

**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, №2, 2019.**

# **ВЕСТНИК**

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Volume 46, No.2, 2019.**

# **HERALD**

**OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.  
TECHNICAL SCIENCES**

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

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

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека). Журнал включен в российские и международные открытые репозитории научной информации; подключен к международной системе библиографических ссылок и находится в директории журналов открытого доступа: CrossRef; GoogleScholar; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Research4Life; LENS.ORG; Соционет, КиберЛенинка.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2019.

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

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

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

© 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, № 2, 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.

Батдалов 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., д.т.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.

Кутозов 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:**

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.

Кутозов 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, №2

Махачкала, 2019 – 192с.

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

*Алябьев В.А., Айгузов Т.Г., Евдолов Д.В., Миснахов И.Ш.*

МОДЕЛЬ ПОРТАТИВНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА ..... 8

*Михайлова С.В., Погребная И.А.*

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ..... 20

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ ..... 28

*Алибеков А.К., Алибеков Г.А.*

МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ КАНАЛОВ  
КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ..... 28

*Алферов В.П., Дровникова И.Г., Обухова Л.А., Rogozin E.A.*

ВЕРБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СЛАБО УЯЗВИМЫМ ПРОЦЕССОМ  
РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ К ПРОГРАММНЫМ  
СРЕДСТВАМ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ..... 37

*Асалханов П.Г., Бендик Н.В., Иванько Я.М.*

ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ  
ПРОДУКЦИИ ..... 50

*Асланов Т.Г., Мусаева У.А.*

АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБОК В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ  
ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО МЕТОДАМ СФЕР И ЭЛЛИПСОИДОВ ..... 61

*Баркалов Ю.М., Нестеров А.Д.*

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МОБИЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВАХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ANDROID ..... 71

*Кадиев И.П.*

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ИНДЕКСАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ ..... 81

*Лоскутов И.А.*

НОРМИРОВАНИЕ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ,  
РАЗРАБАТЫВАЮЩИХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АЭС ..... 89

*Магомедова М.Р.*

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРИРОДНЫХ  
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ ..... 98

*Степанов О.И., Худякова С.А.*

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПРИ ПОЖАРОТУШЕНИИ ..... 108

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА ..... 118

*Абакаров А.Д., Гасанов Р.Г.*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗИ  
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ..... 118

<b>Абакаров М.С., Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М.</b> <b>РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЁХСЛОЙНЫХ</b> <b>ТРУБ СИММЕТРИЧНОЙ И НЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ .....</b>	<b>126</b>
<b>Аласханов А.Х., Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Хубаев М.С.-М.</b> <b>БЕТОННЫЕ КОМПОЗИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫХ</b> <b>СМЕСЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ .....</b>	<b>136</b>
<b>Алиев С.А., Муртазаева Р.С.-А., Саламанова М.Ш.</b> <b>СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ</b> <b>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕМЕНТНОЙ ПЫЛИ .....</b>	<b>148</b>
<b>Алимурадов Ш.А., Гаджиев А.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А.</b> <b>ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ</b> <b>ЖАРОСТОЙКОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ .....</b>	<b>158</b>
<b>Долгова А.В., Несветаев Г.В.</b> <b>ВЛИЯНИЕ ДОЗИРОВКИ РЕДИСПЕРГИРУЕМЫХ ПОРОШКОВ И ТИПА НИЗКОМОДУЛЬНЫХ</b> <b>ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА .....</b>	<b>167</b>
<b>Муртазалиев Г.М. , Пайзулаев М.М.</b> <b>АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>176</b>
<b>ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ .....</b>	<b>185</b>

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»  
HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 4 6 , N o . 2 , 2 0 1 9 .

<b>Editor-in-Chief:</b> Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	Research areas
<b>Deputy Editor:</b> Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.04.03 - Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning systems and life support (Technical Sciences),
<b>Editorial Board:</b> Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.04.13 - Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences),
Rasul M. Aliev, Doctor of Technical Science Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.13.01 - System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences),
Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.13.06 - Automation and management of technological processes and production (By Branches) (Technical Sciences),
Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;	05.13.10 - Management in social and economic systems (Technical Sciences),
Ganapi J. Akhmedov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.13.12 - Design automation systems (By Branches) (Technical Sciences),
Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),
Mahir M. Bashirov, Doctor of Technical Science, Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;	05.13.19 - Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),
Alexey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;	05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),
Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;	05.23.05 - Building materials and products (Technical Sciences),
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;	05.23.17 - Construction mechanics (Technical Sciences),
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;	05.23.19 - Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences)
Dmitry N. Kobzareno, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;	Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 46, No.2 – 192p.
Alexander A. Krugljakow, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland;	Published by decision of the Academic Council Daghestan State Technical University
Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;	Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan
Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia;	367026, Russia.
Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;	Daghestan State Technical University
Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;	Tel./fax (8722)623715 (8722)623964
Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;	
Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;	
Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;	
Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;	
Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;	
Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;	
Gadzhimurad N. Khadzhishalapov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.	
<b>Editorial council</b> <b>Chairman of the editorial council:</b>	
Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.	
<b>The co-chairs of the editorial council:</b>	
Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;	
Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	
Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;	
<b>Members of the Editorial Board:</b>	
Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;	
Islam I. Dianzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atvrau, Republic of Kazakhstan;	
Sergey I. Timoshin, Doctor of Physics and Mathematics, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	
Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia;	
Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.	

## CONTENTS

### POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

<i>Aigumov T.G., Alyabev V.A., Evdulov O.V., Mispahov I.Sh.</i> PORTABLE THERMOELECTRIC GENERATOR MODEL ELECTRIC ENERGY FOR THE FAR NORT.....	8
---	---

<i>Mikhaylova S.V., Pogrebnaya I.A.</i> INCREASING CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE .....	20
--	----

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT .....28

<i>Alibekov A.K., Alibekov G.A.</i> MODELS FOR DETERMINING MAXIMUM DEGREE FILLING CHANNELS OF CIRCUL AR SECTION SHAPE .....	28
---	----

<i>Alferov V.P., Drovnikova I.G., Obukhova L.A., Rogozin E.A.</i> VERBAL MODEL OF MANAGEMENT OF A VULNERABLE PROCESS OF DEDICATING THE ACCESS OF USERS TO THE SOFTWARE OF THE ELECTRONIC DOCUMENT SYSTEM. ....	37
--	----

<i>Asalkhanov P.G., Bendik N.V., Ivan'o Y. M.</i> EXPERT EVALUATIONS IN THE PROBLEMS OF OPTIMIZING THE PRODUCTION OF FOOD PRODUCTS.....	50
---	----

<i>Aslanov T.G., Musaeva U.A.</i> ANALYSIS OF ERROR DISTRIBUTION DENSITY IN DETERMINING THE COORDINATES OF EARTHING EARTH IN THE METHODS OF SPHERES AND ELLIPSOIDS .....	61
--	----

<i>Barkalov Yu.M., Nesterov A.D.</i> PECULIARITIES OF INFORMATION SECURITY IN MOBILE DEVICES RUNNING THE ANDROID OPERATING SYSTEM .....	71
---	----

<i>Kadiev I.P.</i> GENERAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF SYSTEMS OF INDEXATION OF ELEMENTS OF FINITE SETS .....	81
---	----

<i>Loskutov I.A.</i> RATIONING ASSEMBLY-MOUNTING WORKS AT THE DEVELOPING ELECTRONIC EQUIPMENT FOR NUCLEAR POWER PLANTS .....	89
--	----

<i>Magomedova M.R.</i> CALCULATION MODEL OF SOLID PARTICLES MOTION IN NATURAL TURBULENT FLOWS .....	98
--	----

<i>Stepanov O. I., Khudyakova S.A.</i> APPLICATION OF MODELS OF INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT SYSTEMS FIRE FIGHTING RESCUE UNITS .....	108
---	-----

### BUILDING AND ARCHITECTURE.....118

<i>Abakarov A.J., Gasanov R.G.</i> ASSESSMENT OF RELIABILITY AND VITALITY OF SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE INTERRELATION OF ELEMENTS WITH SEISMIC EXPOSURE.....	118
---	-----

<b>Abakarov M.S., Vishtalov R.I., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M.</b> <b>CALCULATION OF STRESSED-DEFORMED STATE OF THREE-LAYER PIPES OF SYMMETRIC AND ASYMMETRIC STRUCTURE .....</b>	<b>126</b>
<b>Alaskhanov A.Kh.I, Murtazaev S.-A.Yu., Saidumov M.S., Khubaev M. S-M.</b> <b>CONCRETE COMPOSITES USING GRAND-SANDY MIXTURES OF DEPOSITS OF THE CHECHEN REPUBLIC .....</b>	<b>136</b>
<b>Aliev S.A., Murtazayeva R.S.-A., Salamanova M.Sh.</b> <b>STRUCTURE AND PROPERTIES OF CONNECTING ALKALINE ACTIVATION USING CEMENT DUST .....</b>	<b>148</b>
<b>Alimuradov Sh.A., Gadzhiev A.M., Khadzhishalapov G.N., Hezhev T.A.</b> <b>EFFECT OF VACUM TREATMENT ON TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT CERAMZYT-CONCRETE ON COMPOSITIONAL BINDING.....</b>	<b>158</b>
<b>Dolgova A.V., Nesvetaev G.V.</b> <b>EFFECT OF DOSAGE OF REDISPUTABLE POWDERS AND THE TYPE OF LOW-MODULAR INCLUSIONS ON THE PROPERTIES OF FINE-AGGREGATE CONCRETE .....</b>	<b>167</b>
<b>Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M.</b> <b>NONLINEAR BEHAVIOR CALCULATION ALGORITHM FOR THIN-WALLED SYSTEMS .....</b>	<b>176</b>
<b>FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS .....</b>	<b>185</b>

**Для цитирования:** Айгумов Т.Г., Алябьев В.А., Евдулов Д.В., Миспахов И.Ш. Модель портативного термоэлектрического генератора электрической энергии для условий Крайнего Севера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 8-19. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

**For citation:** Aigumov T.G., Alyabev V.A., Evdulov O.V., Mispahov I.Sh. Portable thermoelectric generator model electric energy for the Far North. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 8-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

### МОДЕЛЬ ПОРТАТИВНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Айгумов Т.Г.<sup>3</sup>, Алябьев В.А.<sup>4</sup>, Евдулов Д.В.<sup>1</sup>, Миспахов И.Ш.<sup>2</sup>

<sup>1-4</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1-4</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: 79634051239@yandex.ru, <sup>4</sup> e-mail: vyacheslav-alyabev@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели портативного термоэлектрического генератора (ТЭГ), предназначенного для работы при низких температурах окружающей среды, исследование теплофизических процессов происходящих при его работе. **Метод.** Создана тепловая модель ТЭГ для условий Крайнего Севера, в которой выделены пять основных блоков: источник теплоты (человек), тепловые аккумуляторы, ТЭГ, реализованный посредством некоторого количества последовательно соединенных термоэлектрических батарей (ТЭБ), теплопроводы и радиаторной системы для интенсификации теплообмена холодных спаев ТЭБ с окружающей средой, на границе которых имеют место граничные условия 2 и 3 рода. На основе тепловой модели разработана математическая модель устройства, включающая в себя решение задач расчета теплопровода, плавления и затвердевания рабочего вещества в тепловом аккумуляторе; генератора электрической энергии, построенного на основе термоэлектрического преобразователя. **Результат.** Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы, в частности зависимость изменения величины э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой, к.п.д. ТЭГ от термо-э.д.с. **Вывод.** Значение вырабатываемой э.д.с. напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем больше величина последнего, тем выше значение э.д.с. Также очевидна прямая зависимость э.д.с. и значений коэффициентов теплообмена с окружающей средой. Для получения большей величины генерируемой э.д.с. необходимо подбирать тепловой аккумулятор, с как можно большей температурой и теплотой плавления. К.п.д. генератора уменьшается при увеличении генерируемой э.д.с. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина к.п.д. составила чуть менее 8 %. В качестве теплопроводов целесообразно использовать тепловые трубы ввиду минимальных тепловых потерь по их длине, а в качестве тепловых аккумуляторов кристаллический серноокислый натрий, кристаллический углекислый натрий, парафин.

**Ключевые слова:** Крайний Север, термоэлектрический генератор, модель, тепловая труба, плавящееся вещество, фазовый переход, расчет, теплообмен



## PORTABLE THERMOELECTRIC GENERATOR MODEL ELECTRIC ENERGY FOR THE FAR NORTH

**Timur G. Aigumov<sup>3</sup>, Vyacheslav A. Alyabev<sup>4</sup>, Denis V. Evdulov<sup>1</sup>, Igramidin Sh. Mispahov<sup>2</sup>**

<sup>1-4</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1-4</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: 79634051239@yandex.ru, <sup>4</sup>e-mail: vyacheslav-alyabev@mail.ru

**Abstract Objectives** The aim of the study is to develop a model of a portable thermoelectric generator (TEG), designed to operate at low ambient temperatures, the study of thermophysical processes occurring during its operation. **Method** A thermal model of TEG for the conditions of the Far North was created, in which five main blocks are distinguished: a heat source (human), heat accumulators, TEG implemented by a certain number of thermoelectric batteries (TEB) connected in series, heat pipes and a radiator system for intensifying heat transfer cold junctions of thermopile elements with the environment, on the border of which there are boundary conditions of the 2nd and 3rd kind. Based on the thermal model, a mathematical model of the device has been developed, which includes solving the problems of calculating the heat conduction, melting and solidification of the working substance in a heat accumulator; an electric energy generator based on a thermoelectric converter. **Result** The dependency graphs are obtained, reflecting the main characteristics of the developed system, in particular, the dependence of the change in the emf on the temperature difference between the TEG junctions at various coefficients of heat exchange with the environment, efficiency TEG from thermo-emf. **Conclusion** As follows from the obtained data, the value of the generated emf directly related to the temperature difference between the TEG junctions, and the higher the value of the latter, the higher the emf value. The direct dependence of the emf is also evident. and values of heat transfer coefficients with the environment. From the graphs presented, we can conclude that to obtain a larger value of the generated emf it is necessary to select a heat accumulator with the highest possible temperature and heat of fusion. C.p.d. generator decreases with increasing generated emf. Under the conditions of a numerical experiment, the maximum value of the efficiency amounted to slightly less than 8%. It is advisable to use heat pipes as heat conduits because of the minimum heat loss along their length, and crystalline sodium sulfate, crystalline sodium carbonate, and paraffin as heat accumulators.

**Keywords:** Far North, thermoelectric generator, model, heat pipe, melting substance, phase transition, calculation, heat transfer

**Введение.** В настоящее время разработка портативных генераторов электрической энергии является важной и практически значимой задачей. Особенно остро данный вопрос стоит для областей, удаленных от линий электропередач со специфическим климатом. К подобным областям относятся территории Крайнего Севера - Сибирь, Дальний Восток и т.п. [1-3].

Основные трудности при работе традиционных аккумуляторных батарей в этих условиях создает то обстоятельство, что при низких температурах изменяются свойства составляющих их активных и конструкционных материалов, поэтому возможность эксплуатации подобных источников энергии затрудняется, а иногда исключается вообще. При этом влияние низкой температуры на работу аккумуляторной батареи заключается в следующем [4]: герметизирующая мастика теряет эластичность, растрескивается и отслаивается от поверхности крышек и моноблоков; моноблоки, крышки и пробки становятся хрупкими; при таянии снега на поверхности батареи образуется влага, в результате этого происходит сильный саморазряд батареи; при недостаточной плотности электролита и значительной разряженности батареи возможно его замерзание. Все это определяет необходимость разработки новых портативных источников энергии, приспособленных для работы в условиях Крайнего Севера.

Перспективным при проектировании портативных источников электрической энергии, предназначенных для работы при низких температурах, является применение в качестве исполнительного элемента термоэлектрических преобразователей энергии, обеспечивающих построение экономичных, малогабаритных приборов с широкими функциональными возможностями [5-8].

Электроэнергетические приборы такого типа будут обладать существенными преимуществами: отсутствием движущихся частей в ТЭГ; сочетанием в едином устройстве таких традиционно раздельных элементов, как источник холода (теплоты) и теплообменный аппарат; универсальностью; возможностью работы при любой ориентации и при отсутствии сил гравитации вне зависимости от температуры окружающей среды; простотой устройства, компактностью, взаимозаменяемостью; высокой надежностью, практически неограниченным сроком службы; бесшумностью, экологичностью [9-12].

Предлагается такое конструктивное исполнение портативного ТЭГ, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, при котором разность температур между спаями ТЭБ будет создаваться за счет низкой температуры окружающей среды и температуры человеческого тела.

**Постановка задачи.** Целью настоящей статьи является разработка модели портативного ТЭГ, предназначенного для работы при низких температурах окружающей среды, исследование тепловых процессов происходящих при его работе.

**Методы исследования.** Предложенная конструктивная схема исполнения ТЭГ подразумевает три возможных варианта реализации.

1. Передача тепловой энергии от человека непосредственно на горячие спаи ТЭБ, при этом нахождение ее холодных спаев в непосредственном контакте с холодным окружающим воздухом через радиаторную систему. В данном случае генератор может работать только при нахождении на теле человека, при его съеме работа прибора будет прекращена.
2. Размещение между телом человека и горячими спаями ТЭБ и окружающей средой и холодными спаями ТЭБ тепловых аккумуляторов. В данном случае может быть обеспечена работа ТЭГ при съеме его с тела человека некоторое время, определяемое теплоаккумулирующими возможностями тепловых аккумуляторов.
3. Использование специальных теплопроводов, выполненных либо цельнометаллическими, либо в виде тепловых труб для передачи теплоты к спаям ТЭБ. Преимущество данного способа реализации ТЭГ состоит в возможности размещения прибора на некотором отдалении от тела человека и окружающей среды.

Из всех трех рассмотренных схем наиболее эффективной и рациональной является третья, совмещающая в себе возможности аккумуляции теплоты и разнесения источника тепла и холода на некоторое расстояние от ТЭБ, что дает возможность для вариаций в расположении ТЭГ. Ввиду данного обстоятельства проведем моделирование ТЭГ именно для этого случая.

В соответствии с выбранной схемой ТЭГ его тепловая модель имеет вид, изображенный на рис.1.

В модель входят пять основных блоков: источник теплоты (человек), тепловые аккумуляторы, ТЭГ, реализованный посредством некоторого количества последовательно соединенных ТЭБ, теплопроводы и радиаторной системы для интенсификации теплообмена холодных спаев ТЭБ с окружающей средой.

На границе перечисленных блоков имеют место тепловые потоки, определяющие количество теплоты, передаваемое от источников теплоты к тепловым аккумуляторам, от аккумуляторов к теплопроводам, от теплопроводов к спаям ТЭГ, от холодных спаев ТЭГ к радиаторной системе.

