ve-domosti Federal'nogo Sobraniya Rossiyskoy Federatsii. – M.: OOO «Rid Grupp», 2012. – 80 s. [On energy saving and on increasing energy efficiency and on introducing changes to certain legislative acts of the Russian Federation: Feder. Law of November 23, 2009 No. 261-FZ // The Bodies of the Federal Assembly of the Russian Federation. - M.: OOO Reed Group, 2012. - 80 p. (In Russ)]
3. Tabunshchikov, YU.A. Ekologicheskaya bezopasnost' zhilishcha / YU.A. Tabunshchikov // NP «AVOK», 2007. – № 4. – S. 4-7. [Tabunshchikov, Yu.A. Ecological safety of the dwelling / Yu.A. Tabunshchikov // NP "AVOK", 2007. - № 4. - p. 4-7. (In Russ)]
4. Shilkin, N.V. Ekologicheskaya bezopasnost'. Vzaimosvyaz' zdaniya i inzhenernogo oborudovaniya / N.V. Shilkin // NP «AVOK», 2006. – № 4. – S. 70-83. [Shilkin, N.V. Environmental Safety. The relationship of the building and engineering equipment / N.V. Shilkin // NP "AVOK", 2006. - № 4. - p. 70-83. (In Russ)]
5. Amerkhanov, R.A. Osnovy raschetno-eksperimental'nogo podkhoda pri issledovanii teplovykh rezhimov zdaniy / R.A. Amerkhanov // Energosberezheniye i vodopodgotovka, 2007. – № 3. – S. 48-49. [Amerkhanov, R.A. Fundamentals of the experimental design approach in the study of thermal modes of buildings / R.A. Amerkhanov // Energy Saving and Water Treatment, 2007. - № 3. - p. 48-49. (In Russ)]
6. Begday, S.N. Eksperimental'nyye issledovaniya soprotivleniya teploperedache naruzhnoy ograzhda-yushchey konstruksii / S.N. Begday // Energosberezheniye i vodopodgotovka, 2007. – № 4 (48). – S. 69-70. [Begay, S.N. Experimental studies of the heat transfer resistance of the outer building envelope / S.N. Begay // Energy Saving and Water Treatment, 2007. - № 4 (48). - pp. 69-70. (In Russ)]
7. Datsyuk, T.A. Inzhenernyye aspekty energosberezheniya zdaniy / T.A. Datsyuk // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. Stroitel'nyye nauki. – M.: NIISF RAASN, 2009. – S. 313-318. [Datsyuk, T.A. Engineering aspects of energy saving buildings / TA Datsyuk // Academia. Architecture and construction. Building science. - M.: NIISF RAACS, 2009. - p. 313-318. (In Russ)]
8. Yeremki, A.I. Teplovoy rezhim zdaniy: ucheb. posobiye dlya vuzov / A.I. Yeremkin, T.I. Koroleva // Rostov-na-Donu, Feniks. 2008. 363 s. [Eremkin, A.I. Thermal regime of buildings: studies. manual for universities / A.I. Yeremkin, T.I. Queen // Rostov-on-Don, Phoenix. 2008. 363 s. (In Russ)]
9. Tabunshchikov YU.A. Raschet teplopoter' pomeshcheniya pri razdel'nom uchete konvektivnogo i luchistogo teploobmena / YU.A. Tabunshchikov // NP «AVOK», 2007. – № 8. – S. 32-35 [Tabunshchikov, Yu.A. Calculation of heat loss of a room with separate accounting of convective and radiant heat exchange / Yu.A. Tabunshchikov // NP "AVOK", 2007. - № 8. - p. 32-35. (In Russ)]
10. Tabunshchikov YU.A. Eksperimental'nyye issledovaniya optimal'nogo upravleniya raskhodom ener-gii / YU.A. Tabunshchikov, M.M. Brodach // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. Stroitel'nyye nauki. – M.: NIISF RAASN, 2009. S. 277-282. [Tabunshchikov, Yu.A. Experimental studies of optimal energy consumption control / Yu.A. Tabunshchikov, MM Brodach // Academia. Architecture and construction. Building science. - M.: NIISF RAACS, 2009. p. 277-282. (In Russ)]
11. Igonin V.I. Puti povysheniya effektivnosti teploenergeticheskikh sistem: monografiya / V.I. Igonin. – Vologda: VoGTU. 2007. – 119 s. [Igonin, V.I. Ways to improve the efficiency of heat and power systems: monograph / V.I. Igonin. - Vologda: VSTU. - 2007. - 119 p. (In Russ)]
12. Gryzlov, V.S. Elementy termodinamiki betona: ucheb. posobiye. / V.S. Gryzlov, Ye.V. Men'shikova. – Cherepovets: GOU VPO CHGU. – 2005. – 169 s. [Gryzlov, V.S. Elements of thermodynamics of concrete: studies. allowance. / V.S. Gryzlov, E.V. Menshikov. - Cherepovets: GOU VPO ChGU. - 2005. - 169 p. (In Russ)]
13. Igonin, V. I. K raschetno-eksperimental'nomu opredeleniyu energeticheskikh parametrov i balan-sovoy modeli teploobmena v priyemnike luchistoy energii / V.I. Igonin, D.A. Belyanskiy. – Samara: Vestnik SGTU. – 2009. – № 1 (23). – S. 175-183. [Igonin, V.I. About calculation-experimental determination of energy parameters and balance-balance model of heat exchange in a receiver of radiant energy / V.I. Igonin, D.A. Belyansky. - Samara: Herald of SSTU. - 2009. - № 1 (23). - p. 175-183. (In Russ)]
14. Igonin, V.I. Nekotoryye rezul'taty primeneniya belogo infrakrasnogo izluchatelya / V.I. Igonin, V.N. Chuchin, D.A. Belyanskiy // NP «AVOK», 2007. – № 4. – S. 72-74. [Igonin, V.I. Some results of the use of a white infrared emitter / V.I. Igonin, V.N. Chuchin, D.A. Belyansky // NP "AVOK", 2007. - № 4. - p. 72-74. (In Russ)]
15. Igonin, V.I. Entropiynaya model' elementa promyshlennoy teploenergeticheskoy sistemy / V.I. Igonin, D.V. Titov. – Cherepovets: Vestnik CHGU, 2007. № 3. S. 42-54. [Igonin, V.I. Entropy model of an element of an industrial heat energy system / V.I. Igonin, D.V. Titov. Cherepovets: Bulletin of ChGU, 2007. № 3. pp. 42-54. (In Russ)]
16. Igonin, V.I. Metodologicheskiye osobennosti effektivnogo energoispol'zovaniya i energosbere-zheniya / V.I. Igonin // Avtomatizatsiya i energosberezheniye mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo pro-izvodstv, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniya. – Vologda, VoGTU. – 2008. – T. 1. – S. 16-20. [Igonin, V.I. Methodological features of efficient energy use and energy saving / V.I. Igonin // Automation and energy saving of machine-building and metallurgical production, technology and reliability of machines, devices and equipment. Vologda, VSTU. 2008. V. 1. pp. 16-20. (In Russ)]
17. Igonin V.I. K lokal'no-modul'noy organizatsii luchisto-konvektivnogo energoobmena elementa promyshlennoy teploenergeticheskoy sistemy / V.I. Igonin, V.N. Chuchin, D.V. Titov // Vestnik MAI, 2007. – T. 14. – № 4. – S. 4. [Igon-