источник теплоты (человек) Heat source (person)
теплопровод Heat conduit
тепловой теплоаккумулятор Thermal storage tank
ТЭГ TEG
тепловой теплоаккумулятор Thermal storage tank
теплопровод Heat conduit
радиаторная система Radiator system

**Рис.1. Тепловая модель термоэлектрического генератора для условий Крайнего Севера**  
**Fig. 1. Thermal model of thermoelectric generator for the Far North**

Математическая модель может быть разбита на три основные части, включающие в себя расчет процесса аккумулирования теплоты, передачи теплоты по теплопроводам, непосредственно расчет ТЭГ.

*Расчет теплообмена в теплопроводе.* В качестве теплопровода целесообразным является применение тепловой трубы, обеспечивающей минимальные потери при передаче теплоты на требуемое расстояние.

При использовании тепловых труб коэффициент теплообмена в испарительной и конденсационной зонах может достигать величины  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>·К [13].

Математическая постановка задачи расчета различных зон тепловой трубы при условии соприкосновения зоны испарения с источником тепла и зоны конденсации с источником холода соответствует [14].

Решается осесимметричная задача теплопередачи отдельно для зоны испарения, транспортной зоны и зоны конденсации методом конечных элементов.

Искомой величиной в модели является количество теплоты, переносимое через сечение канала тепловой трубы за единицу времени и связанное с ним значение температуры в каждой точке канала.

*Расчет тепловых аккумуляторов.* В качестве тепловых аккумуляторов эффективно использование плавящихся рабочих веществ, температура плавления которых лежит в пределах 35-40° С, в частности кристаллический серноокислый натрий (температура плавления 32,6° С), кристаллический углекислый натрий (температура плавления 34° С), парафин (температура плавления 40° С).

Накопление и отдача теплоты в данном случае будет происходить за счет фазового перехода твердое вещество - жидкость и жидкость - твердое вещество.

Соотношения для расчета процесса теплообмена при плавлении вещества имеют вид [15, 16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_p \rho_p \xi_p \frac{dT_{o6}}{d\tau} = q'_{TЭБг} + K_{cp} (T_{cp} - T_{o6}) + \alpha_p (T_1 - T_{o6}) \\ c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_p (T_1 - T_{o6}) + \alpha_{kp} (T_{kp} - T_1) \\ \frac{d\xi}{d\tau} \left[ c_2 \rho_2 \left( \frac{-2 \cdot n (T_{kp} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi (T_{2R0} - T_{kp})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_2 \right] = \alpha_{kp} (T_1 - T_{kp}) \end{array} \right. , \quad (1)$$

а для процесса затвердевания:

$$(c\rho\delta)_{o6} \frac{dT_{o6}}{d\tau} = \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{o6}) + \alpha_{kp} (T_1 - T_{o6}), \quad (2)$$

$$c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{o6} (T_1 - T_{o6}) + \alpha_{kp} (T_{kp} - T_1), \quad (3)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[ c_2 \rho_2 \left( \frac{-2 \cdot n (T_{kp} \cdot H - T_{2H0} \cdot H) + \xi (T_{2H0} - T_{kp})}{(n+1)(\xi_0 - H)} \right) + v \rho_1 \right] = \alpha_{kp} (T_1 - T_{kp}) - q_{TЭБх},$$

где  $\alpha_{o6}, \alpha_{kp}$  - соответственно коэффициенты теплоотдачи от оболочки к жидкости и от поверхности раздела фаз к жидкости;  $T_1$  - средняя температура жидкой фазы;  $\tau_0, \xi_0$  - время и толщина расплава, при которых начинается интенсивное движение конвективных токов и поле температур по жидкой фазе практически исчезает;  $(c, \rho, \delta)_{o6}$  - соответственно теплоемкость, плотность и толщина металлической оболочки устройства;  $\tau$  - время;  $K_{cp}$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду  $T_{o6}$  - среднемассовая температура металлической оболочки устройства;  $T_{cp}$  - температура окружающей среды;  $c_i, \rho_i, \lambda_i$  - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего вещества, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 – твердой фазе рабочего вещества,  $r$  - теплота плавления рабочего вещества;  $R$  - толщина слоя рабочего вещества;  $\xi$  - граница раздела фаз;  $T_{2R}, T_{2R0}$  - соответственно температуры при  $x=R$  в любой момент времени  $\tau$  и при  $\tau = \tau_0$  ( $T_{2R0} = T_{TЭБх}$ ),  $\xi_0$  – толщина расплава при  $\tau = \tau_0$ ;  $\tau_0$  – время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры  $T_{2R}$  от времени;  $n$  - параметр, определяемый экспериментально.

Выражения (1)-(3) получены при решении задачи «Стефана» с использованием приближенного метода, изложенного в [17]. Согласно этому методу профиль температуры в твердой фазе предполагается известным, удовлетворяющим начальным и граничным условиям задачи. Известное выражение для распределения температуры в твердой фазе вещества подставляется в исходные выражения, описывающие теплообмен при фазовом переходе, которые затем решаются относительно температуры и координаты раздела фаз.

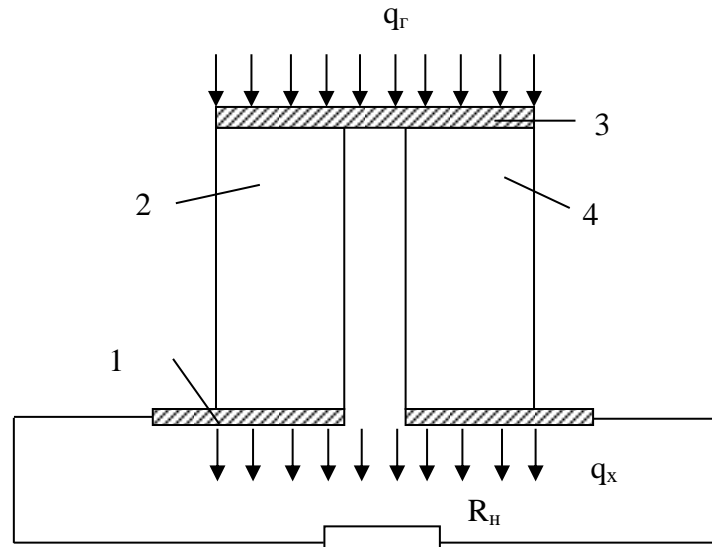
**Расчет ТЭГ.** Схематически единичный термоэлемент, работающий в режиме генерирования электрической энергии, изображен на рис.2 [18-19].

Если к горячему спаю термоэлемента подвести некоторый поток теплоты  $q_r$  при температуре  $T_r$ , а от холодного спаю отвести некоторый поток тепла  $q_x$  при температуре  $T_x$ , то под действием перепада температур на его спаих  $\Delta T$ , согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-э.д.с.  $E_{тэ}$ .

При условии независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E_{тэ} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T,$$

где  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – абсолютные величины коэффициентов термо-э.д.с. ветвей p- и n-типов соответственно.



**Рис.2. Схематический разрез термоэлемента, работающего в режиме термоэлектрического генератора**

1 и 3 - коммутационные пластины, 2 и 4 - ветви термоэлемента

**Fig. 2. Schematic section of a thermoelectric element operating in the thermoelectric generator mode**  
 1 and 3 - patch plates, 2 and 4 - thermocouple branches

Под действием термо-э.д.с.  $E$  по замкнутой цепи термоэлемента, включающей полезную нагрузку  $R_H$ , потечет электрический ток  $I$ . Внутреннее сопротивление термоэлемента  $R_{ТЭ}$  состоит из сопротивлений ветвей соответственно  $R_p$  и  $R_n$ , и сопротивления коммутационного компонента  $R_K$ :

$$R_{ТЭ} = R_p + R_n + R_K. \quad (4)$$

Представим сопротивление коммутационного компонента в виде относительной величины

$$k = \frac{R_K}{R_p + R_n}, \quad (5)$$

а величины сопротивлений ветвей представим через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов. Тогда ,

$$R_{ТЭ} = \left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + k), \quad (6)$$

где  $S_p$  и  $S_n$  - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и n-типов,  $\rho_p$  и  $\rho_n$  - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и n-типов;  $\ell$  - длина ветвей;

Полное сопротивление термоэлектрической цепи равно  $R_{ТЭ} + R_H$ . Представим также полезную нагрузку в виде относительной величины  $K = R_H / R_{ТЭ}$ , которая называется относительной полезной нагрузкой. Тогда общее сопротивление цепи будет равно  $R_{ТЭ} (1 + K)$ . Таким образом, согласно закону Ома, ток в цепи ТЭГ будет определяться выражением:

$$I = \frac{E_{ТЭ}}{(1 + K) R_{ТЭ}}, \quad (7)$$

а напряжение на нагрузке

$$U = \frac{K}{1 + K} E_{ТЭ}. \quad (8)$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая ТЭГ, будет определяться по формуле

$$W_{T_3} = UI = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{E_{T_3}^2}{R_{T_3}} = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+K)} \quad (9)$$

Отношение  $\frac{E_{T_3}^2}{R_{T_3}}$  является максимальной электрической мощностью, вырабатываемой в цепи термоэлемента, когда сопротивление этой цепи минимально, т. е. при  $R_n = 0$ . Указанный случай соответствует режиму короткого замыкания.

**Обсуждение результатов.** По разработанной модели, описываемой уравнениями (1)-(9) произведен численный эксперимент. Его результаты представлены на рис.3-8. основные параметры и характеристики материалов взяты из [20]. На рис.3 рассмотрено изменение теплового потока вдоль продольной оси тепловой трубы. В качестве теплоносителя предполагалось использование хладагента R 124 b ( $C_2H_3ClF_2$ ). Как следует из полученных результатов, поле распределения теплового потока в тепловой трубе практически равномерное. При этом максимальное отличие в величине теплового потока между его концами равно  $900 \text{ Вт/м}^2$ . Для сравнения это значение в случае использования медного теплопровода составляет  $5800 \text{ кВт/м}^2$ . Данное обстоятельство определяет целесообразность применения в качестве теплопровода именно тепловую трубу, характеризующуюся минимальными потерями переносимого теплового потока по длине.

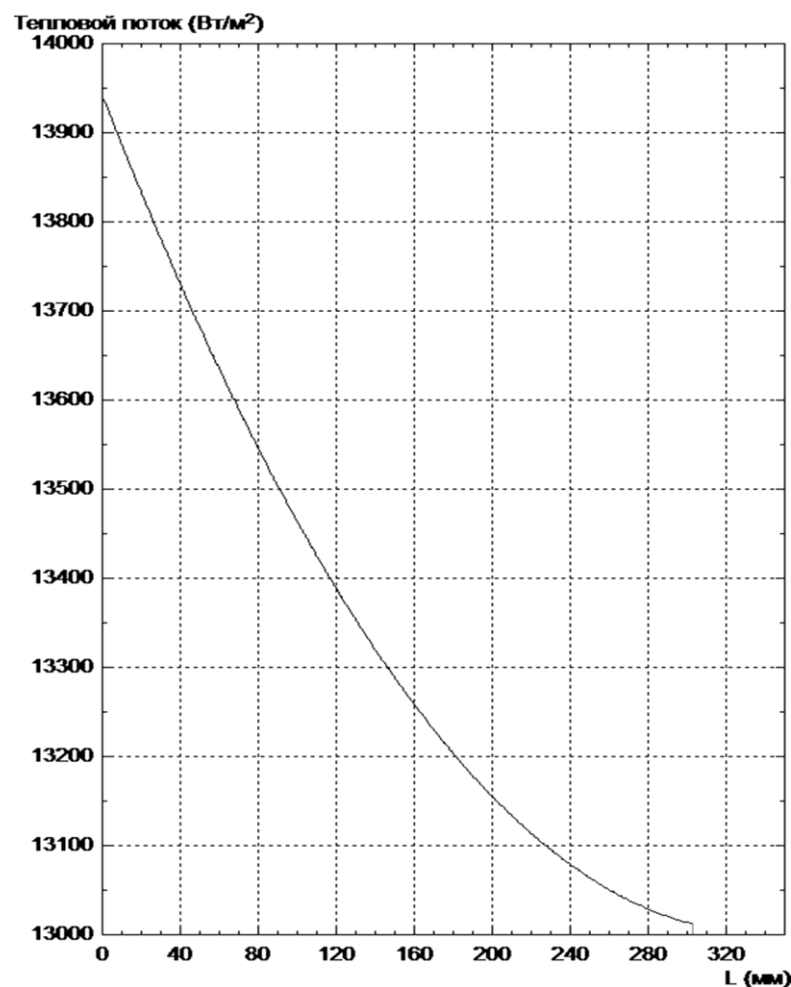


Рис.3. Изменение теплового потока вдоль продольной оси тепловой трубы  
Fig. 3. Change in heat flux along the longitudinal axis of the heat pipe

Результаты расчетов тепловых аккумуляторов представлены на рис.4-6. Рассмотрены зависимости изменения координаты границы раздела фаз от времени при различных мощностях рассеяния источника теплоты при плавлении вещества (рис.4), продолжительность полного плавления рабочего вещества от мощности тепловыделений внешнего источника (рис.5), продолжительность полного затвердевания рабочего вещества рис.6).

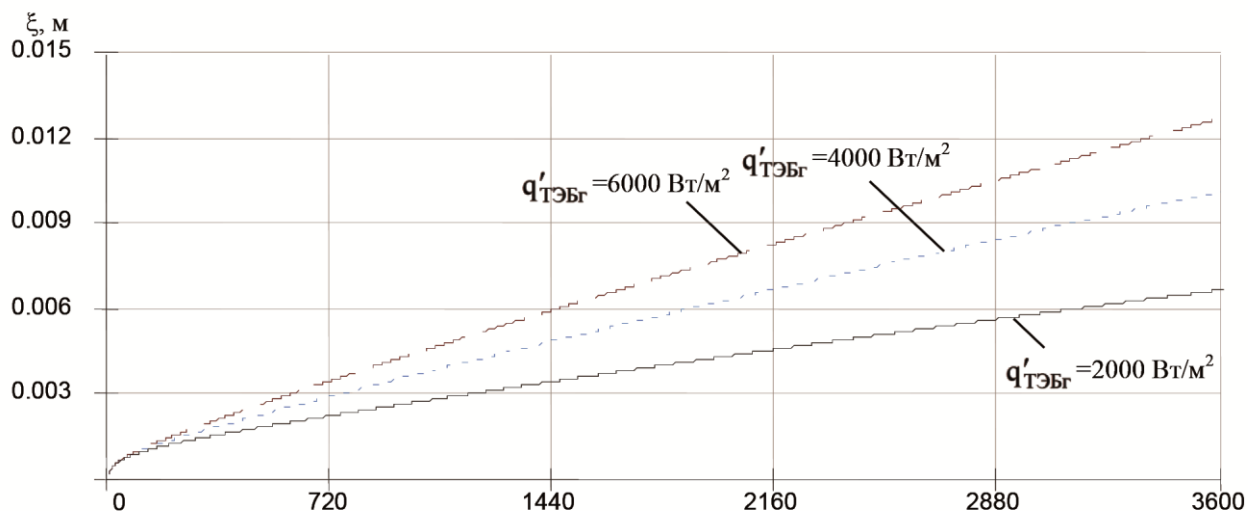


Рис.4. Зависимость изменения координаты границы раздела фаз во времени при различных значениях мощности рассеяния источника теплоты

Fig. 4. The dependence of the change in the coordinate of the phase boundary in time at different values of the dissipation power of the heat source

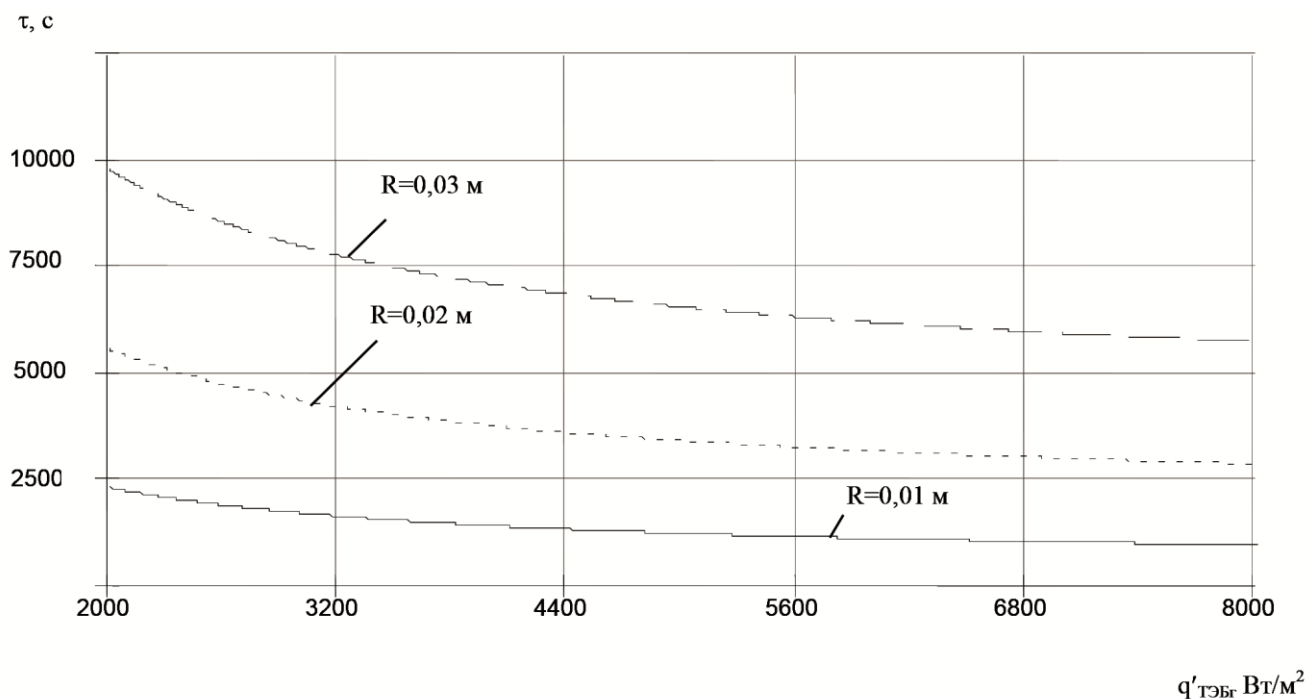


Рис.5. Зависимость изменения времени полного проплавления рабочего вещества от мощности рассеяния источника теплоты при различных значениях R

Fig. 5. The dependence of the change in the time of full penetration of the working substance on the power dissipation of the heat source at various values of R

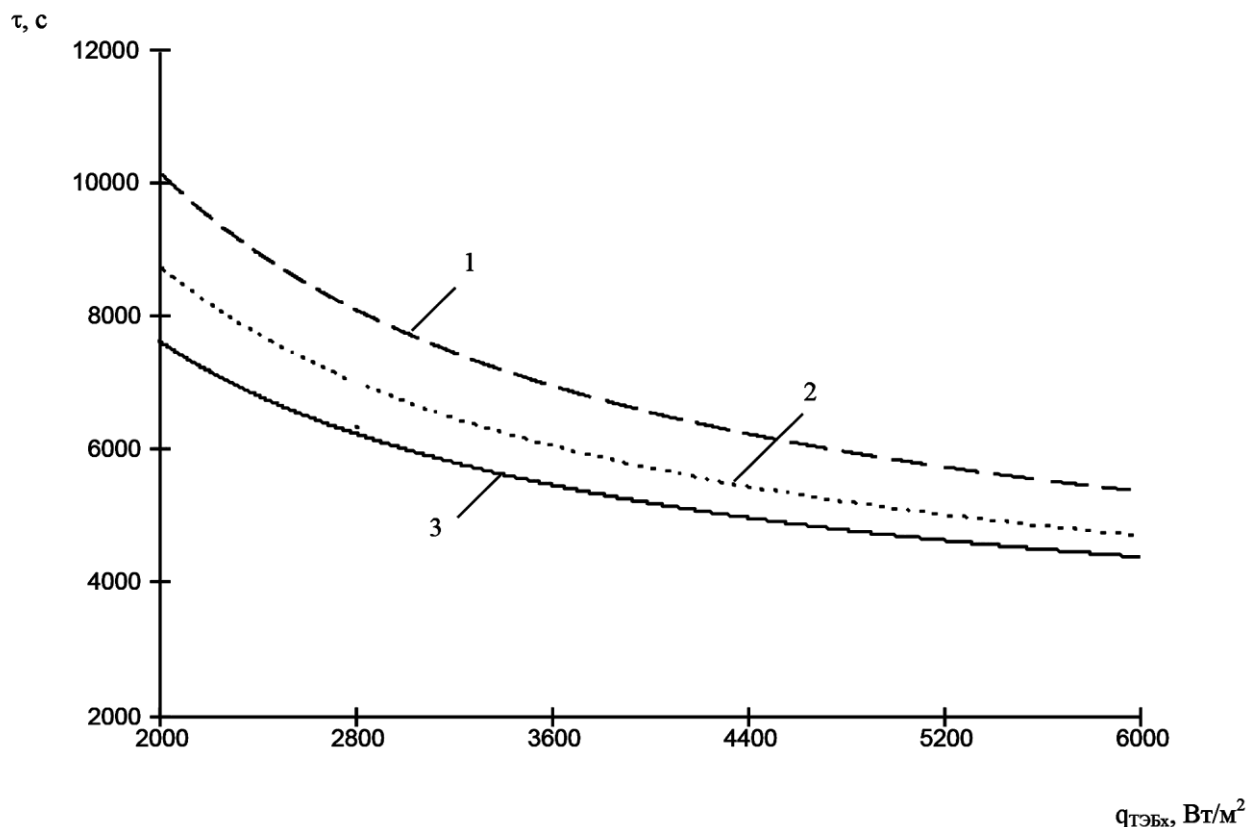


Рис.6. Зависимость времени полного затвердевания рабочего вещества от отводимой мощности,  $(\text{ср}\delta)_{06}=2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $R=0,025 \text{ м}$

1 – парафин, 2 – кристаллический углекислый натрий, 3 – кристаллический сернокислый натрий

Fig. 6. Dependence of the time of complete solidification of the working substance on the output power,  $(\text{ср}\delta)_{06}=2,5 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $R = 0.025 \text{ m}$  1 - paraffin, 2 - crystalline sodium carbonate, 3 - crystalline sodium sulfate

Расчетные зависимости определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы ТЭГ, лежит в необходимых пределах при использовании незначительного количества рабочего агента (согласно расчетным графикам его значение лежит в пределах 6000-24000 с при толщине рабочего вещества 0,01-0,03 м). При этом с увеличением теплопритоков увеличивается скорость перемещения границы раздела фаз и соответственно длительность полного проплавления вещества. Как следует из приведенных графиков, длительность полного проплавления вещества толщиной 3 см варьируется от 24000 до 13500 с при изменении  $q_{ТЭБг}$  от 2000 до 8000 Вт/м².

Согласно расчетным данным длительность поддержания стабильной температуры спаев в зависимости от темпов остывания тепловых аккумуляторов может варьироваться от 3600 до 10000 с, что определяет необходимость тепловой изоляции элементов ТЭГ от окружающей среды. Данные, полученные при расчете характеристик ТЭГ, приведены на рис.7-8. Рабочим веществом теплового аккумулятора является парафин с температурой плавления 40° С.

На рис.7 представлена зависимость изменения температуры генерируемой э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой. Как следует из представленных данных значение вырабатываемой э.д.с. напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем большее величина последнего, тем выше значение э.д.с. Также очевидна прямая зависимость э.д.с. и значений коэффициентов теплообмена с окружающей средой. Из представленных графиков можно сделать важный вывод, что для получения большей величины генерируемой э.д.с. необходимо подбирать тепловой аккумулятор с как можно большей температурой и теплотой плавления.



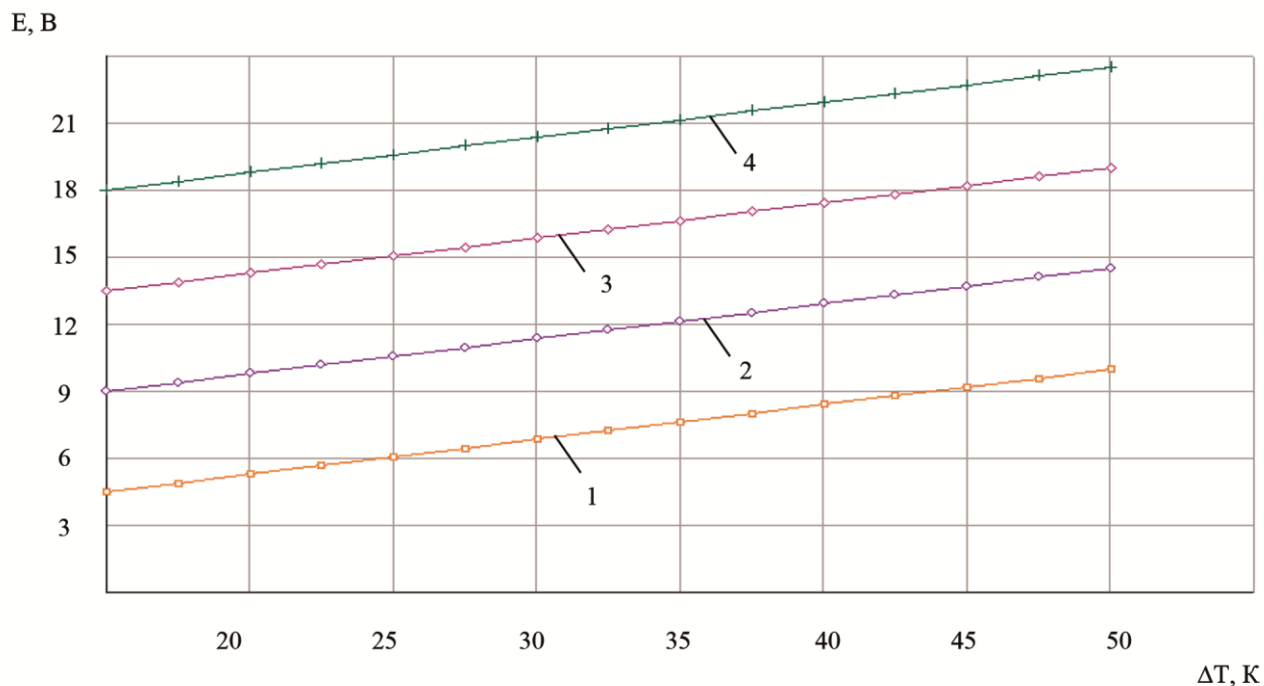


Рис.7. Зависимость изменения величины э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой 1 -  $\alpha_{cp}=1,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , 2 -  $\alpha_{cp}=2,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , 3 -  $\alpha_{cp}=3,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , 4 -  $\alpha_{cp}=4,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$   
 Fig. 7. Dependence of the change in the magnitude of the emf from the temperature difference between the TEG junctions at different coefficients of heat exchange with the environment 1 -  $\alpha_{cp} = 1.5 \text{ W / m}^2\text{K}$ , 2 -  $\alpha_{cp} = 2.5 \text{ W / m}^2\text{K}$ , 3 -  $\alpha_{cp} = 3.5 \text{ W / m}^2\text{K}$ , 4 -  $\alpha_{cp} = 4.5 \text{ W / m}^2\text{K}$

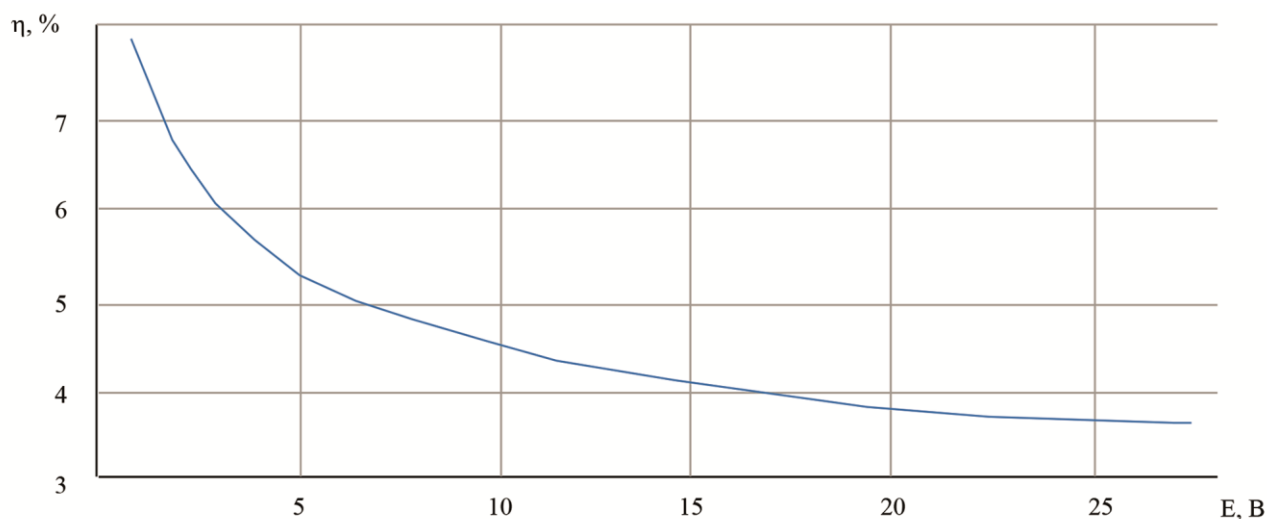


Рис.8. Зависимость изменения к.п.д. термоэлектрического генератора от термо-э.д.с.  
 Fig. 8. The dependence of the change in efficiency thermoelectric generator from thermo-emf.

На рис.8 представлена зависимость изменения к.п.д. ТЭГ от термо-э.д.с. Как следует из представленных данных к.п.д. генератора уменьшается при увеличении генерируемой э.д.с. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина к.п.д. составила чуть менее 8 %.

**Вывод.** Предложена конструкция системы электропитания в условиях Крайнего Севера, выполненная на базе термоэлектрических преобразователей энергии, разность температур между спаями которых будет создаваться за счет низкой температуры окружающей среды и температуры человеческого тела, проведено моделирование электро- и теплофизических процессов в ней. Создана тепловая модель ТЭГ для условий Крайнего Севера. На основе тепловой

модели разработана математическая модель устройства, включающая в себя решение задач расчета теплопровода, плавления и затвердевания рабочего вещества в тепловом аккумуляторе; генератора электрической энергии, построенного на основе термоэлектрического преобразователя. Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы. Совокупность результатов проведенных исследований дает возможность использовать их в качестве научной основы при создании новых систем портативного электропитания.

#### **Библиографический список:**

1. Дроздов В.В. Общая экология. СПб.: РГГМУ, 2011. 412 с.
2. Воронов В.К., Гречнева М.В., Сагдеев Р.З. Основы современного естествознания. М.: Высшая школа, 1999. - 247 с.
3. Еремин Ю.Н. Мое Заполярье. - Мурманск: МОИПКРО, 2004. 78 с.
4. <http://www.eemb.com>.
5. 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.
6. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012.
7. Такенобу Кадзикава, Риодзи Фунаками Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии // Термоэлектричество. 2016. № 1. С. 4-11.
8. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. 2007. №2. С. 21-29.
9. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества. 2003. 376 с.
10. Заяков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Одесса: Политехперіодика, 2009. 175 с.
11. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. 2009. № 7. С. 14-19.
12. Шучитангшу Чаттерджи Термоэлектричество по индийскому сценарию // Термоэлектричество. 2016. №6. С. 7-15.
13. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. 194 с.
14. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Математическая модель холодильной установки на базе сложных термоэлектрических батарей с тепловыми термосифонами // Ползуновский вестник. 2010. №2. С. 15-20.
15. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2002. №7. С. 59-62.
16. 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.
17. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 600 с.
18. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1979. 385 с.
19. Поздняков Б.С., Коктейлев Е.А. Термоэлектрическая энергетика. М.: Атомиздат, 1974. 264 с.
20. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 156 с.

#### **References:**

1. Drozdov V.V. Obschchaya ekologiya. SPb.: RGGMU, 2011. 412 s. [Drozdov V.V. General ecology. St. Petersburg: RGGMU, 2011.412 p. (In Russ.)]
2. Voronov V.K., Grechneva M.V., Sagdeev R.Z. Osnovy sovremennogo yestestvoznaniya. M.: Vysshaya shkola, 1999. - 247 s. [Voronov V.K., Grechneva M.V., Sagdeev R.Z. Fundamentals of modern science. M.: Higher school, 1999. 247 p.]
3. Yeremin YU.N. Moye Zapolyar'ye. - Murmansk: MOIPKRO, 2004. 78 s. [Eremin Yu.N. My Arctic. - Murmansk: MOIPKRO, 2004. 78 p. (In Russ.)]
4. <http://www.eemb.com>.
5. 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. No. 65.
6. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012.
7. Takenobu Kajikawa, Ryoji Funahami The latest developments in the field of technology of thermoelectric power generation in Japan // Thermoelectricity. 2016. No. 1. pp. 4-11.

8. Anatychuk L.I. Current state and some prospects of thermoelectricity // Thermoelectricity. 2007. No2. S. 21-29.
9. Anatychuk L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 2003.376 p.
10. Zayakov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Odessa: Polytechnic Periodics, 2009.175 p.
11. 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. No. 7. pp. 14-19. (In Russ.)]
12. Shuchitangshu Chatterjee Thermoelectricity according to the Indian scenario // Thermoelectricity. 2016. No.6. pp. 7-15.
13. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 194 c. [Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. SPb.: SPbNIUITMO, 2012.194 p (In Russ.)]
14. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. Matematicheskaya model' kholodil'noy ustanovki na baze sloistikh termoelektricheskikh batarey s teplovymi termosifonami // Polzunovskiy vestnik. 2010. №2. S. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. A mathematical model of a refrigeration unit based on layered thermoelectric batteries with thermal thermosiphons // Polzunovsky Bulletin. 2010. No 2. pp. 15-20. (In Russ.)]
15. Ismailov T.A., Yevdulov O.V. Modelirovaniye protsessov teploobmena v termoelektricheskom ustroystve dlya okhlazhdeniya elektronnoy apparatury // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 2002. №7. S. 59-62. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V. Modeling of heat transfer processes in a thermoelectric device for cooling electronic equipment // News of higher educational institutions. Instrument making. 2002. No. 7. pp. 59-62. (In Russ.)]
16. Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Sistemy otvoda teploty ot elementov REA na baze plavyashchikhsya teplovykh akkumulyatorov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiiye nauki. 2015. №1 (36). S. 38-44. [Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Systems of heat removal from REA elements based on melting heat accumulators // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2015. No1 (36). pp. 38-44. (In Russ.)]
17. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Vysshaya shkola. 1967. 600 s. [Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. M.: Higher school. 1967.600 p. (In Russ.)]
18. Anatychuk L.I. Thermocouples and thermoelectric devices. Directory. Kiev: Naukova Dumka, 1979. 385 p.
19. Pozdnyakov B.S., Kokteylev Ye.A. Termoelektricheskaya energetika. M.: Atomizdat, 1974. 264 s. [Pozdnyakov B.S., Kokteylev E.A. Thermoelectric power. M.: Atomizdat, 1974.264 p. (In Russ.)]
20. Grigor'yev I.S., Meylikhov Ye.Z. Fizicheskiye velichiny. Spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1991. 156 s. [Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z. Physical quantities. Directory. M.: Energoatomizdat, 1991.156 p. (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Айгумов Тимур Гаджиевич** – кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

**Алябьев Вячеслав Алексеевич** – магистрант, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Евдулов Денис Викторович** – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

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

**Information about the authors:**

**Timur G. Aigumov**– Cand.Sci. (Economics), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems.

**Vyacheslav A. Alyabev**– Master student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

**Denis V. Evdulov** – Cand.Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

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

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 11.04.2019.

**Принята в печать** 26.05.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 11.04.2019.

**Accepted for publication** 26.05.2019.

**Для цитирования:** Михайлова С.В., Погребная И.А. Повышение производительности центробежных насосов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (2):20-27. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-20-27  
**For citation:** Mikhaylova S.V., Pogrebnaya I.A. Increasing centrifugal pump performance. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2):20-27. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-20-27

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.593

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-20-27

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Михайлова С.В.<sup>2</sup>, Погребная И.А.<sup>1</sup>

<sup>1-2</sup> Тюменский индустриальный университет, филиал в г. Нижневартовске,  
<sup>1-2</sup> 628616, ХМАО-Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина 2П, строение 9, Россия,  
<sup>1</sup> e-mail: sweta02311@gmail.com <sup>2</sup> e-mail: ya.irina0607@yandex.ru

**Резюме. Цель.** Определить перспективные направления повышения качества работы центробежных насосов, применяемых при добыче нефти. **Метод.** В основе метода рассматриваются энергоэффективные установки для высокодебитных скважин – ступени установок «Борец-Weatherford» и ступень ПК «Борец». **Результат.** Разработаны основные гидравлические характеристики электроцентробежных насосов с применением энергоэффективных ступеней при рекомендуемом диапазоне подач. Определена зависимость максимального КПД от применяемых ступеней вышеуказанных установок. Приведен сравнительный анализ энергоэффективной и серийно поставляемой установки электроцентробежных насосов. Приведена зависимость параметров ступеней установок от подачи, напора, количества ступеней, номинальной частоты вращения и КПД насоса. **Вывод.** При применении погружных насосов типа 10ЭЦНМ на нефтяных месторождениях, отмечена повышенная надежность и долговечность в отличие от применения погружных насосов типа ЭЦНМ. С помощью программ повышения энергоэффективности добычи нефти, реализуемых нефтяными компаниями, за счет обеспечения более эффективной работы насосного оборудования, снижено электропотребление. Взятие на вооружение перспективных решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности УЭЦН, является приоритетным. Использование энергоэффективных УЭЦН для эксплуатации высокодебитных и низкодебитных скважин позволяет обеспечить максимальный КПД погружного оборудования и снизить удельное потребление электроэнергии. При сравнительном анализе характеристик насосов с суточной подачей 400 м<sup>3</sup> применение энергоэффективной установки ESP 400–2200 с ВЭД обеспечивает экономию расходов на электроэнергию в три раза.