in, V.I. On the local-modular organization of the radiant-convective energy exchange of an element of an industrial heat-energy system / V.I. Igonin, V.N. Chuchin, D.V. Titov // Bulletin of the MAI, 2007. T. 14. № 4. p. 4 (In Russ)]

18. George S., Goravar, S., Mishra, D., Shyamsunder, MT, Sharma, P., Padmashree, GK, Kumar P.S, Bremond, P., Mukherjee, K. Stress monitoring and analysis using lock- in thermography // Insight, 2010. Vol. 52. No. 9. pp. 470-474.

19. Vijayraghavan G.K., Majumder, M.C., Ramachandran, K.P. NDTE using flash thermography: GRP pipes for modellling and analysis of delaminations in GRP pipes // Insight, 2010. Vol. 52. No. 9. pp. 481-487.

20. Pat. 2379668 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01N 25/18. Sposob teplovogo nerazrushayushchego kon-trolya rabocheho tela / V.I. Igonin, D.F. Karpov; zayavitel' i patentoobladatel' Vologodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. – № 2008140634/28; zayavl. 13.10.2008; opubl. 20.01.2010. B/ 2010. № 2. [Pat. 2379668 Russian Federation, IPC G01N 25/18. The method of thermal non-destructive control of the working fluid / V.I. Igonin, D.F. Karpov; applicant and patent holder Vologda State Technical University. - No. 2008140634/28; declare October 13, 2008; publ. 01/20/2010. B. 2010. № 2.(In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Карпов Денис Федорович** – старший преподаватель.

**Синицын Антон Александрович** - кандидат технических наук, доцент.

**Information about authors:**

**Denis. F. Karpov** - Senior Lecturer.

**Anton A. Sinitsyn** - Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 18. 02.2019.

**Принята в печать** 27.03.2018.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 18.02.2019.

**Accepted for publication** 27.03.2018.

**Для цитирования:** Кокоев М.Н., Федоров В.Т., Хаджишалапов Г.Н. Ветроэнергетика в производстве пеностекла и керамзита. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1):187-194. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-187-194

**For citation:** Kokoev M.N., Fedorov V.T., Hadgishalapov G.N. Wind energy in the manufacture of penostekl and keramzit Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(1):187-194. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-187-194

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 621.548 : 691.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-187-194

### ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОСТЕКЛА И КЕРАМЗИТА

Кокоев М.Н.<sup>1</sup>, Федоров В.Т.<sup>2</sup>, Хаджишалапов Г.Н.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

<sup>1,2</sup>360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

<sup>3</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>3</sup>367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [kbagrostroy@yandex.ru](mailto:kbagrostroy@yandex.ru), <sup>2</sup>e-mail: [fedorovsteer@gmail.com](mailto:fedorovsteer@gmail.com), <sup>3</sup>e-mail: [yarus-x@mail.ru](mailto:yarus-x@mail.ru)