Сравнительный анализ энергоэффективности представленных насосов показывает, что применение энергоэффективных установок электроцентробежных насосов производства ООО «ПК «Борец» позволит снизить затраты на электроэнергию в среднем на 30%.

**Ключевые слова:** установка электроприводного центробежного насоса, энергоэффективность, погружной многоступенчатый центробежный насос, КПД насоса, высокодебитные и низкодебитные скважины

## POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING INCREASING CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE

**Svetlana V. Mikhaylova<sup>2</sup>, Irina A. Pogrebnaya<sup>1</sup>**

<sup>1-2</sup>Tyumen Industrial University, a branch in Nizhnevartovsk,

<sup>1-2</sup> 2P Lenin Str., Building 9, KhMAO-Yugra, Nizhnevartovsk 628616, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: sweta02311@gmail.com <sup>2</sup>e-mail: ya.irina0607@yandex.ru

**Abstract Objectives** Investigate the prospect of improving the quality of centrifugal pumps in oil production. **Method** The method is based on energy-efficient installations for high-yield wells - the steps of the Borets-Weatherford installations and the Borets PC stages. **Result** The main hydraulic characteristics of electric centrifugal pumps with the use of energy-efficient stages with the recommended feed range have been developed. The dependence of the maximum efficiency on the applied steps of the above installations has been determined. A comparative analysis of energy-efficient and commercially available installation of electric centrifugal pumps is given. The dependence of the parameters of the installation steps on the flow, head, number of stages, nominal speed and efficiency of the pump is given. **Conclusion** When using submersible pumps of the 10ECNM type in oil fields, increased reliability and durability were noted, in contrast to the use of submersible ECNM-type pumps. With the help of energy efficiency programs for oil production, implemented by oil companies, by ensuring more efficient operation of pumping equipment, power consumption has been reduced. The adoption of promising solutions to improve the energy efficiency of ESP systems is a priority. The use of energy-efficient ESP systems for the operation of high-rate and low-rate wells allows to ensure maximum efficiency of the submersible equipment and reduce the specific electricity consumption. In a comparative analysis of the characteristics of pumps with a daily flow of 400 m<sup>3</sup>, the use of an energy-efficient installation ESP 400–2200 with FEA provides three times lower energy costs. A comparative analysis of the energy efficiency of the presented pumps shows that the use of energy-efficient installations of electric centrifugal pumps produced by PC Borets LLC will reduce energy costs by an average of 30%.

**Keywords:** installation of an electric drive centrifugal pump, energy efficiency, submersible multistage centrifugal pump, pump efficiency, high flow and low flow wells

**Введение.** УЭЦН (Установка ЭЦН, установка электроприводного центробежного насоса) УЭЦН относится к погружным бесштанговым насосным установкам. Эти насосы нашли широкое применение для подъема и закачивания рабочей жидкости в пласт, а также для поддержки пластового давления. Оборудование УЭЦН состоит из погружной части, спускаемой в скважину вертикально на колонне НКТ, и наземной части соединенные между собой погружным силовым кабелем [1-4].

Электроприводной центробежный насос для добычи нефти представляет собой многоступенчатую и в общем случае многосекционную конструкцию (рис. 1) [16-18].

Модуль-секция насоса состоит из корпуса, вала, пакета ступеней (рабочих колес и направляющих аппаратов), верхнего и нижнего радиальных подшипников, осевой опоры, головки, основания. Пакет ступеней с валом, радиальными подшипниками и осевой опорой помещаются в корпусе и зажимаются концевыми деталями.

Исполнения насосов отличаются материалами рабочих органов, корпусных деталей, пар трения, конструкцией и количеством радиальных подшипников [5- 9]. ЭЦН состоит из большого числа ступеней — рабочих колес и направляющих аппаратов, находящихся в стальном трубковидном корпусе.

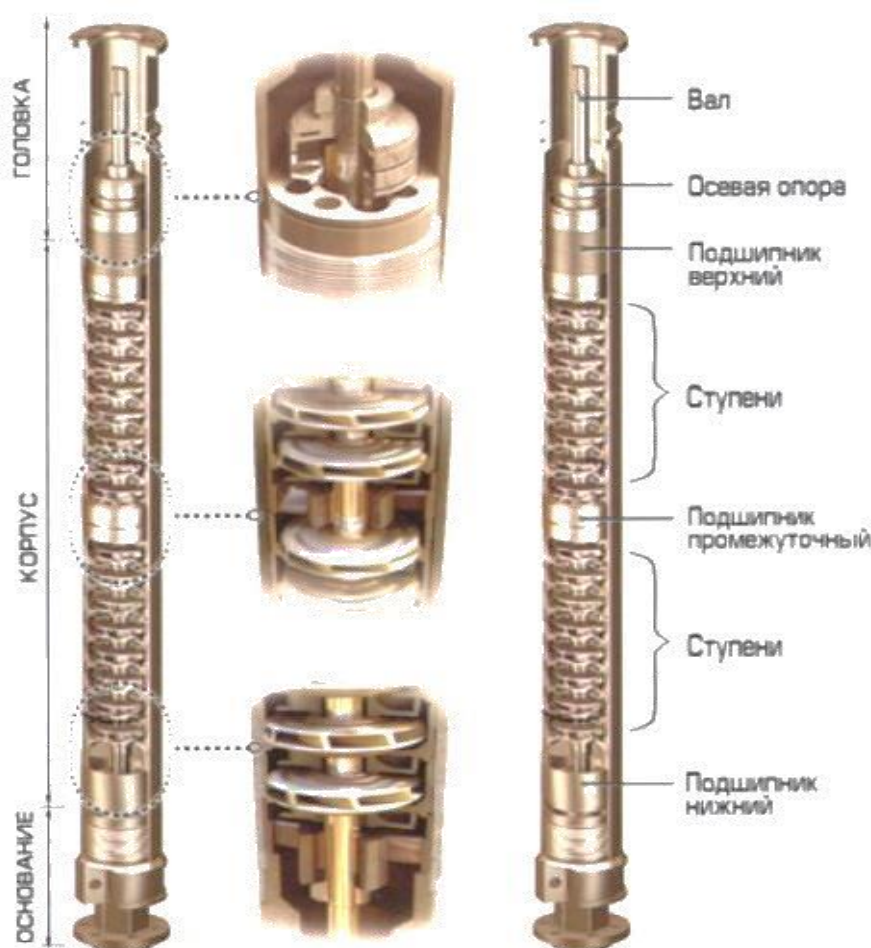


Рис.1. Погружной многоступенчатый центробежный насос  
Fig.1. Submersible multistage centrifugal pump

Направляющие аппараты, состоящие из единого пакета, опираются на основание и закреплены от проворачивания в корпусе верхним подшипником, и рабочие колеса, посаженные на вал при помощи шпонки, которая входит в паз вала и в паз каждого колеса. Сборка производится на одном валу, поддерживаемому осевой опорой. Данная конструкция передает вращение от вала к рабочим колесам [13].

**Постановка задачи.** Закачивание рабочей жидкости в пласт, подъем ее, а также поддержание пластового давления – трудоемкий процесс, который реализуется с помощью применения ЭЦН. Цель данной статьи – определить перспективные направления улучшения качества работы центробежных насосов при добыче нефти.

**Методы исследования.** В основу поиска перспективных направлений и методов повышения производительности центробежных насосов при добыче нефти положено исследование рабочих характеристик погружных насосов типа ЭЦНМ и 10ЭЦНМ [14].

Насосы погружные типа ЭЦНМ и 10ЭЦНМ имеют модульное исполнение со ступенями одноопорной конструкции из высокопрочного легированного модифицированного серого перлитного чугуна, обладающего повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью. Насосы имеют напорную характеристику постоянно падающей формы, исключающей возникновение неустойчивых режимов работы, приводящих к повышенной вибрации насоса и снижающей вероятность отказов оборудования [21].

Для повышения надежности работы насосы оснащаются керамическими осевыми опорами вала [10 -12].

При модернизации насосов ЭЦНМ в конструктивном исполнении насосов 10ЭЦНМ исключены осевые опоры валов в секциях. Осевые силы, действующие на валы насосных секций, передаются на вал протектора и воспринимаются усиленной пятой. При этом конструкторы консоль вала сделали меньше с помощью перенесения в основание и головку секции радиальных подшипников. Насосы такого исполнения отличаются повышенной надежностью и долговечностью (табл. 1).

**Таблица 1. Условия эксплуатации насосов 10ЭЦНМ**  
**Table 1. Operating conditions of pumps 10ECNM**

№ п/п	Характеристика рабочей жидкости Fluid characteristics	Показатель Indicator
1.	Водородный показатель Hydrogen indicator	6,0-8,5 pH
2.	Микротвердость частиц по шкале Мооса Mohs Particle Microhardness	не более 5 баллов no more than 5 points
3.	Концентрация твердых частиц в пластовой жидкости The concentration of solids in the reservoir fluid	0,2 г/л
4.	Максимальное содержание свободного газа на приеме насоса по объему: The maximum content of free gas at the intake of the pump by volume:	25%
4.1.	с применением газосепаратора или диспергатора Using gas separator or dispersant	55%
4.2.	с применением «газосепаратора-диспергатора» Using a "gas separator-dispersant"	68%
5.	Температура откачиваемой жидкости The temperature of the pumped liquid	не более 135 °С no more than 135 ° C

Широкое распространение в нефтегазовой отрасли получили насосы типа ЭЦНД и ЭЦНМИК со ступенями двухопорной конструкции (ЭЦНД) (табл. 2) или одноопорной конструкции с удлиненной ступицей разгруженного рабочего колеса (ЭЦНМИК), что значительно повышает устойчивость вала, снижает вибрационные нагрузки и, тем самым, увеличивает надежность работы насоса [15].

**Таблица 2. Условия эксплуатации насосов двухопорной конструкции**  
**Table 2. Operating conditions for pumps of double support design**

№ п/п	Характеристика рабочей жидкости Fluid characteristics	Ресурс работы насоса Pump life
1.	Водородный показатель Hydrogen indicator	6,0-8,5 pH
2.	Микротвердость частиц по шкале Мооса Mohs Particle Microhardness	не более 7 баллов no more than 7 points
3.	Концентрация твердых частиц в пластовой жидкости The concentration of solids in the reservoir fluid	0,5 г/л
4.	Максимальное содержание свободного газа на приеме насоса по объему: The maximum content of free gas at the intake of the pump by volume:	25%
4.1.	с применением газосепаратора или диспергатора using gas separator or dispersant	55%
4.2.	с применением «газосепаратора-диспергатора» Using a "gas separator-dispersant"	68%
5.	Температура откачиваемой жидкости The temperature of the pumped liquid	не более 135 °С no more than 135 ° C

К преимуществам двухопорной конструкции можно отнести:

- повышенный ресурс нижних осевых опор рабочего колеса (ЭЦНД);
- более надежная изоляция вала от абразивной и коррозионноагрессивной жидкости;
- увеличенный ресурс работы насоса.

В конструктивном исполнении насосов типа 10ЭЦНД и 10ЭЦНМИК исключены осевые опоры валов в секциях. Осевые силы, действующие на валы насосных секций, передаются на вал протектора и воспринимаются усиленной пятой. Радиальные подшипники перенесены в основание и головку секции, тем самым уменьшены консоли вала.

**Обсуждение результатов.** К отечественным производителям насосов относятся следующие компании: ОАО «Борец», ООО «ЛУКОЙЛ ЭПУ Сервис», ОАО «Алнас» (группам компаний «Римера»), АО «ЛЕПСЕ», ООО «ТатПром-Холдинг», ГК «Новомет», ООО «Иж-нефтепласт», Тюменские насосы Шлюмберге и др.

Программы повышения энергоэффективности добычи нефти, реализуемые нефтяными компаниями, предусматривают различные меры по снижению электропотребления, в том числе за счет обеспечения более эффективной работы насосного оборудования [19-20].

По мнению специалистов Петербургской насосной компании по производству и продаже насосного оборудования ОАО «Борец», одним из перспективных решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности УЭЦН, является возможность применения насосов с высоким КПД в оптимальной точке их напорно-расходных характеристик (НРХ) в комплекте с вентильными электродвигателями, также имеющими высокий КПД. Использование энергоэффективных УЭЦН для эксплуатации высокодебитных и низкодебитных скважин позволяет обеспечить максимальный КПД погружного оборудования и снизить удельное потребление электроэнергии.

Применение энергоэффективных установок для высокодебитных скважин занимает приоритетное место при добыче нефти. Рассмотрим три ступени ПК «Борец». В данном случае мы имеем ввиду диапазон КПД ступеней насосов 68–71% при рекомендуемом диапазоне подач 159 установок «Борец-Weatherford» и одну ступень – 864 м<sup>3</sup>/сут. (табл. 3).

**Таблица 3. Энергоэффективные ступени ЭЦН**  
**Table 3. Energy Efficient ESP Stages**

Ступени Steps	Рекомендуемый диапазон подач, м <sup>3</sup> /сут Recommended feed range, m <sup>3</sup> / day	Максимальный КПД, % Maximum efficiency, %
ESP 400-1750	159-334	71
ESP 400-2200	199-421	71
ESP 400-4500	397-858	68
ЭЦНМИК5А-600	480-864	68

Разница в значениях КПД для сравниваемых насосов при подаче 250 м<sup>3</sup>/сут составляет 15%. Как показывают расчеты, общая энергоэффективность установки ESP 400-1750 с вентильным электродвигателем превышает показатели серийно поставляемой УЭЦН того же диапазона подач на 30,5%, что обеспечивает экономию расходов на электроэнергию (табл. 4).

**Таблица 4. Сравнительный анализ энергоэффективной и серийно поставляемой УЭЦН**  
**Table 4. Comparative analysis of energy efficient and commercially supplied ESP systems**

Параметры Options	Подача, м <sup>3</sup> /сут Delivery, m <sup>3</sup> / day	Напор, м Head, m	Количество ступеней Number of steps	Номинальная частота вращения, об./мин Rated rotational speed, rpm	КПД насоса, % Efficiency pump%
ESP 400-1750	250	2000	440	3000	71
УЭЦНД5А 250-2000	250	2000	345	2917	56



Во втором случае анализ проведен для насосов с подачей 400 м<sup>3</sup>/сут.

При сравнении характеристик насоса ESP 400–2200 с вентильным электродвигателем и насоса ЭЦНД5А-400 с асинхронным ПЭД с напорами 2000 м преимущество энергоэффективной установки ESP 400–2200 с ВЭД обеспечивает экономию расходов на электроэнергию на 31% (табл. 5).

**Таблица 5. Сравнительный анализ энергоэффективной и серийно поставляемой УЭЦН**  
**Table 5. Comparative analysis of energy efficient and commercially supplied ESP systems**

Параметры Options	Подача, м <sup>3</sup> /сут Delivery, m <sup>3</sup> / day	Напор, м Head, m	Количество ступеней Number of steps	Номинальная частота вращения, об./мин Rated rotational speed, rpm	КПД насоса, % Efficiency pump%
ESP 400-2200	400	2000	223	3900	71
УЭЦНД5А 400-2000	400	2000	423	2910	58

Подобного эффекта можно добиться и при использовании высокодебитных насосов с КПД 68%, в частности, насосов «Борец-Weatherford» на 4500 барр./ сут и серийно поставляемых насосов ЭЦНМИК5А-600. Компания ТНК-ВР в ближайшее время планирует проведение опытно-промышленных испытаний около 50 энергоэффективных установок компании «Борец» для высокодебитных скважин.

**Вывод.** Сравнительный анализ энергоэффективности представленных насосов показывает, что применение энергоэффективных УЭЦН производства ООО «ПК «Борец» позволит снизить затраты на электроэнергию в среднем на 30%.

Использование энергоэффективных УЭЦН для эксплуатации высокодебитных и низкодебитных скважин позволяет обеспечить максимальный КПД погружного оборудования.

#### Библиографический список

1. Progressive Cavity Pump [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [bestpump.com/progressive-cavity](http://bestpump.com/progressive-cavity).
2. Погружные насосы для скважин: виды, характеристики, монтаж.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [energomir.net/vodoprovod](http://energomir.net/vodoprovod)
3. Погружные насосы для скважин: виды, характеристики, монтаж. – Электронный ресурс. – Режим доступа: [best-pump.com/progressive-cavity/](http://best-pump.com/progressive-cavity/)
4. Industrial Pumps, Screw Pump Manufacturers, Dosing Pumps Suppliers.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [padmavatisalesandservices.com](http://padmavatisalesandservices.com).
5. Ахмедпашаев М.У. Повышение ресурса работы винтов погружных насосов виброобработкой их поверхностей / А.У. Ахмедпашаев, М.У Ахмедпашаев, Ж.Б. Бегов //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016.Т.33. № 4. С. 17-24.
6. Belen P. Thermodynamic assessment of the Ni - Ti phase diagram / P. Belen, K.C.H. Kumar, P.Wolman's // Z. Metallkde. 1996. Bd. 87. N.1. pp.2–13.
7. Begelinger A. Reibung Verschleip und Betriebsrauhigkeit bei verschie denen Lagerwerkstoffen /A. Begelinger // Ind Anz. 1981. V. 103, № 24. pp. 64-67.
8. Roller Burnishing. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [mollart.com/tooling/roller](http://mollart.com/tooling/roller).
9. Fariborz Kavoussi / ESP life cycle / OMV Exploration and Production, 16.9.2013
10. Screw Pump - Progressive Cavity Screw Pump Manufacturer from Nashik.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [positivemeteringpump.com/screw](http://positivemeteringpump.com/screw).
11. Gabor Takacs / Design and analysis of ESP installations, U.S.A. 2009.
12. Hisham A. Mubarak, Farooq A. Khan, Dr Mehmet M. Oskay / ESP failures / Analysis / Solutions in Divided Zone – Case study, Society of Petroleum Engineers 81488, 5-8 April 2003.
13. Ивановский В.Н. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров [и др.]. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 824 с.
14. Каталог центробежных насосов компании Emet Imprex Pl. Варшава 1998г.
15. Молчанов А. Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа; Альянс - Москва, 2013. 588 с
16. Осипов П.Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод: Уч. Пособие. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Лесная промышленность. 1981. 424 с.
17. Погребная И.А., Михайлова С.В., Казаринов Ю.И. Основы гидравлики и гидропневмопривода, Логос - Ставрополь, 2018 с.90

18. Погребная И.А., Михайлова С.В. Центробежные насосы. /Вопросы современной науки Монография, том 32, Интернаука - Москва, 2018. С. 59-75.
19. Погребная И.А., Михайлова С.В. Эксплуатация блока осушки попутного нефтяного газа на примере установки №4 общества с ограниченной ответственностью «Нижневартовский газоперерабатывающий комплекс» Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции / т. 3. – Тюмень: ТИУ, 2017. 369 с. 87-90.
20. Погребная И.А., А.Х. Мустафаев. Проблема кавитации в нефтегазопромысловом оборудовании. Статья Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазопромыслового комплекса. Материалы 5 региональной научно-практической конференции обучающихся ВО, аспирантов и ученых. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. с. 368 - 372
21. Подвинцев И.Б. Нефтепереработка. Практический вводный курс; Интеллект - Москва, 2011. 120 с

#### References:

1. Progressive Cavity Pump [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: bestpump.com/progressive-cavity. [Progressive Cavity Pump [Electronic resource]. - Access Mode: bestpump.com/progressive-cavity. (In Russ.)]
2. Pogruzhnyye nasosy dlya skvazhin: vidy, kharakteristiki, montazh.- [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: energomir.net/vodoprovod [Submersible pumps for wells: types, characteristics, installation .- [Electronic resource]. - Access Mode: energomir.net/vodoprovod(In Russ.)]
3. Pogruzhnyye nasosy dlya skvazhin: vidy, kharakteristiki, montazh. – Elektronnyy resurs. – Rezhim dostupa: bestpump.com/progressive-cavity/ [Submersible pumps for wells: types, characteristics, installation. - Electronic resource. - Access Mode: best-pump.com/progressive-cavity/(In Russ.)]
4. Industrial Pumps, Screw Pump Manufacturers, Dosing Pumps Suppliers.- [Electronic resource]. - Access mode: padmavatisalesandservices.com.
5. Akhmedpashayev M.U Povysheniye resursa raboty vintov pogruzhnykh nasosov vibroobkatkoy ikh poverkhnostey / A.U. Akhmedpashayev, M.U Akhmedpashayev, Zh.B. Begov //Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2016. T.33. № 4. S. 17-24 [Ahmedpashaev M.U. Increasing the service life of the screws of submersible pumps by vibro-rolling of their surfaces / A.U. Akhmedpashaev, M.U. Akhmedpashaev, Zh.B. Begov // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2016. T.33. No. 4. pp. 17-24. (In Russ.)]
6. Belen P. Thermodynamic assessment of the Ni - Ti phase diagram / P. Belen, K.C.H. Kumar, P. Wolman's // Z. Metallkde. 1996. Bd. 87. N.1.pp.2–13.
7. Begelinger A. Reibung Verschleip und Betriebsrauhigkeit bei verschie denen Lagerwerkstoffen / A. Begelinger // Ind Anz. 1981. V. 103, No. 24. pp. 64-67.
8. Roller Burnishing. - [Electronic resource]. - Access mode: mollart.com/tooling/roller.
9. Fariborz Kavoussi / ESP life cycle / OMV Exploration and Production, 09.16.2013
10. Screw Pump - Progressive Cavity Screw Pump Manufacturer from Nashik. [Electronic resource]. Access mode: positivemeteringpump. com / screw.
11. Gabor Takacs / Design and analysis of ESP installations, U.S.A. 2009
12. Hisham A. Mubarak, Farooq A. Khan, Dr Mehmet M. Oskay / ESP failures / Analysis / Solutions in Divided Zone - Case study, Society of Petroleum Engineers 81488, April 5-8, 2003.
13. Ivanovskiy V.N. Skvazhinnyye nasosnyye ustanovki dlya dobychi nefi / V.N. Ivanovskiy, V.I. Darishchev, A.A. Sabirov [i dr.]. – M.: GUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina, 2002. – 824 s. [Ivanovsky V.N. Well pumping units for oil production / V.N. Ivanovsky, V.I. Darishchev, A.A. Sabirov [et al.]. M.: State Unitary Enterprise Publishing House "Oil and Gas" of the Russian State University of Oil and Gas named after THEM. Gubkina, 2002. 824 p. (In Russ.)]
14. Emet Impex PI Centrifugal Pump Catalog Warsaw 1998.
15. Molchanov A. G. Mashiny i oborudovaniye dlya dobychi nefi i gaza; Al'yans - Moskva, 2013. - 588 c [Molchanov A. G. Machines and equipment for oil and gas production; Alliance - Moscow, 2013. 588 p.
16. Osipov P.Ye. Gidravlika, gidravlicheskiye mashiny i i gidroprivod: Uch. Posobiye. 3-ye izd., pererab. i dop. - M.: Lesnaya promyshlennost'. 1981. 424 s. [Osipov P.E. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive: Uch. Allowance. 3rd ed., Revised. and add. M.: Forest industry. 1981. 424 p. (In Russ.)]
17. Pogrebnaya I.A., Mikhaylova S.V., Kazarinov YU.I. Osnovy gidravliki i gidropnevmoprivoda, Logos - Stavropol', 2018 s.90 [ Pogrebnaya I.A., Mikhailova S.V., Kazarinov Yu.I. Fundamentals of hydraulics and hydropneumatic drive, Logos - Stavropol, 2018 p.90 (In Russ.)]
18. Pogrebnaya I.A., Mikhaylova S.V. Tsentrobezhnyye nasosy. /Voprosy sovremennoy nauki Monografiya, tom 32, Internauka - Moskva, 2018. – 59-75 c. [Pogrebnaya I.A., Mikhailova S.V. Centrifugal pumps. / Issues of Modern Science Monograph, Volume 32, Internauka - Moscow, 2018. pp 59-75 (In Russ.)]
19. Pogrebnaya I.A., Mikhaylova S.V. Ekspluatatsiya bloka osushki poputnogo neftyanogo gaza na primere usta-novki №4 obshchestva s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Nizhnevartovskiy gazopererabatyvayushchiy kompleks» No-vyye tekhnologii – neftegazovomu regionu: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / t. 3.

- Tyumen': TIU, 2017. – 369 s. 87-90. [Pogrebnaya I.A., Mikhailova S.V. Operation of the associated petroleum gas dehydration unit as exemplified by installation No. 4 of the Nizhnevartovsk Gas Processing Complex Limited Liability Company New technologies for the oil and gas region: materials of the international scientific and practical conference / vol. 3. - Tyumen: TIU, 2017. 369 pp. 87-90 (In Russ.)]
20. Pogrebnaya I.A., A.Kh. Mustafayev Problema kavitatsii v neftegazopromyslovom oborudovanii. Stat'ya Opyt, aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya neftegazopromyslovogo kompleksa. Materialy 5 regio-nal'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya VO, aspirantov i uchenykh. – Tyumen': TyumGNGU, 2015. – s. 368 - 372 [Pogrebnaya I.A., A.Kh. Mustafayev The problem of cavitation in oil and gas equipment. Article Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas industry. Materials of the 5th regional scientific-practical conference of students of higher education, graduate students and scientists. - Tyumen: Tsogu, 2015. pp. 368 – 372 (In Russ.)]
21. Podvintsev I. B. Neftepererabotka. Prakticheskiy vvodnyy kurs; Intellect - Moskva, 2011. 120 c [Podvintsev I. B. Oil refining. Practical introductory course; Intellect - Moscow, 2011. 120 p. (In Russ.)]

**Сведения об авторах.**

**Михайлова Светлана Викторовна** – ассистент, кафедра «Нефтегазовое дело».

**Погребная Ирина Алексеевна** – доцент, кандидат педагогических наук, кафедра «Нефтегазовое дело».

**Information about the authors.**

**Svetlana V. Mikhaylova** – Assistant, Department of Oil and Gas Business.

**Irina A. Pogrebnaya** – Cand.Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Oil and Gas Business.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 30.03.2019.

**Принята в печать** 26.04.2019.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 30.03.2019.

**Accepted for publication** 26.04.2019.

**Для цитирования:** Алибеков А.К., Алибеков Г.А. Модели определения максимальной степени наполнения каналов круговой формы сечения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(2): 28-36. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-28-36

**For citation:** Alibekov A.K., Alibekov G.A. Models for determining maximum degree filling channels of circular section shape. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 28-36. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-28-36

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 627.132:532.543

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-28-36

### МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ КАНАЛОВ КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ

Алибеков А.К.<sup>1</sup>, Алибеков Г.А.<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup>367015 г. Махачкала, пр. М.Ярагского, 81а, 57, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [ali.dgtu@rambler.ru](mailto:ali.dgtu@rambler.ru), <sup>2</sup>e-mail: [galibekov@inbox.ru](mailto:galibekov@inbox.ru)

**Резюме. Цель.** Задача состояла в получении модели для определения максимально возможной степени наполнения каналов круговой формы сечения в земляном русле, исходя из условия обеспечения устойчивости откосов и минимального объема выемки грунта при их возведении, а также в поиске оптимальной степени наполнения укрепленных каналов замкнутого профиля, соответствующей максимальной пропускной способности. **Метод.** В работе использованы аналитические методы дифференциального исчисления и решения неявных уравнений. **Результат.** Для решения поставленных задач, подборе методов исследования и критериев оптимизации параметров каналов учтен опыт отечественных и зарубежных исследователей. Рассмотрены два случая каналов круговой формы сечения: в земляном русле; укрепленный замкнутого поперечного профиля. Для случая гидравлически наивыгоднейшего кругового канала в земляном русле путем приравнивая первой производной уравнения окружности обратной величине допустимого коэффициента заложения откосов получено аналитическое решение для определения максимальной степени наполнения из условия устойчивости откосов, которая оказалась не зависящей от величины транспортируемого расхода воды и гидравлических элементов потока. В случае несвязных грунтов, слагающих русло, круговой канал можно наполнить на глубину, не превышающую 20 процентов от радиуса канала. При этом средняя скорость потока должна оставаться в пределах от незаияющей до неразмывающей. Для возможности нахождения расхода даны аналитические выражения нахождения гидравлических элементов потока в круговом канале. При определении объема выемки грунта по возведению канала учтено превышение бровки канала над максимальным уровнем воды в канале. Для случая укрепленного канала замкнутого поперечного профиля путем взятия производных из формулы Шези получены оптимальные значения расхода и средней скорости. **Вывод.** Укрепленный замкнутого кругового профиля канал имеет максимальную пропускную способность при относительной степени наполнения 0,938, а максимальная средняя скорость движения жидкости в безнапорном канале достигается при степени наполнения 0,815.. Для определения максимально допустимой относительной степени наполнения в случае канала кругового сечения в земляном русле получены аналитические зависимости, до применения которых по справочной литературе предварительно нужно принять величину коэффициента заложения откоса для данного вида грунта ложка канала.

**Ключевые слова:** канал круговой формы сечения, устойчивость грунтовых откосов, канал в земляном русле, канал замкнутого профиля, объем выемки грунта

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### MODELS FOR DETERMINING MAXIMUM DEGREE FILLING CHANNELS OF CIRCULAR SECTION SHAPE

**Ali K. Alibekov<sup>1</sup>, Gaidar A. Alibekov<sup>2</sup>**

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

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

<sup>2</sup>81a, 57 M. Yaragsky Str., Makhachkala 367015, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [ali.dgtu@rambler.ru](mailto:ali.dgtu@rambler.ru), <sup>2</sup>e-mail: [galibekov@inbox.ru](mailto:galibekov@inbox.ru)

**Abstract Objectives** The task was to obtain a model for determining the maximum possible degree of filling the circular section channels in the earthen channel based on the condition of ensuring the stability of slopes and the minimum volume of excavation during their construction, as well as finding the optimum degree of filling fortified channels of a closed profile corresponding to maximum throughput. **Method** In work analytical methods of differential calculus and the solution of implicit equations are used. **Result** The experience of domestic and foreign researchers was taken into account to solve the set tasks, select research methods and criteria for optimizing channel parameters. Two cases of circular-shaped channels are considered: 1) in the earth channel, 2) reinforced with a closed transverse profile. For the case of a hydraulically most advantageous circular channel in the earthen channel, equating the first derivative of the equation of a circle with the reciprocal of the allowable embedding coefficient of the slopes obtained an analytical solution for determining the maximum degree of filling from the slope stability condition, which was not dependent on hydraulic flow elements. In the case of non-cohesive soils that form the channel, the circular channel can be filled to a depth not exceeding 20 percent of the channel radius. At the same time, the average flow rate should remain in the range from non-venting to non-blurring. In order to be able to determine the flow rate, analytical expressions are given for finding hydraulic flow elements in a circular channel. When determining the volume of excavation for the construction of the channel, the excess of the channel edge above the maximum water level in the channel was taken into account. For the case of a fortified channel of a closed transverse profile, by taking the derivatives from the Chezy formula, we obtained the optimal values of flow rate and average velocity. **Conclusion** A fortified closed circular profile channel has a maximum capacity with a relative degree of filling of 0.938, and the maximum average velocity of a fluid in a pressureless channel is achieved with a degree of filling of 0.815. To determine the maximum permissible relative degree of filling in the case of a circular section channel in the earthen channel, analytical dependences were obtained, before using which, according to the reference literature, it is necessary to take the value of the slope coefficient for this type of channel bed soil.

**Key words:** circular channel of section, stability of soil slopes, channel in the earthen channel, channel of the closed profile, volume of excavation

**Введение.** При проектировании каналов, предназначенных для подачи воды потребителю на цели водоснабжения, водоотведения, орошения и осушения земель, для нужд различных технологических процессов производства, необходимо решить ряд задач, определяющих стоимость объекта: выбор трассы прокладки канала и формы сечения, оценка пропускной способности, сравнение вариантов крепления в случае размываемости грунта ложа канала и др. [1-3, 7-8, 13-16 и др.]. Основными факторами, влияющими на принятие практически приемлемых решений, являются величина подаваемого расхода, топографические и геологические условия района. Относительно формы поперечного сечения канала в [4, 6, 12] показано, что при одинаковой величине площади живого сечения каналы круговой формы предпочтительнее в силу минимальной поверхности трения и соответственно максимальной пропускной способности. В отношении типа крепления ложа канала можно считать экономически выгодным транспортирование воды с помощью каналов без крепления в земляном русле, поскольку из всех типов со-



$$x^2 + (r - y)^2 = r^2, \quad (2)$$

где  $y$  – ордината, из (2)

$$y = r - \sqrt{r^2 - x^2}. \quad (3)$$

Далее найдем производную полученной функции (3) в точке  $M$ , которая по определению равна  $\operatorname{tg} \alpha$ , и с учетом условия (1) получим:

$$y'_m = \frac{-x_m}{\sqrt{r^2 - x_m^2}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha} = \frac{1}{m}. \quad (4)$$

Половина ширины уреза воды по верху (абсцисса точки  $M$ ) из (4)

$$x_m = \frac{r}{\sqrt{m^2 + 1}}. \quad (5)$$

Полученное выражение  $x_m$  подставим в (3) и выразим ординату точки  $M$ , которая с другой стороны является максимально допустимой глубиной воды в канале  $h$ :

$$y_m = r - mx_m = r \left( 1 - \frac{m}{\sqrt{m^2 + 1}} \right) = h. \quad (6)$$

Отсюда максимально допустимое относительное наполнение канала:

$$\left( \frac{h}{r} \right)_{\max} = 1 - \frac{m}{\sqrt{m^2 + 1}}. \quad (7)$$

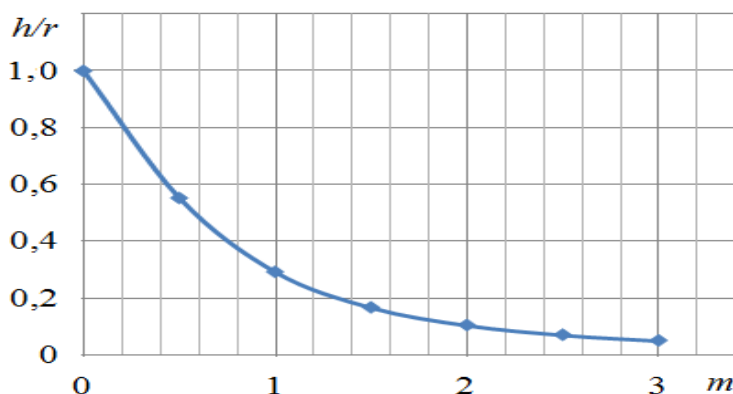


Рис. 2. Зависимость относительной глубины наполнения канала от коэффициента заложения откоса

Fig. 2. The dependence of the relative depth of the filling channel on the coefficient of the slope

**Обсуждение результатов.** Анализ зависимости (7) и ее наглядное графическое представление на рис. 2 позволяют отметить:

- максимальная относительная степень наполнения гидравлически наивыгоднейшего канала кругового сечения не зависит от величины транспортируемого расхода воды и гидравлических элементов потока,

- для несвязных грунтов ложа канала (с меньшим значением сил сцепления частиц грунта между собой) круговой канал можно наполнить не более, чем  $h = 0,2r$ .

Выразим далее гидравлические элементы потока через коэффициент заложения откоса, которые компактнее можно выразить через центральный угол  $\beta$  (рис. 1).

Предварительно из равенства углов с взаимно перпендикулярными сторонами найдем связь

$$\frac{\beta}{2} = \alpha. \quad (8)$$

Отсюда с учетом (4) максимальный центральный угол

$$\beta_{\max} = 2 \arctg \left( \frac{1}{m} \right). \quad (9)$$

При разных расходах воды в канале будет соответствующая степень наполнения канала  $h$ . Зависимость для определения центрального угла при любой глубине  $h$  будет иметь вид:

$$\beta = 2 \arccos \left( 1 - \frac{h}{r} \right),$$

где  $0 < \beta \leq \beta_{\max}$ , град.

Заметим, что рис. 2 и зависимости (8) и (9) соответствуют критерию устойчивости грунтового откоса, а другие требования проектирования каналов могут налагать соответствующие дополнительные ограничения: обеспечение максимальной пропускной способности, минимизация объема выемки грунта, потерь воды на фильтрацию и испарение, нахождение средней скорости потока в пределах от незаиляющей до размывающей и др. [5, 9, 11].

Найдем основные гидравлические элементы потока для сечения канала, изображенного на рис. 1:

- площадь живого сечения потока

$$\omega = (\pi\beta/180^0 - \sin\beta)r^2/2, \quad (10)$$

- смоченный периметр

$$\chi = \pi r \beta / 180^0,$$

- гидравлический радиус,  $R = \omega/\chi$ ,

- ширина по урезу воды

$$B = 2r \sin(\beta/2),$$

- средняя скорость по формуле Шези

$$v = C \sqrt{Ri}, \quad (11)$$

где  $i$  - продольный уклон дна канала,

$C$  - коэффициент Шези, для определения которого предложено множество методик, наиболее простой для выполнения расчетов представляется формула Маннинга:



$$C = \frac{1}{n} R^{1/6},$$

$n$  – коэффициент шероховатости материала ложа канала.