**Резюме. Цель.** Пеностекло и керамзит абсолютно пожаробезопасные, надежные и экологически чистые теплоизоляторы. Но в себестоимости их производства затраты на энергоресурсы достигают 40...60 %. **Метод.** Предложено часть тепловой энергии, необходимой для производства стройматериалов, вырабатывать ветроэлектрической станцией (ВЭС). **Результат.** Разработана теплофикационная ВЭС с турбиной Дарье, способной работать в тяжелых климатических условиях. Несущая часть ветросиловой установки состоит из трех простых мачт, работающих преимущественно на сжатие. Мачты симметрично расставлены относительно центра ВЭС. Особенность конструкции в том, что вертикальный вал с турбиной подвешен вверху на вертлюге в точке, где сходятся три почти горизонтальных каната. Свободные концы канатов проходят через блоки на вершинах мачт и закреплены анкерами на уровне земли. Поэтому вал работает преимущественно на растяжение и кручение и хорошо противостоит поперечным колебаниям. На ВЭС работает простой генератор без аппаратуры для регулирования напряжения и частоты тока, так как для электронагревателей печей, на которые подается ток генератора, кондиционирование электроэнергии не требуется. При уменьшении скорости ветра и падении мощности ВЭС автоматика подает больше топлива в горелки для поддержания температуры по регламенту. **Вывод.** Таким образом, мощность ВЭС восполняет часть потребной тепловой мощности печей, а недостающую часть тепловой мощности компенсируют сжиганием газа или мазута. Если ВЭС находится вблизи предприятия, то электроэнергия подается потребителю без трансформаторов. Дешевле проложить кабели увеличенного сечения, чем комплектовать ВЭС двумя силовыми трансформаторами.

**Ключевые слова:** пеностекло, керамзит, энергоёмкость, теплофикационная ветроэлектрическая станция, тяжелые климатические условия

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### WIND ENERGY IN THE MANUFACTURE OF PENOSTEKL AND KERAMZIT

Mohammed N. Kokoev<sup>1</sup>, Victor T. Fedorov<sup>2</sup>, Gadzhimagomed N. Hadgishalapov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> H.M. Berbekov Kabardino-Balkar State University,

<sup>1,2</sup> 173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

<sup>3</sup> Daghestan State Technical University,

<sup>3</sup> 70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>1</sup> e-mail: [kbagrostroy@yandex.ru](mailto:kbagrostroy@yandex.ru), <sup>2</sup> e-mail: [fedorovsteer@gmail.com](mailto:fedorovsteer@gmail.com), <sup>3</sup> e-mail: [yarus-x@mail.ru](mailto:yarus-x@mail.ru)

**Abstract Objectives.** Foamglass and expanded clay are absolutely fireproof, reliable and environmentally friendly heat insulators. But in the cost of their production, energy costs reach 40 ... 60%. **Method.** A part of the thermal energy required for the production of building materials was proposed to be developed by a wind power station (WPP). **Result.** A heating plant with a Darya turbine capable of operating in severe climatic conditions has been developed. The bearing part of the wind power installation consists of three simple masts, working mainly in compression. The masts are symmetrically placed relative to the center of the wind farm. The design feature is that the vertical shaft with the turbine is suspended at the top of the swivel at the point where the three almost horizontal cables meet. The free ends of the ropes pass through the blocks on the tops of the masts and are secured with anchors at ground level. Therefore, the shaft works mainly in tension and torsion and is well opposed to transverse vibrations. A simple generator without equipment for voltage and frequency regulation operates at WPPs, as for electric heaters of furnaces to which the generator current is supplied, power conditioning is not required. With a decrease in wind speed and a drop in HPP power, the automation supplies more fuel to the burners to maintain the temperature according to the regulations. **Conclusion.** Thus, the WPP capacity fills a part of the required heat output of the furnaces, and the missing part of the heat output is compensated by burning gas or fuel oil. If the WPP is located near the enterprise, then electricity is supplied to the consumer without transformers. It is cheaper to lay cables of a larger section than to complete a wind farm with two power transformers.

**Keywords:** foam glass, expanded clay, energy intensity, heating wind power station, severe climatic conditions

**Введение.** По комплексу свойств на сегодняшний день самый надежный и безопасный строительный теплоизолятор – это пеностекло и керамзит. Действительно, пеностекло пожаробезопасно и может работать в очень широком интервале температур (50...900 К) – от теплоизоляции криогенного оборудования до паропроводов атомных электростанций. А также, конечно, и в обычном строительстве и на предприятиях.

Пеностекло имеет высокую биостойкость, не повреждается грызунами, имеет достаточную прочность и не подвержено деформации от времени. Теплоизоляционная эффективность пеностекла почти равна пенополистиролу – 0,04...0,65 Вт/м·С [1,2]. Только лишь вакуумно-порошковые теплоизоляционные изделия, появившиеся в последние годы, имеют более высокие теплоизоляционные свойства [3-5]. Известна попытка еще больше увеличить теплоизоляционные свойства пеностекла [6]. Пеностекло имеет в 2-5 раза большую плотность (90...250 кг/м<sup>3</sup> и выше), чем пенопласты. Но более высокая плотность пеностекла компенсируется прочностью, влагостойкостью, стабильностью своих свойств, долговечностью и другими преимуществами. Плитки из пеностекла вполне могут заменить многие другие материалы, применяемые сейчас [7] для облицовки зданий под штукатурку или другие лицевые покрытия.

Сырье для производства пеностекла – это обычно бой строительного стекла, а также использованная стеклотара. Только в Москве ежегодно собирается более 50 тысяч тонн стеклобоя [8]. Так что расширение производства пеностекла одновременно решает проблему утилизации

стеклобоя, поскольку потребность в пеностекле строительной отрасли, энергетики и промышленности большая. Газообразующие добавки в шихту - тонкий порошок кокса, сажа, мел, известь и другие, недефицитны и их количество небольшое - от 1 до 5 % от массы силикатных материалов [9].

Основные недостатки пеностекла: сложность поддержания технологических параметров для выпуска пеностекла со стабильными потребительскими свойствами; высокая энергоёмкость производства. Первый недостаток можно существенно уменьшить, к этому есть техническая основа – применение более совершенных датчиков, регулирующей аппаратуры и компьютерных программ.

Вторая проблема – высокая энергоёмкость процесса, есть следствие длительности нагрева силикатных, и вообще минеральных порошков до высокой температуры и последующей выдержки для вспучивания и отжига материала. Кроме того, дробление и измельчение сырья до частиц размером 50...100 мкм тоже энергоёмкий процесс. К тому же тратится на измельчение самый дорогой вид энергоресурса - электроэнергия.

Многое из сказанного выше о пеностекле можно отнести к свойствам и производству другого стройматериала - керамзита. Это лёгкий пористый материал, получаемый путём обжига легкоплавкой глины или глинистого сланца при температуре 1200...1300 °С. Керамзитовый гравий имеет насыпную плотность от 250 до 800 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности керамзита находится в пределах 0,07...0,18 Вт/м °С [10]. Керамзит производят в виде гравия, щебня и песка.

Как видим, у керамзита не такие высокие теплоизоляционные свойства и плотность много выше, чем у пеностекла, но и цена керамзита в 3...6 раз ниже, чем у пеностекла. А если сравнивать керамзитовый гравий не с гранулами из пеностекла, а с плитами и фасонными изделиями, то цена у пеностекла будет еще выше. Керамзит абсолютно пожаробезопасен, его теплопроводность в несколько раз ниже простого бетона, а экологические свойства и стабильность во времени также высоки, как у пеностекла. Керамзит имеет достаточную прочность в качестве заполнителя легкого бетона. Насыпной слой толщиной 10 см из мелкого керамзита равноценен по теплоизоляции кирпичной кладке толщиной 1 метр. Керамзит производится из дешевого сырья. Главный недостаток у керамзита тот же, что у пеностекла – в производстве керамзит весьма энергоёмкий.

В себестоимости производства цемента, строительной керамики и керамзита в частности, а также стекла, стекловолокна, пеностекла, минерального волокна, арматурной стали затраты на энергоресурсы составляют от 40 до 60 %. Кроме того, большое потребление топлива этими предприятиями наносит ущерб экологии. Особенно вредно сжигание топочного мазута, у которого обычно большая примесь серы, которая порождает кислотные дожди. В производстве пеностекла и керамзита в основном используют газ и мазут. Сейчас возросли трудности в пополнении запасов технически пригодных к разработке месторождений нефти и газа. Это основная причина роста цен на топливо и, соответственно, на строительные материалы. Экологи постоянно указывают на нарастающий ущерб природе от непомерного сжигания ископаемых топлив.

Некоторые страны достигли прекрасных результатов в деле использования возобновляемых источников энергии. Например, в 2017 году на долю «чистой» энергетики в Германии приходилось 36 % вырабатываемой энергии [11], основная часть которой производится от солнца и ветра. Но особенно велики успехи КНР - доля «чистой» установленной мощности за счет энергии солнца и ветряных генераторов в Китае в 2017 году равна 277 ГВт. Это на 41 ГВт больше, чем мощность всей энергетики России, включая все российские ГЭС, ТЭС и АЭС от Калининграда до Владивостока [12].

**Постановка задачи.** Как снизить энергоёмкость производства и тем самым уменьшить себестоимость пеностекла, керамзита и аналогичных материалов? Известны обычные меры снижения потерь тепла и электроэнергии в производстве энергоёмких материалов - это улучшение теплоизоляции оборудования, применение средств автоматизации техпроцессов, исполь-

зование рекуператоров и теплообменников, подогревающих воздух на входе в топочные устройства, использование попутного тепла в смежных технологических процессах и социальных объектах.

**Методы исследования.** Новый путь – это использование источников тепловой энергии, не требующих постоянного расхода углеводородного топлива.

В данной работе рассматривается именно второй путь, то есть восполнение части энергии на производство за счет применения ветровой энергии путем разработки специализированной ветроэлектрической станции.

Такой подход предполагает учет двух факторов: применение более экономичных технических решений; учет местных климатических и других условий.

1. Технические решения. Западноевропейские ветроэлектрические станции (ВЭС) большой мощности от 0,5 до 6 МВт с горизонтальной осью вращения турбины ориентированы на выработку электроэнергии со стандартными напряжением и частотой тока. На вершине мощной мачты, высотой до 120 м и выше, в гондоле известных ВЭС размещены сложные агрегаты - специальный планетарный редуктор, генератор на тысячи киловатт, системы охлаждения масла для редуктора и привода, а также автоматика и гидропривод для поворота лопастей на заданный угол атаки и поворота всей гондолы с ротором на ветер [13,14]. Масса гондолы на вершине мачты достигает 50 тонн.