Зависимости для определения средней скорости и расхода в случае безнапорного равномерного движения воды в открытых руслах получим путем подставки в (11) выражений входящих параметров и после небольших преобразований можно получить:

$$v = 9,3627 r^{2/3} \frac{\sqrt{i}}{n} (0,01745 - \beta^{-1} \sin \beta)^{5/3}. \quad (12)$$

$$Q = \omega v = 4,6812 r^{8/3} \frac{\sqrt{i}}{n} (0,01745 \beta^{3/5} - \beta^{-2/5} \sin \beta)^{5/3}. \quad (13)$$

Одним из параметров, необходимых для нахождения объема выемки грунта при возведении или реконструкции канала, является превышение бровки  $\Delta$  над максимальным уровнем воды в канале (рис.1), которая из-за сложности учета не учтена многими исследователями. Согласно [12 и др.] величина  $\Delta$  определяется по таблице в зависимости от расхода, хотя отмечается, что она учитывает: увеличение шероховатости русла канала в процессе эксплуатации, подпор у различных сооружений на канале, влияние на глубину потока заиления и встречного ветра, снижающего скорость течения воды, осадку дамбы и смыв грунта дамб осадками, другие факторы.

Из сказанного вытекает сложность оценки величины  $\Delta$ , поскольку перечисленные факторы могут встречаться в различных сочетаниях и трудно оценить вероятность их совместного появления. В [5] путем аппроксимации табличных данных из [12] для каналов без облицовки, с грунтово-пленочным экраном и для сооружений при наличии аэрации или сбойности течения предложена зависимость:

$$\Delta = 0,2 + 0,008Q - 0,00004Q^2.$$

Аналитическое представление  $\Delta$  позволяет точнее подсчитать объем грунта выемки, а также автоматизировать процесс выполнения расчетов на ЭВМ.

Необходимый объем выемки грунта при прокладке канала полностью в выемке

$$V_{\text{выем}} = \omega_b l,$$

где площадь сечения выемки находят по (10) при  $\beta = 2\arccos(1-(h + \Delta)/r)$ .

2. Далее рассмотрим случай укрепленных круговых каналов замкнутого профиля с твердыми стенками (рис.3).

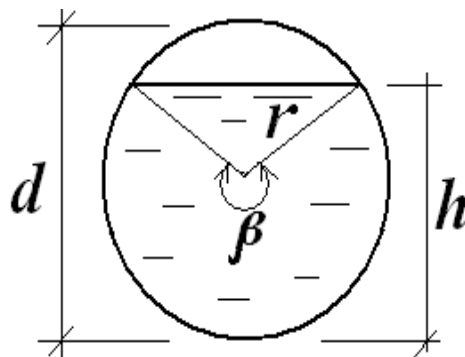


Рис. 3. Круговой канал замкнутого профиля  
Fig. 3. The circular channel of the closed profile

Степень наполнения канала, при которой обеспечивается пропуск максимального расхода при заданной форме и размерах сечения, является оптимальной по этому критерию и ее значение можно получить из условия:

$$\text{при } Q = Q_{\max} \quad dQ/d\beta = 0. \quad (14)$$

Для конкретного кругового сечения канала  $r$  и  $n = \text{const}$ . Тогда при положительных и (или) постоянных значениях  $r$ ,  $n$  и  $i$  условие (14) поиска экстремума функции расхода (13) и скорости (12) запишутся в виде:

$$\frac{dQ}{d\beta} = 0 \rightarrow \frac{d(0,0174533\beta^{3/5} - \beta^{-2/5} \sin \beta)^{5/3}}{d\beta} = 0,$$

$$\frac{dv}{d\beta} = 0 \rightarrow \frac{d(0,0174533 - \beta^{-1} \sin \beta)^{2/3}}{d\beta} = 0.$$

По результатам расчетов, выполненных по полученным формулам при различных  $h$ ,  $i$ ,  $n$ ,  $r$ , построены графики, представленные на рис. 4, где явно видно наличие экстремумов исследуемых функций расхода и скорости.

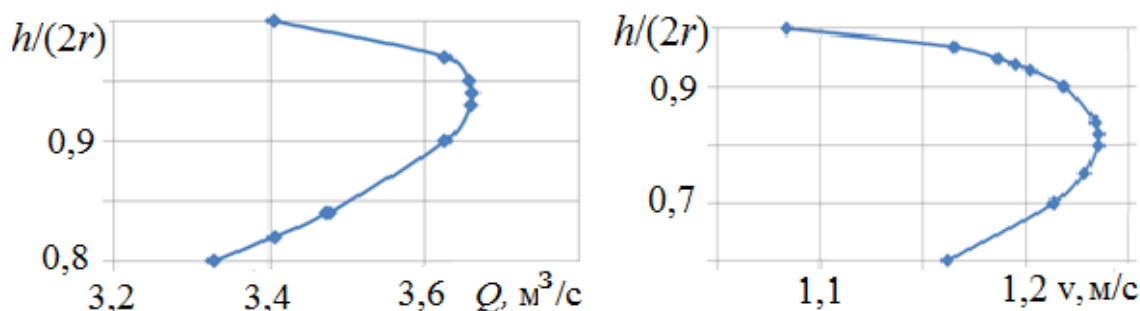


Рис.4. Зависимости  $Q = f(h/(2r))$  и  $v = f(h/(2r))$   
 Fig. 4. Dependences  $Q = f(h / 2r)$  and  $v = f(h / (2r))$

**Вывод. 1.** Укрепленный замкнутого кругового профиля канал имеет максимальную пропускную способность при значении центрального угла  $\beta = 302,327^\circ$  или, выражая это через практический параметр, относительной степени наполнения  $h/(2r) = 0,938$ .

При такой степени наполнения пропускается расход на 7,6 % больше по сравнению с полным наполнением сечения канала.

Это обстоятельство обусловлено тем, что при степени наполнения канала  $h/(2r) > 0,938$  смоченный периметр  $\chi$  растет быстрее площади живого сечения  $\omega$ , тогда гидравлический радиус  $R$ , а с ним и расход  $Q$ , начинают уменьшаться. А максимальная средняя скорость движения жидкости в безнапорном канале имеет место при  $\beta = 258,1^\circ$  или  $h/(2r) = 0,815$ .

**2.** В случае канала кругового сечения в земляном русле для определения максимально допустимой относительной степени наполнения рекомендуется пользоваться зависимостью (7), предварительно установив по справочной литературе величину коэффициента заложения откоса для данного вида грунта ложа канала.

При этом средние скорости потока должны находиться в пределах: более незаиляющей и не более неразмывающей. Стоит также отметить, что полученные модели (12) и (13) удобны для выполнения расчетов в силу их близости к одномерным.

#### Библиографический список:

1. Алибеков А.К. Поиск оптимальной длины холостой части магистрального оросительного канала// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 2 (21). – С. 99-104.
2. Алибеков А.К. Оптимальная относительная ширина канала по дну в земляном русле// Мониторинг. Наука и технологии. – 2012. № 3 (12). – С.48-52.

3. Алибеков А.К. Проектирование параболических каналов// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2015. - № 37. - С.18 – 25.
4. Алибеков А.К. Основы гидравлики: теория и практика Учебное пособие. – Махачкала: ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2016. – 172 с.
5. Алибеков А.К., Гасанов К.А. Проектирование каналов в земляном русле с оптимальными параметрами: Учебное пособие. – Махачкала: ФГБОУ ВПО «ДГТУ», 2013. - 112 с.
6. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (Гидравлика). – СПб.: СПбГПУ, 2007. – 545 с.
7. Дементьев В.Г. Орошение. – М.: Колос, 1979. - 304 с.
8. Курбанов С.О. Развитие теории, методов расчетного обоснования и проектирования каналов и зарегулированных русел с полигональным поперечным сечением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ФГБОУ «МГУП», 2013. - 57 с.
9. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. - М.: Колос, 1967. – 178 с.
10. Михалев М.А. Расчет магистральных каналов// Инженерно-строительный журнал, 2013. № 4(39). – С. 83 - 93.
11. Михалев М.А., Алибеков А. К. Условие начала трогания несвязных грунтов. В кн.: Гидравлика русловых потоков: Сб. науч. тр. – Калинин: КГУ: 1985. – С. 8 - 14.
12. СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 65 с.
13. Угинчус А.А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов. – М.: Стройиздат, 1965. - 274 с.
14. Bhattacharjya R.K., Satish M.G. Optimal design of a stable trapezoidal channel section using hybrid optimization technique// Journal of Irrigation and Drainage Engineering. – 2007. – Vol. 133. – P. 323–329.
15. Chahar B.R. Optimal design of a special class of curvilinear bottomed channel section// Journal of Hydraulic Engineering. 2007. 133. Pp. 571–576.
16. Das A. Chance constrained optimal design of trapezoidal channels// Journal of Water Resources Planning and Management. – 2008. – Vol. 134. – P. 310–313.
17. Easa S.M. New and improved channel cross section with piecewise linear or smooth sides// Canadian Journal of Civil Engineering. – 2011. – Vol. 38. – P. 690–697.
18. Fatchullaev A.M., Arifjanov A.M. Optimization of hydraulic parameters of irrigation canals in earthen channel// European science review. – 2016. –№ 9-10. – P. 220 - 223.
19. Fatchullaev A.M., Hazratov A.N. Limit irrigation canals regimes in earthen channel// Agro ilm. – Number 3(15). – 2010. – P. 41 - 42.
20. Shen H., Zhang X., Qiao W. Partition curve of hydraulic radius and average sidewall and bed shear stresses in open-channel flows. Journal of Hydroelectric Engineering. – 2011. – Vol. 30. – P. 44 - 48.
21. Sun G., Wei W., Zhang P., Yang G., Hu W. Calculation of optimal hydraulic cross section of a cubic parabola-shape open channel// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2011. Article No. 5748593.

#### References:

1. Alibekov A.K. Poisk optimal'noy dliny kholostoy chasti magistral'nogo orositel'nogo kanala// Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2011. № 2 (21). pp. 99-104. [Alibekov A.K. Search for the optimal length of the blank part of the main irrigation canal // Bulletin of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2011. No. 2 (21). pp. 99-104. (In Russ.)]
2. Alibekov A.K. Optimal'naya odnositel'naya shirina kanala po dnu v zemlyanom rusle// Monitoring. Nauka i tekhnologii. – 2012. № 3 (12). – S.48-52. [Alibekov A.K. The optimal relative width of the channel along the bottom in the earthen channel // Monitoring. Science and technology. 2012. No. 3 (12). pp. 48-52. (In Russ.)]
3. Alibekov A.K. Proyektirovaniye parabolicheskikh kanalov// Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2015. № 37. pp.18 – 25. [Alibekov A.K. Design of parabolic channels // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2015. No. 37. pp.18 - 25. (In Russ.)]
4. Alibekov A.K. Osnovy gidravliki: teoriya i praktika Uchebnoye posobiye. – Makhachkala: FGBOU VO «DGTU», 2016. – 172 s. [Alibekov A.K. Fundamentals of Hydraulics: Theory and Practice Study Guide. - Makhachkala: FSBEI HE "DSTU", 2016. 172 p. (In Russ.)]
5. Alibekov A.K., Gasanov K.A. Proyektirovaniye kanalov v zemlyanom rusle s optimal'nymi parametrami: Uchebnoye posobiye. – Makhachkala: FGBOU VPO «DGTU», 2013. - 112 s. [Alibekov A.K., Gasanov K.A. Designing channels in an earthen channel with optimal parameters: a manual. - Makhachkala: FSBEI HPE DGTU, 2013. - 112 p. (In Russ.)]
6. Girgidov A.D. Mekhanika zhidkosti i gaza (Gidravlika). – SPb.: SPbGPU, 2007. – 545 s [Girgidov A.D. Mechanics of fluid and gas (Hydraulics). SPb.: SPbGPU, 2007. 545 p. (In Russ.)]
7. Dement'yev V.G. Orosheniye. – М.: Kolos, 1979. - 304 s. [Dementiev V.G. Irrigation. М.: Kolos, 1979. 304 p. (In Russ.)]

8. Kurbanov S.O. Razvitiye teorii, metodov raschetnogo obosnovaniya i proyektirovaniya kanalov i zaregulirovannykh rusel s poligonal'nym poperechnym secheniyem: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. naauk. – M.: FGBOU «MGUP», 2013. – 57 s. [Kurbanov S.O. Development of the theory, methods of calculation justification and design of channels and regulated channels with a polygonal cross section: author. dis. ... Dr. tech. science. – M.: FSBEI "MGUP", 2013. – 57 p. (In Russ.)]
9. Mirtskhulava TS. Ye. Razmyv rusel i metodika otsenki ikh ustoychivosti. – M.: Kolos, 1967. – 178 s. [Mirtskhulava Ts. E. Channel erosion and methods for assessing their stability. – M.: Kolos, 1967. – 178 p. (In Russ.)]
10. Mikhalev M.A. Raschet magistral'nykh kanalov// Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal, 2013. № 4(39). – S. 83 - 93. [Mikhalev M.A. Calculation of the main canals // Civil Engineering Journal, 2013. No. 4 (39). – S. 83 - 93. (In Russ.)]
11. Mikhalev M.A., Alibekov A. K. Usloviye nachala trovaniya nesvyaznykh gruntov. V kn.: Gidravlika rus-lovykh potokov: Sb. nauch. tr. – Kalinin: KGU: 1985. – S. 8 - 14. [Mikhalev MA, Alibekov AK. The condition for the start of moving off disconnected soils. In the book: Hydraulics of channel flows: Sat. scientific tr - Kalinin: KSU: 1985.- S. 8 - 14. (In Russ.)]
12. SP 100.13330.2016 Meliorativnyye sistemy i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.03-85. – M.: TSITP Gosstroya SSSR, 1986. – 65 s. [SP 100.13330.2016 Reclamation systems and facilities. Updated version of SNiP 2.06.03-85. – M.: TsITP Gosstroy of the USSR, 1986. – 65 p. (In Russ.)]
13. Uginchus A.A. Gidravlicheskiye i tekhniko-ekonomicheskiye raschety kanalov. – M.: Stroyizdat, 1965. – 274 s. [Uginchus A.A. Hydraulic and technical and economic calculations of channels. – M.: Stroyizdat, 1965. – 274 p.]
14. Bhattacharjya R.K., Satish M.G. Optimal design of a stable trapezoidal channel section using hybrid optimization technique// Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2007. Vol. 133. pp. 323–329.
15. Chahar B.R. Optimal design of a special class of curvilinear bottomed channel section// Journal of Hydraulic Engineering. 2007. 133. Pp. 571–576.
16. Das A. Chance constrained optimal design of trapezoidal channels// Journal of Water Resources Planning and Management. 2008. Vol. 134. pp. 310–313.
17. Easa S.M. New and improved channel cross section with piecewise linear or smooth sides// Canadian Journal of Civil Engineering. 2011. Vol. 38. pp. 690–697.
18. Fatchullaev A.M., Arifjanov A.M. Optimization of hydraulic parameters of irrigation canals in earthen channel// European science review. 2016. No. 9-10. pp. 220 - 223.
19. Fatchullaev A.M., Hazratov A.N. Limit irrigation canals regimes in earthen channel// Agro ilm. No. 3(15). 2010. pp. 41 - 42.
20. Shen H., Zhang X., Qiao W. Partition curve of hydraulic radius and average sidewall and bed shear stresses in open-channel flows. Journal of Hydroelectric Engineering. 2011. Vol. 30. P. 44 - 48.
21. Sun G., Wei W., Zhang P., Yang G., Hu W. Calculation of optimal hydraulic cross section of a cubic parabola-shape open channel// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2011. Article No. 5748593.

**Сведения об авторах:**

**Алибеков Али Казимбекович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра бурения нефтяных и газовых скважин.

**Алибеков Гайдар Алиевич** – соискатель.

**Information about the authors:**

**Ali K. Alibekov** - Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Oil and Gas Well Drilling.

**Gaidar A. Alibekov**- Aspirant.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 17.04.2019.

**Принята в печать** 30.05.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 17.04.2019.

**Accepted for publication** 30.05.2019.

**Для цитирования:** Алферов В.П., Дровникова И.Г., Обухова Л.А., Rogozin E.A. Вербальная модель управления слабо уязвимым процессом разграничения доступа пользователей к программным средствам системы электронного документооборота. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 37-49. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-37-49

**For citation:** Alferov V.P., Drovnikova I.G., Obukhova L.A., Rogozin E.A. Verbal model of management of a vulnerable process of dedicating the access of users to the software of the electronic document system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 37-49. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-37-49

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.7: 004.05

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-37-49

### ВЕРБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СЛАБО УЯЗВИМЫМ ПРОЦЕССОМ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ К ПРОГРАММНЫМ СРЕДСТВАМ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

Алфёров В.П.<sup>1</sup>, Дровникова И.Г.<sup>2</sup>, Обухова Л.А.<sup>4</sup>, Rogozin E.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет,

<sup>1</sup>39402, г. Воронеж, Московский пр., 14, Россия,

<sup>2-4</sup>Воронежский институт МВД России,

<sup>2-4</sup>394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [alferov\\_vladimir@mail.ru](mailto:alferov_vladimir@mail.ru), <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: [obukhova.lyudmila@bk.ru](mailto:obukhova.lyudmila@bk.ru)

**Резюме. Цель.** Традиционные способы решения проблемы защиты информационного ресурса систем электронного документооборота, базирующиеся на защитных базовых функциях (идентификации, аутентификации и верификации пользователей и др.) имеющихся средств и подсистем информационной безопасности, обладают существенным недостатком — неэффективностью при овладении злоумышленником паролем штатных пользователей. С целью его устранения необходимо разработать новые методы, связанные с управлением слабо уязвимым процессом разграничения доступа пользователей не только к конфиденциальным сведениям, но и к программным средствам системы электронного документооборота. **Метод.** Одним из способов решения указанной проблемы является применение модифицированного метода «мягкого администрирования», заключающегося в автоматическом формировании списков разрешённых файлов-источников в матрице установления полномочий путём редуцирования списков и сравнения функций целостности файлов с эталонным перечнем для имеющегося пакета программных средств. Это позволяет автоматизировать процесс разработки правил разграничения доступа и обеспечить управление слабо уязвимым процессом разграничения доступа к программным средствам системы электронного документооборота. **Результат.** Разработана вербальная модель автоматизированного управления слабо уязвимым процессом разграничения доступа к программным средствам системы электронного документооборота и предложена система показателей эффективности функционирования перспективной подсистемы защиты конфиденциальных сведений, характеризующих её как объект управления. **Вывод.** Представленная вербальная модель предусматривает возможность распределённого управления, при котором администратор защиты непосредственно управляет указанным процессом с помощью удалённого программного средства. Формирование (изменение) матрицы установления полномочий при управлении слабо уязвимым процессом разграничения доступа с помощью перспективной подсистемы защиты конфиденциальных сведений и разработка системы показателей комплексной оценки эффективности её функционирования является одной из важнейших задач защиты информации от несанкционированного доступа, гарантирующей выполнение политики безопасности в течение всего времени эксплуатации защищённой системы электронного документооборота.