Кроме того, обычно в основании мачты из композита размещены шкафы с оборудованием для преобразования и регулирования параметров тока с целью выдачи мощности в общую сеть. Таким образом, сложное электротехническое и электронное оборудование ВЭС, предназначенных для работы с региональными сетями, удорожают ветроустановки на 40...50 %. Вырабатывать часть тепловой энергии для предприятия стройматериалов должна ВЭС существенно более простой конструкции.

2. Об учете местных условий. В Германии, Дании, Голландии и др. странах Западной Европы, где высока плотность населения и больше нет свободных территорий, нашли применение дорогостоящие, но компактные по занимаемой площади ВЭС с горизонтальной осью вращения ротора. Выше подробно сказано об этих станциях. Напротив, есть страны и территории со многими свободными участками. В этих странах можно ставить ВЭС любой строительной схемы с почти неограниченной площадью. Например, в Канаде, где свободных территорий очень много, особенно севернее широты Ванкувера и Виннипега, находят применение ВЭС с вертикальной осью вращения. Это так называемые ВЭС с ротором Дарье [15].

Но главные местные условия – это наличие достаточного ветрового потенциала в месте строительства ВЭС для предприятия стройматериалов. А также должна быть обеспечена экономичная доставка сырья и отправка готовой продукции потребителям. В России богаты ветровой энергией не только берега северных морей от Белого моря до Охотского, но и более населенные места, например, берега Каспийского моря [16]. И во многих других местах России есть подходящий ветер, например, в Саратовской и Ростовской области, на Ставрополье и др. [17]. Он не такой мощный и постоянный как на мысе Лопатка, что на юге Камчатки, но вполне годится для работы теплофикационных ВЭС.

**Обсуждение результатов.** В последнее время появились аналитические работы, где показано, что вертикально-осевые установки с ротором Дарье во многих случаях применения имеют существенные конструктивные и экономические преимущества по сравнению с горизонтально-пропеллерными ВЭС [18]. Одним из главных достоинств вертикально-осевых установок то, что их работа не зависит от направления ветра, поэтому отпадает необходимость в сложных механизмах ориентации ротора на ветер.

Во-вторых, у них редуктор и генератор стоят внизу, что сильно упрощает установку и ее обслуживание. Вследствие этого такие ВЭС более просты и поэтому имеют меньшую стоимость и более надежны. Достигнутые к настоящему времени фактические коэффициенты использования энергии ветра у горизонтально-пропеллерных ветроагрегатов и вертикально-осевых установок мало отличаются. Несколько меньшая эффективность вертикально-осевых

установок есть следствие того, что центр тяжести ометаемой площади у них находится ближе к земле, а у поверхности земли скорость ветра меньше. Кроме того, установки с вертикальным ротором менее опасны для птиц, так как перемещение в горизонтальном направлении вертикальной лопасти ротора Дарье птицы лучше видят. Маневр уклонения от удара птицам легче удаётся в горизонтальной плоскости.

Другое важное преимущество вертикально-осевых ВЭС в том, что у них лопасть ротора технологически во много раз проще лопастей пропеллерных установок. Лопасть ротора Дарье – это прямоугольная и симметричная относительно хордовой плоскости деталь, которую удобно изготавливать методом экструзии из сплавов алюминия или армированных стекловолокном светостойких полимеров.

В известных вертикально-осевых ВЭС вал ротора выполняет одновременно роль мачты. Поэтому в таких установках вал выполняют в виде трубы большого диаметра. На вершину вала надета мощная втулка с радиально-упорным подшипником. К втулке прикреплены серьги, на которых закреплены растяжки (ванты) для фиксации вала в вертикальном положении. Растяжки идут от втулки на вершине вала вниз к анкерам, установленным на уровне земли. Поэтому, в частности, ротор не может иметь большой диаметр, так как лопасти вверху могут задеть растяжки [15]. Это ограничивает мощность установки при данной высоте мачты.

Для противодействия сильному ветру натяжение растяжек выполняют большим. Поэтому вал ротора в такой установке работает одновременно на кручение и большое продольное сжатие от натяжения растяжек. Нагруженный продольной силой сжатия длинный вал подвержен потере устойчивости по Эйлеру. Устойчивость вала еще больше снижается от действия на него поперечных колебаний от турбулентных воздушных потоков. Поэтому это сильно повышает риск поломки известных ВЭС при штормовом и шквалистом ветре и сильных снегопадах.

В России запатентована экономичная теплофикационная ВЭС новой конструкции, способной работать в тяжелых климатических условиях [19, 20]. Несущая часть ветросиловой установки состоит, из трех простых мачт, работающих преимущественно на сжатие. Мачты симметрично расставлены относительно центра ветросиловой установки. Особенность конструкции в том, что здесь вертикальный полый вал ротора не работает одновременно на сжатие, кручение и изгиб, как это обычно бывает в известных ВЭС. В новой разработке вал работает только на растяжение и кручение. Для этого он подвешен вверху на вертлюге в точке, где сходятся три почти горизонтальных каната, свободные концы которых переброшены через блоки на вершинах мачт и закреплены анкерами на уровне земли.

Нижний конец вала ротора с помощью муфты соединяется с валом редуктора. С помощью нижнего мощного радиально-упорного подшипника и растяжек, закрепленных на фундаменте, вал ротора нагружают определенной растягивающей нагрузкой для ограничения поперечных колебаний. Это позволяет уменьшить диаметр и массу вала ротора при одновременном повышении его устойчивости при штормовом ветре.

Таким образом, редуктор и электрогенератор находятся в боксе на уровне земли. Увеличение площади земельного участка под теплофикационную ВЭС новой конструкции в российских условиях в большинстве случаев не имеет особого значения.

На теплофикационной ВЭС используют простой электрогенератор. Станция работает без аппаратуры для поддержания частоты и напряжения электрического тока, так как для электронагревателей, используемых на предприятии стройматериалов, нет нужды в таком регулировании. Потому что для электронагревателей печей, кондиционирование электроэнергии не требуется. При колебаниях скорости ветра и, соответственно, изменении мощности генератора, автоматика подает больше или меньше газа или мазута в горелки для поддержания заданной температуры в печи в соответствии с технологическим регламентом. Поэтому мощность ВЭС восполняет какую-то часть потребной тепловой мощности печей, а недостающую часть тепловой энергии компенсируют сжиганием топлива.

Одновременное использование двух источников тепловой энергии в производстве керамзита – электрической и сжигание топлива дает большие технологические преимущества.

Потому что для вспучивания глиняных гранул нужно, чтобы активное газовыделение совпало по времени с переходом глины в пиропластическое состояние.

Например, температура диссоциации карбоната магния - до 600 °С, карбоната кальция – до 950 °С, дегидратация глинистых минералов происходит при температуре до 800 °С. А реакции восстановления окислов железа развиваются при температуре порядка 900 °С, тогда как в пиропластическое состояние глины переходят при температурах выше 1100 °С [10,21].

При обжиге сырцовых гранул в производстве керамзита в нужный момент необходим быстрый подъем температуры. Так как при медленном обжиге значительная часть газов выходит из глины до ее размягчения и в результате получаются сравнительно плотные мало вспученные гранулы. Но в существующих вращающихся печах топливо обычно сжигается у выходного края печи. Чтобы быстро нагреть гранулы в нужный момент до пиропластического состояния, то есть до температуры вспучивания, можно поставить в определенных местах печи дополнительный электрический подогрев. Появляется возможность оперативно регулировать температуру.

**Вывод.** При оптимальном распределении температуры по длине трубной печи, что получается при подпитке печей энергией ВЭС, можно получить высокосортные легкие гранулы керамзита. Кроме того, появляется возможность оперативно настраивать распределение температуры по зонам печи в зависимости от свойств партий поступающего сырья.

Если ВЭС находится вблизи предприятия, то электроэнергия подается потребителю без трансформаторов. Дешевле и проще проложить кабели увеличенного сечения, чем комплектовать ВЭС двумя силовыми трансформаторами.

#### Библиографический список:

1. Артамонова М. В. Химическая технология стекла и ситаллов. - М.: Стройиздат, 1983. - 432 с.
2. Архаров А. М. Криогенные системы. Основы проектирования аппаратов и установок. М.: Машиностроение. - 1987. - 536 с. Arkharov A.M. Cryogenic systems. Fundamentals of apparatus and installations. М.: Mechanical Engineering. -1987. -536 p.
3. Патент РФ 2144595. Вакуумное теплоизоляционное изделие /
4. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. - 1997. RF patent 2144595. Vacuum insulation product / Kokoev, M.N., Fedorov, V.T. - 1997.
5. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Теплоизоляционное изделие с предельно низкой материалоемкостью // Строительные материалы - 1998, N 9.- С. 10-12. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Thermal insulation product with extremely low material consumption // Construction materials - 1998, N 9.- P. 10-12.
6. R. Caps, J. Fricke, Konzepte fuer den Einsatz von evakuierten Daemmungen bei Passivhaeusern, Tagungsband 4. Passivhaus-Tagung, Kassel - 2000.
7. Федоров В.Т. Вакуумированное пеностекло - новый теплоизолятор. // Вестник Кабардино-Балкарского госуниверситета. Серия физические науки, вып. N 8. - 2003. - С. 53-54. Fedorov V.T. Vacuum foam glass is a new heat insulator. // Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University. A series of physical sciences, vol. N 8. - 2003. - p. 53-54.
8. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Энергосберегающая вакуумно-порошковая панель для облицовки зданий. // Вестник Отделения строительных наук РААСН, 2010 г., Том 2, С. 219-226. Fedorov V.T., Kokoev M.N. Energy-saving vacuum powder panel for lining buildings. // Bulletin of the Department of Building Sciences RAACS, 2010, Volume 2, p. 219-226.
9. Пеноситалл. Foamsitall. [http://www.penosytal.com/compare\\_asr.html](http://www.penosytal.com/compare_asr.html) - 2018.
10. Наназашвили И.Х. Строительные материалы, изделия и конструкции. Справочник. - М.: Высшая школа, 1990. - 495 с. Nanazashvili I.Kh. Construction materials, products and designs. Directory. - М.: Higher School, 1990. - 495 p.
11. Онацкий С.П. Производство керамзита. - М.: Стройиздат, -1971. - 312 с. Onatsky S.P. Production of expanded clay. - М.: stroiizdat, - 1971. - 312 p.
12. Umwelt Bundesamt BRD - <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo>. - 2017.
13. "Чистая" энергия Китая. China's clean energy. <https://econet.ru/articles/178717> - 2017.
14. Erich Nau. Windkraftanlagen. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2008. 910 Seiten.
15. Твайделл Дж., Уэйр А. Ветроэнергетика // Возобновляемые источники энергии. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 393 с. 14. Twidell J., Ware A. Wind Energy // Renewable Energy Sources. - М.: Energoatomizdat, 1990. - 393 p.