**Ключевые слова:** система электронного документооборота, подсистема защиты конфиденциальных сведений, защита информационного ресурса, несанкционированный доступ, разграничение доступа, политика безопасности, матрица установления полномочий

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

VERBAL MODEL OF MANAGEMENT OF A VULNERABLE PROCESS OF  
DEDICATING THE ACCESS OF USERS TO THE SOFTWARE OF THE ELECTRONIC  
DOCUMENT SYSTEM

Vladimir P. Alferov,<sup>1</sup> Irina G. Drovnikova<sup>2</sup>, Lyudmila A. Obukhova<sup>4</sup>, Evgenii A. Rogozin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University,

<sup>1</sup>14 Moskovsky Ave., Voronezh 139402, Russia,

<sup>2-4</sup>Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,

<sup>2-4</sup>53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [alferov\\_vladimir@mail.ru](mailto:alferov_vladimir@mail.ru), <sup>2</sup>e-mail: [drovnikova@mail.ru](mailto:drovnikova@mail.ru),

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

**Abstract Objectives** Traditional methods for solving the problem of protecting the information resource of electronic document management systems based on protective basic functions (identification, authentication and verification of users, etc.) of available tools and information security subsystems have a significant drawback - inefficiency when an attacker masters the password of regular users. In order to eliminate it, it is necessary to develop new methods related to managing the weakly vulnerable process of delimiting user access not only to confidential information, but also to the software of the electronic document management system.

**Method** One way to solve this problem is to use the modified "soft administration" method, which consists in automatically generating lists of allowed source files in the authorization matrix by reducing the lists and comparing file integrity functions with a reference list for an existing software package. This allows you to automate the process of developing access control rules and provide management of the weakly vulnerable process of access control to software tools of the electronic document management system. **Result** A verbal model is developed for automated control of a weakly vulnerable process of differentiating access to software tools of an electronic document management system, and a system of performance indicators for the functioning of a promising subsystem for protecting confidential information characterizing it as a control object is proposed. **Conclusion** The presented verbal model provides for the possibility of distributed control, in which the security administrator directly controls the specified process using a remote software tool. The formation (change) of the authority establishment matrix for managing a weakly vulnerable process of access control using a promising subsystem for protecting confidential information and the development of a system of indicators to comprehensively evaluate the effectiveness of its functioning is one of the most important tasks of protecting information from unauthorized access, guaranteeing the implementation of a security policy throughout the entire operation period secure electronic document management system.

**Keywords:** electronic document management system, confidential information protection subsystem, information resource protection, unauthorized access, access control, security policy, authority establishment matrix

**Введение.** Широкое внедрение средств автоматизации различных сфер деятельности человека привело к стремительному развитию электронного документооборота, базирующегося на применении систем электронного документооборота (СЭД), функционирующих в многопользовательском режиме с информационными ресурсами (ИР) различного уровня конфиденциальности. Опыт эксплуатации и разработки СЭД в защищённом исполнении показал, что максимальный вклад в нарушение информационной безопасности (ИБ) данных систем вносят факты несанкционированного доступа (НСД) к их ИР [1 - 5].

Для решения задачи защиты ИР (ЗИР) от НСД в многопользовательских СЭД создаётся подсистема защиты конфиденциальных сведений (ПЗКС) — функциональная подсистема СЭД, организованная как совокупность всех средств, методов и мероприятий, выделяемых (предусматриваемых) в СЭД для решения задач ЗИР от НСД [6]. Одной из основных функций ПЗКС является разграничение доступа (РД) пользователей и их процессов к ИР СЭД в соответствии с предоставленными им полномочиями. Оно осуществляется с помощью подсистемы РД, одной из ключевых подсистем, входящих в ПЗКС [7]. РД к ИР заключается в

разделении информации, циркулирующей в СЭД, на части и организации доступа к конфиденциальным сведениям (КС) и программным средствам (ПСр) пользователей соответственно их функциональными обязанностям и полномочиям. Указанная функция ПЗКС реализуется с целью защиты КС от нарушителей среди допущенных в систему пользователей в процессе их работы в СЭД.

Для поддержания политики безопасности (ПБ) защищаемой СЭД (интегральной характеристики, описывающей свойства защищённости системы) во времени в условиях постоянно изменяющейся её программной среды (программная среда дополняется новыми компонентами: ПСр, файлами данных, различными процедурами и т.д.) необходимо в процесс защиты информации (ЗИ) перспективной СЭД добавить процедуры управления безопасностью информации СЭД. Проблема управления безопасностью является весьма важной для выполнения ПБ в течение всего времени эксплуатации защищённой СЭД [8 -14].

**Постановка задачи.** Основные процедуры разработки слабо уязвимого процесса РД к ИР СЭД сводятся к разработке моделей автоматизированного управления РД к их КС, обеспечивающих учёт всех связей и зависимостей, существующих в матрице установления полномочий (МП), и автоматизированного управления РД к ПСр, обеспечивающих включение в состав программной среды СЭД только корректных ПСр. Кроме того, для оценки эффективности функционирования ПЗКС при реализации слабо уязвимого процесса РД к ИР СЭД необходимо сформировать систему показателей оценки эффективности и разработать модели, алгоритмы и программные средства комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС, учитывающие аспекты управления подсистемой РД [15-16].

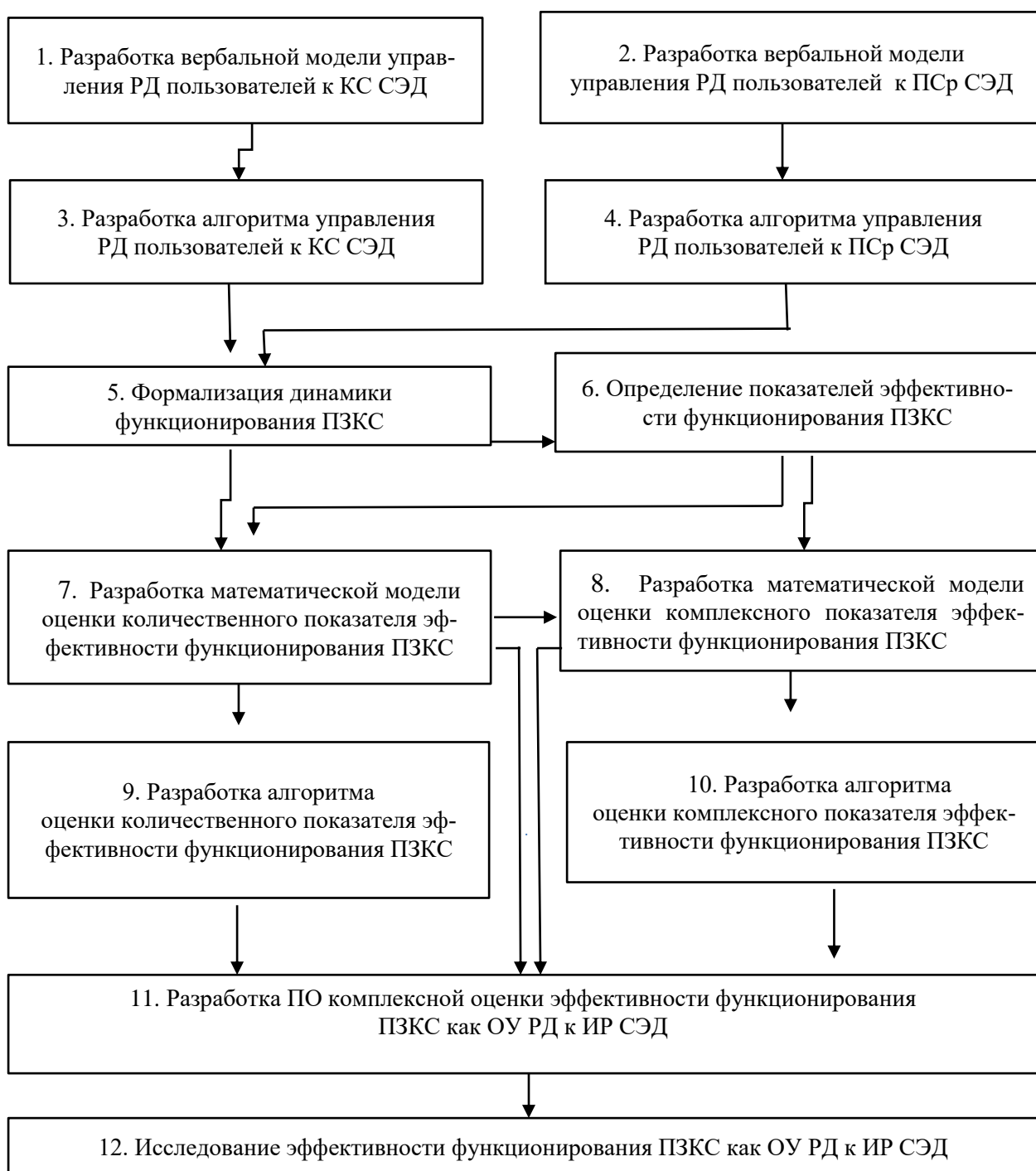
На основе анализа задач и основных этапов слабо уязвимого процесса РД к ИР СЭД разработана общая структурная схема методического обеспечения автоматизированного управления этим процессом, представленная на рис. 1.

Для повышения защищённости СЭД предлагается реализовать слабо уязвимый процесс РД к ИР СЭД путём автоматизации формирования МП, хранящей информацию о множестве потоков информации легального доступа и множестве файлов-источников для порождения разрешённых ПСр.

Для этого разрабатываются вербальная модель [17] и алгоритм управления РД пользователей, их программ и процессов к КС СЭД (задачи 1 и 3 на рис. 1 соответственно), а также вербальная модель и алгоритм управления РД пользователей к ПСр СЭД (задачи 2 и 4 на рис. 1 соответственно).

Для оценки эффективности функционирования ПЗКС и мероприятий по совершенствованию ЗИР разрабатывается программно-методический комплекс оценки эффективности функционирования ПЗКС в СЭД. С этой целью формируется система показателей эффективности функционирования ПЗКС как объекта управления (ОУ) РД (задача 6 на рис. 1).

Для моделирования количественного показателя эффективности функционирования ПЗКС разрабатывается математическая модель динамики функционирования ПЗКС в СЭД как системе массового обслуживания (задача 5 на рис. 1). Для методического обеспечения комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС разрабатываются математические модели оценки количественного и комплексного показателей (задачи 7 и 8 на рис. 1 соответственно). Далее создаются алгоритмы оценки количественного и комплексного показателей эффективности функционирования ПЗКС (задачи 9 и 10 на рис. соответственно), позволяющие разработать программные комплексы для их оценки. Для апробации методического обеспечения оценки эффективности функционирования ПЗКС в СЭД разрабатывается программное обеспечение (ПО) комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС как ОУ РД (задача 11 на рис. 1) и проводится исследование эффективности её функционирования (задача 12 на рис. 1).



**Рис. 1. Общая структурная схема методического обеспечения автоматизированного управления слабо уязвимым процессом разграничения доступа к информационными ресурсами систем электронного документооборота**

**Fig. 1. The general structural diagram of the methodological support for the automated management of a weakly vulnerable process of delimiting access to information resources of electronic document management systems**

Как показывает общая структурная схема, представленная на рис. 1, одной из важнейших задач управления слабо уязвимым процессом РД к ИР СЭД является разработка вербальной модели управления РД к ПСр СЭД, чему и посвящена данная статья.



Доступ пользователей к ПСр СЭД организуется в соответствии с установленными правилами РД (ПРД), базирующимися на идентификации пользователей по одному или нескольким параметрам аутентификации [18 - 21]. Для осуществления ПРД и выполнения РД пользователя, прошедшего идентификацию, к ПСр СЭД в памяти ЭВМ формируются и хранятся МП, описывающие профили РД каждого пользователя, устройства, программы, процесса и т.д. Уровень доступа к ПСр СЭД соответствует МП и содержит информацию, определяющую порядок организации взаимодействия пользователей, устройств, программ, процессов с СЭД. Кроме таблиц полномочий системой РД определяются время доступа и свойства электронных документов (возможность согласования, применения санкций или наложения резолюции руководства и т.д.).

Управление РД пользователей к ПСр СЭД (управление подсистемой РД) осуществляется с помощью средств ПЗКС и заключается в формировании и изменении файлов МП, содержащих сведения о наборе файлов-источников, необходимых для порождения разрешённых ПСр в соответствии с текущим состоянием ИР СЭД и пользователей. Очевидно, что для обеспечения слабо уязвимого процесса РД к ИР СЭД управление формируется таким образом, чтобы ПБ при преобразованиях МП не нарушалась (т.е. в МП не включались бы файлы-источники некорректных ПСр).

Формирование и изменение МП осуществляется администратором безопасности с помощью ПСр управления (ПСрУ), относящегося к ПЗКС. Система ПСрУ инициирует обмен данными между своими ассоциированными файлами и МП. Права на активирование и администрирование системы ПСрУ предоставляются только администратору СЭД. Корректность управления РД соблюдается, когда разрешённый доступ к МП на запись инициируется только ПСрУ. Для ПСр ЗИР, входящих в состав ПЗКС и непосредственно осуществляющих контроль за процессами порождения разрешённых ПСр в СЭД, предоставляется доступ на чтение к МП. Это позволяет производить поиск файлов-источников и создание на основе найденных в МП эталонов разрешённых ПСр для каждого идентифицированного пользователя.

Дезорганизация корректного управления РД возможна при инициировании некорректного ПСр и вмешательстве некорректного ПСр в процесс функционирования СЭД. Такой процесс аналогичен внесению изменений (редактированию) в МП файла-источника. Следовательно, для гарантированного обеспечения ПБ СЭД целесообразно создание и использование программной среды, исключающей возможность появления в ней некорректного ПСр.

В реальных СЭД практически невозможно поддерживать состояние корректного управления вследствие необходимости регулярного обновления и внесения дополнений в ПСр к программной среде СЭД. В то же время включение в программную среду СЭД комплекса (пакета) ПСр, содержащего некорректное ПСр, противоречит задаче поддержания гарантий заданной ПБ. Таким образом, при администрировании заданной ПБ следует пополнять программный интерфейс СЭД исключительно ПСр, непротиворечащими (корректными) существующим в данной программной среде.

Вместе с тем возможны случаи, когда из-за отсутствия описания какого-либо файла-источника в МП управление и контроль активации ПСр, входящего в состав некоторого программного комплекса, не зависят от администратора. Следовательно, недостатки представления эталонных файлов-источников в МП ПСр ЗИР не позволяют применить порождаемое ПСр, что, несомненно, оказывает влияние на пользовательские свойства СЭД.

Чтобы предотвратить возможное возникновение такого рода ошибок в перечень разрешённых к исполнению файлов-источников целесообразно включать все исполняемые файлы (программные средства). Однако такой подход может привести к избыточной (чрезмерной) защищённости сервиса [21], заключающейся в появлении в процессе добавления в перечень файлов-источников МП файлов, порождённых программной средой и содержащих

разнообразные инструментальные возможности, деструктивно влияющие на СЭД и способные нарушить её корректное межпрограммное функционирование.

**Методы исследования.** Для решения указанной выше проблемы предлагается использовать метод автоматизированного построения перечня разрешённых файлов-источников в МП. Такой подход является одним из вариантов «мягкого администрирования» [22], заключающегося в отслеживании всех случаев порождения ПСр. В процессе отслеживания в отдельном файле фиксируются все файлы-источники, то есть формируется перечень (список) для проведения «мягкого администрирования». Затем администратор защиты выполняет следующие процедуры:

- осуществляет сортировку файлов-источников (для выявления и удаления повторяющихся);
- осуществляет проверку фактического наличия файлов-источников в СЭД и в случае обнаружения имён несуществующих файлов удаляет эти имена;
- исключает из перечня файлы-источники, порождающие ПСр, имеющие заведомо некорректные свойства (служебные, отладочные средства и т.д.).

По итогам реализации данных процедур администратор формирует перечень файлов-источников, пригодных для использования в процессе формирования МП ПСр ЗИР. Однако такой подход не пригоден для случаев, когда необходимо внести изменения в МП в процессе эксплуатации системы. Причина заключается в возможности нахождения среди пользователей СЭД злоумышленника, имеющего представление о порядке организации защиты с использованием метода «мягкого администрирования». Положим, такой осведомлённый пользователь-злоумышленник в состоянии осуществить НСД к системе и в отрезок времени от снятия перечня «мягкого администрирования» до формирования МП подменить некий файл-источник на другой файл с целью порождения некорректного ПСр. Регистрация такого замаскированного файла в МП приведёт к нарушению условия изолированности среды.

Рассмотренного в примере недостатка не имеет модифицированный метод «мягкого администрирования» [22], применяемый для управления слабо уязвимым процессом РД (изменения МП) при эксплуатации СЭД. Применение данного метода возможно в случае существования эталонного списка файлов-источников для некоторого программного модуля. Основа модифицированного метода заключается вычислении администратором хэш-функции файлов-источников. При регистрации файла-источника в МП последовательно реализуется следующий алгоритм:

- осуществляется проверка на принадлежность файла-источника эталонному списку. При положительном результате проверки — переход к следующему пункту, в противном случае файл пропускается;
- проводятся вычисление хэш-функции файла-источника в реальном времени и проверка на совпадение полученных результатов с вычислениями администратора. При соответствии полученных результатов — переход к следующему пункту, в противном случае файл пропускается;
- формируется файл «СПИСОК», в который заносятся сведения о файлах-источниках для пополнения МП.

Данный метод, с одной стороны, сохраняет заданную ПБ в СЭД при попадании в программную среду сервиса множества файлов-источников, предназначенных для порождения ПСр. И наоборот, описанные в файле «СПИСОК» файлы-источники гарантируют реализацию полномасштабного пользовательского функционала сервиса. Отметим, что использование модифицированного метода «мягкого администрирования» позволит администратору, отвечающему за безопасность системы, выполнять только процедуры редуцирования (выявление и удаление повторяющихся записей) перечня и проверки соответствия вычисленной в реальном времени хэш-функции файла-источника с эталонным (контроль целостности). Также реализация модифицированного метода «мягкого администрирования»

позволит автоматизировать процесс составления ПРД, что несомненно говорит о ценности описанного выше подхода.