16. DOE's 500-kW variable speed Darrieus machine <http://www.awea.org/faq/vawt.html>
17. Ветры в Республике Дагестан - 2017. Winds in the Republic of Dagestan - 2017. <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/severnyij-kavkaz/respublika-dagestan>
18. Карта ветров России - 2017. Map of the Winds of Russia - 2017. <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii>
19. Сравнительный анализ ветрогенераторов. Comparative analysis of wind turbines. <http://www.ecoteco.ru/index.php?id=1198> - 2010.
20. Патент РФ 2454564. Ветроциловая установка с ротором Дарье / Федоров В.Т., Бевов Р.К. - 2010. Patent of the Russian Federation 2454564. Wind power installation with Darya rotor / Fedorov V.T., Bevov R.K. - 2010.
21. Кокоев М.Н. Теплофикационная ветросиловая установка // Энергия: экономика, техника, экология. - 2007. - N 3. - С.18-22. Kokoyev M.N. Heating wind power installation // Energy: economy, technology, ecology. - 2007. - N 3. - P.18-22.

### References:

1. Artamonov M.V. Chemical technology of glass and glass bottles. - М.: stroiizdat, 1983. - 432 p. [Artamonov M.V. Chemical technology of glass and glass ceramics. - М.: stroiizdat, 1983. - 432 p. Artamonov M.V. Chemical technology of glass and glass bottles. - М.: Stroiizdat, 1983. - 432 p. (In Russ)]
2. Arkharov A. M. Kriogennyye sistemy. Osnovy proyektirovaniya apparatov i ustano-vok. М.: Mashinostroyeniye. - 1987. - 536 s. Arkharov A.M. Cryogenic systems. Fundamentals of apparatus and installations. М.: Mechanical Engineering. -1987. -536 p. [Arkharov A.M. Cryogenic systems. Fundamentals of apparatus design and installation. М.: Mechanical Engineering. - 1987. - 536 s. Arkharov A.M. Cryogenic systems. Fundamentals of apparatus and installations. М.: Mechanical Engineering. -1987. 536 p. (In Russ)]
3. Patent RF 2144595. Vakuumnoye teploizolyatsionnoye izdeliye / Kokoyev M.N., Fedorov V.T. - 1997. RF patent 2144595. Vacuum insulation product / Kokoyev, M.N., Fedorov, V.T. - 1997. [RF patent 2144595. Vacuum insulation product (Kokoyev M.N., Fedorov V.T. - 1997. RF patent 2144595. Vacuum insulation product / Kokoyev, M.N., Fedorov, V.T. - 1997. In Russ)]
4. Kokoyev M.N., Fedorov V.T. Teploizolyatsionnoye izdeliye s predel'no nizkoy materialoyemkost'yu // Stroitel'nyye materialy - 1998, N 9.- S. 10-12. Kokoyev M.N., Fedorov V.T. Thermal insulation product with extremely low material consumption // Construction materials - 1998, N 9.- P. 10-12. [Kokoyev M.N., Fedorov V.T. Thermal insulation product with extremely low material capacity // Building materials - 1998, N 9.- P. 10-12. Kokoyev, M.N., Fedorov V.T. Thermal insulation product with extremely low material consumption // Construction materials - 1998, N 9.- P. 10-12. In Russ)]
5. R. Caps, J. Fricke, Konzepte fuer den Einsatz von evakuierten Daemmungen bei Pas-sivhaeusern, Tagungsband 4. Passivhaus-Tagung, Kassel - 2000.
6. Fedorov V.T. Vakuumirovannoye penosteklo - novyy teploizolyator. // Vestnik Ka-bardino-Balkarskogo gosuniversiteta. Seriya fizicheskiye nauki, vyp. N 8. - 2003. - S. 53-54. Fedorov V.T. Vacuum foam glass is a new heat insulator. // Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University. A series of physical sciences, vol. N 8. - 2003. - p. 53-54. [Fedorov V.T. Vacuum foam glass is a new heat insulator. // Bulletin of the Ka-bardino-Balkarian State University. A series of physical sciences, vol. N 8. - 2003. - p. 53-54. Fedorov V.T. Vacuum foam glass is a new heat insulator. // Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University. A series of physical sciences, vol. N 8. - 2003. - p. 53-54. In Russ)]
7. Fedorov V.T., Kokoyev M.N. Energosberegayushchaya vakuumno-poroshkovaya panel' dlya oblitsovki zdaniy. // Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN, 2010 g., Tom 2, S. 219-226. Fedorov V.T., Kokoyev M.N. Energy-saving vacuum powder panel for lining buildings. // Bulletin of the Department of Building Sciences RAACS, 2010, Volume 2, p. 219-226. [Fedorov V.T., Kokoyev M.N. Energy-saving vacuum powder panel for lining buildings. // Bulletin of the Department of Building Sciences RAACS, 2010, Volume 2, p. 219-226. Fedorov V.T., Kokoyev M.N. Energy-saving vacuum powder panel for lining buildings. // Bulletin of the Department of Building Sciences RAACS, 2010, Volume 2, p. 219-226. In Russ)]
8. Penositall. Foamsitall. [http://www.penosytal.com/compare\\_asr.html](http://www.penosytal.com/compare_asr.html) - 2018. [Passive. Foamsitall. [http://www.penosytal.com/compare\\_asr.html](http://www.penosytal.com/compare_asr.html) - 2018.
9. . Nanazashvili I.Kh. Stroitel'nyye materialy, izdeliya i konstruksii. Spravochnik. - М.: Vysshaya shkola, 1990. - 495 s.. [Nanazashvili I.Kh. Construction materials, products and designs. Directory. - М.: Higher School, 10. Onatskiy S.P. Proizvodstvo keramzita. - М.: Stroyizdat, -1971. - 312 s.
10. Onatsky S.P. Production of expanded clay. - М.: stroiizdat, - 1971. - 312 p. [Onatsky S.P. Production of expanded clay. - М.: stroiizdat, -1971. - 312 s. Onatsky S.P. Production of expanded clay. - М.: Stroiizdat, - 1971. - 312 p. In Russ)] In Russ)]
11. Umwelt Bundesamt BRD - <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#statusquo>. - 2017.
12. China's "clean" energy. China's clean energy. <https://econet.ru/articles/178717>- 2017.
13. Erich Hau. Windkraftanlagen. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2008. 910 Seiten.

14. Twidell J., Ware A. Wind Energy // Renewable Energy Sources. - М.: Energoatomizdat, 1990. - 393 p. 15. DOE's 500-kW variable speed Darrieus machine <http://www.awea.org/faq/vawt.html>
16. Winds in the Republic of Dagestan - 2017. Winds in the Republic of Dagestan - 2017. <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/severnyij-kavkaz/respublika-dagestan> {In Russ]}
17. Map of the Winds of Russia - 2017. Map of the Winds of Russia - 2017. <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii> In Russ]}
18. Comparative analysis of wind turbines. Comparative analysis of wind turbines. <http://www.ecoteco.ru/index.php?id=1198> - 2010. In Russ]}
19. Patent RF 2454564. Vetrosilovaya ustanovka s rotorom Dar'ye / Fedorov V.T., Be-vov R.K. - 2010. Patent of the Russian Federation 2454564. Wind power installation with Darya rotor / Fedorov V.T., Bevov R.K. - 2010 [RF patent 2454564. Wind power plant with a Darya rotor / V. Fedorov, R. Be-Beow - 2010. Patent of the Russian Federation 2454564. Wind power installation with Darya rotor / Fedorov V.T., Bevov R.K. - 2010. In Russ]}
20. Kokoyev M.N. Teplofikatsionnaya vetrosilovaya ustanovka // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. - 2007. - N 3. - S.18-22 [Kokoev M.N. Heating wind power installation // Energy: economy, technology, ecology. - 2007. - N 3. - P.18-22. In Russ]}
21. Tekhnologiya proizvodstva keramzita. Production technology of expanded clay. <https://keramzitik.ru/tekhnologiiia-proizvodstva-keramzita> Production technology of expanded clay. Production technology of expanded clay. <https://keramzitik.ru/tekhnologiiia-proizvodstva-keramzita/>

**Сведения об авторах:**

**Кокоев Мухаммед Нургалиевич** – доктор технических наук, профессор

**Федоров Виктор Тихонович** – доктор технических наук, профессор.

**Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович** – доктор технических наук, профессор, декан.

**Information about the authors:**

**Mohammed N. Kokoev** - Dr. Sci. (Technical), Professor.

**Viktor T. Fedorov** – Dr. Sci. (Technical), Professor.

**Gadzhimagomed N. Hadzhishalapov** - Dr. Sci. (Technical), Professor, Dean.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.03.2019.

Принята в печать 23.01.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.03.2019.

Accepted for publication 23.01.2019.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ**

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов (1 экз.);

### **Правила оформления текста**

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9-10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

### **Элементы заглавия публикуемого материала**

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

#### **Основной текст**

Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

### **Библиографический список**

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок.

Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер».

Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

#### **Справка об авторах**

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

#### **Верстка формул**

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

#### **Верстка рисунков**

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

#### **Верстка таблиц**

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

#### **Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала**

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство образования и науки РФ.

## План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: [vestnik.dgtu@mail.ru](mailto:vestnik.dgtu@mail.ru) и по телефону 8(8722)62-39-64.

## FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;

- electronic copy (e-mail is acceptable);

- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);

- Information about authors.

- 

### Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**In-troduction**", "**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](mailto: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– №1 – 2019.

**HERALD**  
**OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**  
Makhachkala, Volume 46, No.1, 2019.

Верстка: Шагина С.Б.

**Адрес редакции:**

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

Тел./факс(8722)623715

(8722)623964

E-mail: [vestnik.dgtu@mail.ru](mailto:vestnik.dgtu@mail.ru) Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Svetlana B.Shagina

**Editorial and Publisher address:** 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

**«БЕСПЛАТНО»**

Подписано в печать 31.03.2019г. Сдано в печать 31.03.2019г.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 15,00 Уч. изд.л. 15,00

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»  
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.