**Обсуждение результатов.** Порядок формирования (изменения) МП, содержащей описание файлов-источников, необходимых для порождения ПСр, зависит от локализации ПСрУ в СЭД релятивно пользователя. Для случаев, когда ПСрУ принадлежит локальному сегменту (ЛС) СЭД (в смысле принадлежности множеству ПСр ЗИР ЛС СЭД), управление следует считать локальным, а если внешнему сегменту СЭД — удалённым.

При локальном управлении слабо уязвимым процессом РД пользователей к ПСр СЭД (ПСрУ принадлежит ЛС СЭД) формирование (изменение) МП, содержащее описание файлов-источников, необходимых для порождения ПСр, проводится следующим образом. Для всех пользователей сервиса формируются перечни допустимых и необходимых файлов-источников. Для этого выполняется стенографирование используемых файлов-источников, достаточных для инициирования и порождения, разрешённых ПСр для конкретного пользователя. Такое протоколирование осуществляется ПСр ЗИР ЛС под управлением локального ПСрУ.

В процессе протоколирования формируется файл, содержащий полный перечень разрешённых файлов-источников, включая также полные имена локальных файлов-источников и их хэш-функции, для каждого пользователя соответственно. Перед формированием файлов окончательного списка для каждого пользователя осуществляется контроль целостности входящих в эталонный перечень файлов-источников ЛС за счёт вычисления их хэш-функций. Допускается зависимость хэш-функции от коэффициента пользователя, но в таком случае администратор должен располагать значениями этого коэффициента для всех пользователей СЭД.

В случае несоответствия вычисленного в реальном времени хеш-значения эталонному проверяемый на достоверность файл-источник редуцируется из перечня. В итоге формируются файлы результирующего перечня разрешённых и используемых файлов-источников для каждого пользователя СЭД, на основе которых с помощью локального ПСрУ формируется (изменяется) локальная МП.

Особенностью формирования (изменения) МП, содержащей описание файлов-источников, необходимых для порождения ПСр при удалённом управлении слабо уязвимым процессом РД (ПСрУ принадлежит внешнему сегменту СЭД), является транспортировка файлов исходного списка во внешний сегмент с целью уменьшения возможных каналов НСД к файлам ЛС. При этом с помощью процедуры протоколирования также составляются списки разрешённых для каждого пользователя СЭД и используемых файлов-источников. Процедура создания и содержание файлов списков файлов-источников для каждого пользователя СЭД аналогична рассмотренной выше. Созданные в ЛС файлы исходного списка файлов-источников для каждого пользователя СЭД передаются в доступный администратору внешний сегмент при помощи локального ПСр ЗИР.

После передачи файлов перечней во внешний сегмент осуществляется контроль целостности включённых в него файлов-источников ЛС, в результате которого формируются файлы итогового перечня разрешённых и используемых файлов-источников для каждого пользователя СЭД. Процедуры проверки целостности файлов-источников и формирования файла окончательного списка аналогичны рассмотренным выше. Файлы окончательного списка разрешённых и используемых файлов-источников для каждого пользователя СЭД могут изменяться только локальным ПСр ЗИР. На основе этих файлов с помощью удалённого ПСрУ формируется (изменяется) МП.

При распределённом управлении слабо уязвимым процессом РД с помощью двух ПСрУ — локального и удалённого, администратор управляет защитой со своего рабочего места, которое является внешним сегментом СЭД относительно пользователя. При этом администратор защиты непосредственно управляет РД с помощью удалённого ПСрУ, которое имеет канал управления локальным ПСрУ и доступность удалённой МП (в случае её использования). Тогда возможна коррекция прав пользователя (сводящаяся к коррекции МП)

во время начала работы пользователя в системе. Доступ администратора к ресурсам ЛС СЭД осуществляется через локальное ПСрУ и технически легко реализуемо. Особенность формирования (изменения) МП, содержащей описание файлов-источников, необходимых для порождения ПСр при распределённом управлении слабо уязвимым процессом РД, заключается в том, что оно зависит от локализации элементов МП и в общем случае представляет собой функциональное объединение рассмотренных выше конфигураций управления.

На основе анализа особенностей функционирования различных конфигураций управления РД составим схему управления слабо уязвимым процессом РД с помощью перспективной ПЗКС при РД пользователей к ПСр СЭД. В качестве перспективной СЭД примем распределённую СЭД, в которой управление осуществляется с места администратора, а объект управления находится на общем ресурсе хранения (файл-сервере) [6]. Особенность управления РД данной конфигурации приведена выше. Управление слабо уязвимым процессом РД перспективной ПЗКС СЭД заключается в формировании (изменении) МП, содержащей описание используемых файлов-источников, необходимых для порождения разрешённых ПСр, для пользователей СЭД. Блок-схема модели автоматизированного управления слабо уязвимым процессом РД к ПСр СЭД с точки зрения описания файлов-источников приведена на рис. 2.

Данная схема носит наиболее общий характер и обеспечивает возможность распределённого управления слабо уязвимым процессом РД, когда администратор защиты непосредственно управляет РД при помощи удалённого ПСрУ, имеющего канал управления локальным ПСрУ и доступ к удалённой МП.

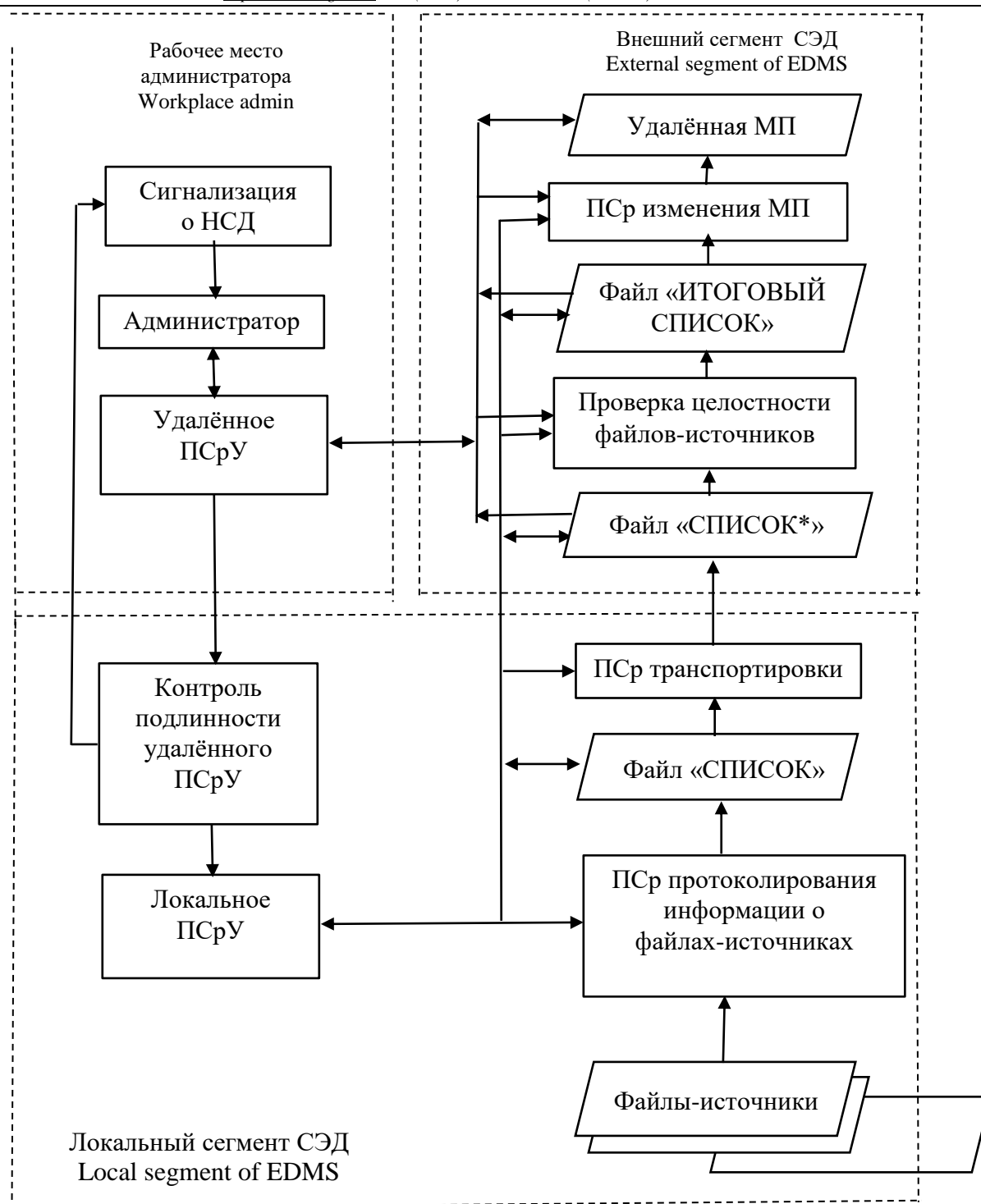
При этом управление ПСр ЗИР (ПСр протоколирования, транспортировки и т.д.) и доступ к ресурсам ЛС СЭД осуществляется администратором через локальное ПСрУ. При удалённом управлении администратор имеет доступ к информации о файлах-источниках ЛС только из файла «СПИСОК\*», хранящегося во внешнем сегменте СЭД, доступном администратору с помощью удалённого ПСрУ.

Актуальной задачей, требующей эффективного решения для обеспечения выполнения заданной ПД в процессе эксплуатации СЭД в защищённом исполнении, является комплексная оценка эффективности функционирования ПЗКС как ОУ слабо уязвимым процессом РД пользователей к ИР СЭД. Важность указанной задачи подтверждается требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013 [23] и Руководящих документов Гостехкомиссии России [24-28]. Анализ использования существующих показателей оценки эффективности функционирования ПЗКС применительно к специфике организации управления процессами ЗИР в СЭД показывает их неадекватность реальным свойствам ПЗКС как ОУ слабо уязвимым процессом РД [6].

Для оценки изменения эффективности функционирования ПЗКС при реализации слабо уязвимого процесса РД к ИР СЭД необходимо сформировать систему показателей комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС, учитывающую специфику управления подсистемой РД.

Для решения указанной задачи предлагается использовать систему показателей эффективности функционирования ПЗКС [6].

Под системой показателей эффективности функционирования ПЗКС при управлении слабо уязвимым процессом РД к ИР СЭД понимается совокупность показателей, в полной мере количественно выражающая пригодность ПЗКС при заданных параметрах её функционирования в данной СЭД удовлетворять предъявляемым к ней требованиям в заданной ситуации. Структурная схема предлагаемой системы показателей представлена на рис. 3. Система имеет иерархическую структуру, в соответствии с которой все показатели делятся на комплексный (нулевой) показатель и элементарные показатели (показатели 1 - 3), определяющие количественные значения для соответствующих характеристик эффективности функционирования ПЗКС.



**Рис. 2. Блок-схема вербальной модели автоматизированного управления слабо уязвимым процессом разграничения доступа к программным средствам систем электронного документооборота**

**Fig. 2. The block diagram of the verbal model of automated control of a weakly vulnerable process of differentiating access to software tools of electronic document management systems**

Предлагается ввести следующие характеристики эффективности функционирования ПЗКС: функциональная защищённость, своевременность реализации ЗИР и эксплуатируемость. Основной из указанных характеристик является функциональная защищённость, определяющая возможность ПЗКС при установленных параметрах функционирования поддерживать достаточный уровень ИБ в СЭД.



**Рис. 3. Структурная схема показателей эффективности функционирования подсистемы защиты конфиденциальных сведений**

**Fig. 3. The structural diagram of performance indicators of the subsystem for protecting confidential information**

Указанные характеристики при необходимости оцениваются количественными показателями, которые в дальнейшем можно использовать для комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС как ОУ слабо уязвимым процессом РД в СЭД.

**Вывод.** Предложена реализация управления слабо уязвимым процессом РД к ИР СЭД путём автоматизации формирования МП, хранящей информацию о множестве файлов-источников, необходимых для порождения разрешённых ПСр в соответствии с текущим состоянием ИР СЭД и пользователей.

Разработана вербальная модель автоматизированного управления слабо уязвимым процессом РД пользователей к ПСр перспективной СЭД, предусматривающая возможность распределённого управления, при котором администратор защиты непосредственно управляет указанным процессом с помощью удалённого ПСрУ, имеющего канал управления локальным ПСрУ и доступ к удалённой МП.

Обеспечение формирования (изменения) МП для штатных пользователей при управлении слабо уязвимым процессом РД с помощью перспективной ПЗКС СЭД, а также разработка системы показателей комплексной оценки эффективности функционирования ПЗКС, учитывающих специфику управления подсистемой РД, является одной из важнейших задач защиты информации от НСД пользователей в процессе их работы в защищённой СЭД, гарантирующей выполнение ПБ в течение всего периода эксплуатации системы.

#### **Библиографический список:**

1. Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях: учеб. пособие / В.Ф. Шаньгин. — М.: ДМК Пресс, 2012. 592 с.
2. Методы и средства оценки защищённости автоматизированных систем органов внутренних дел: монография [Электронный ресурс] / Е.А. Рогозин [и др.]; под ред. проф. Е.А. Рогозина. — Воронеж: Воронеж. ин-т МВД России, 2017. 88 с.
3. Методы и средства оценки эффективности подсистемы защиты конфиденциального информационного ресурса при её проектировании в системах электронного документооборота: монография / И.И. Застрожнов [и др.]. — Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2015. 106 с.
4. Авсентьев О.С. Методика управления защитой информационного ресурса системы электронного документооборота / О.С. Авсентьев, И.Г. Дровникова, И.И. Застрожнов, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин // Труды СПИИРАН. № 2 (57) (2018). С.-Пб.: СПИИРАН, 2018. № 2(57). С. 188-210. DOI 10.15622/sp.57.8.
5. Дровникова И.Г. Вербальная модель управления разграничением доступа пользователей к конфиденциальным сведениям систем автоматизированного документооборота / И.Г. Дровникова, В.П. Алфёров // Охрана, безопасность, связь — 2017: сб. ст. Междунар. науч.-практич. конф. В. 3. Ч. 3. (Воронеж, 16 ноября 2017 г.). Воронеж: ВИ МВД России, 2018. С. 77-80.
6. Дровникова И.Г. Концептуальная модель управления защитой информационного ресурса системы электронного документооборота / И.Г. Дровникова, И.И. Застрожнов, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. 2016. № 2. С. 147-154.
7. Застрожнов И.И. Методологические основы безопасности использования информационных технологий в системах электронного документооборота: монография / И.И. Застрожнов, Е.А. Рогозин, М.А. Багаев. — Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 252 с.
8. Дровникова И.Г. Методика проектирования систем информационной безопасности в автоматизированных системах [Электронный ресурс] / И.Г. Дровникова, А.А. Никитин, Е.А. Рогозин // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2016. Выпуск № 4 (68) (август). [http:// ipb.mos.ru/ttb/2016-4](http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4).

9. Дровникова И.Г. Разработка метода «мягкого администрирования» для организации управления подсистемой разграничения доступа в автоматизированных системах / И.Г. Дровникова, Д.А. Кабанов // Вестник Воронежского института МВД России. 2014. № 4. С. 269-276.
10. Бузов Г.А. Защита информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам / Г.А. Бузов. М.: ГЛТ, 2016. 586 с.
11. Малюк А.А. Основы политики безопасности критических систем информационной инфраструктуры: учеб. пособие / А.А. Малюк. М.: Горячая линия — Телеком, 2018. 314 с.
12. Бабаш А.А. Актуальные вопросы защиты информации: монография / А.А. Бабаш [и др.]. — М.: Рипол, 2017. 111 с.
13. Даниленко А.В. Безопасность систем электронного документооборота. Технология защиты электронных документов / А.В. Даниленко. М.: Ленанд, 2015. 232 с.
14. Марков А.С. Методы оценки несоответствия средств защиты информации / А. С. Марков [и др.]. — М.: Радио и связь, 2012. 192 с.
15. Xiao Y. Handbook of security and networks / Y. Xiao [and others]. — Word Scientific Pub Co Inc. 1 edition, 2012. 576 p.
16. Schaefer R. Information Theoretic Security and Privacy of Information Systems / R. Schaefer. — Cambridge University Press, 2017. — 574 p.
17. Sheikh F. Circuits and Systems for Security and Privacy / F. Sheikh [and others]. — CRC Press, 2016. — 400 p.
18. Fields B. Handbook of Research on Information and Cyber Security in the Fourth Industrial Revolution / B. Fields. IGI Global, 2018. 648 p.
19. Rudra B. Flexible Network Architectures Security: Issues and Principles / B. Rudra. — Auerbach Publications, 2018. 326 p.
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. P. 371-376.
21. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // Information & Management. 2015. Vol. 52. Issue 1. P. 123-134.
22. Рогозин Е.А. 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.
23. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 2: Функциональные компоненты безопасности. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (дата обращения 23.11.2018).
24. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения: руководящий документ // сб. руководящих. докум. по защите информации от несанкционированного доступа Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации. М.: Росс. инженер. Академия, 1998. С. 5-14.
25. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации: руководящий документ // сб. руководящих. докум. по защите информации от несанкционированного доступа Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации. М.: Росс. инженер. Академия, 1998. С. 15-21.
26. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации: руководящий документ // сб. руководящих. докум. по защите информации от несанкционированного доступа Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации. М.: Росс. инженер. Академия, 1998. С. 22-51.
27. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации: руководящий документ // сб. руководящих. докум. по защите информации от несанкционированного доступа Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации. М.: Росс. инженер. Академия, 1998. С. 52-71.
28. Временное положение по организации разработки, изготовления и эксплуатации программных и технических средств защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах и средствах вычислительной техники: руководящий документ // сб. руководящих. докум. по защите информации от несанкционированного доступа Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации. — М.: Росс. инженер. Академия, 1998. С. 72-92.

#### References:

1. Shan'gin V.F. Zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh i setyakh: ucheb. posobiye / V.F. Shan'gin. — M.: DMK Press, 2012. 592 s. [Shangin V.F. Information Protection in computer systems and networks: proc. benefit / V.F. Shangin. — M.: DMK Press, 2012. 592 p. (in Russ)].
2. Metody i sredstva otsenki zashchishchonnosti avtomatizirovannykh sistem organov vnutrennikh del: monografiya [Elektronnyy resurs] / Ye.A. Rogozin [i dr.]; pod red. prof. Ye.A. Rogozina. — Voronezh: Voronezh. in-t MVD Rossii, 2017. 88 s. [Methods and tools for assessing the security of automated systems of bodies of internal Affairs: monograph [Electronic resource] / E.A. Rogozin [and others]; under the editorship of Professor E.A. Rogozin. Voronezh: Voronezh. Ministry of internal Affairs of Russia, 2017. 88 p. (in Russ)].
3. Metody i sredstva otsenki effektivnosti podsystemy zashchity konfidentsial'nogo informatsionnogo resursa pri yeyo proyektirovanii v sistemakh elektronnoy dokumentooborota: monografiya / I.I. Zastrozhnov [i dr.]. — Voronezh: Voronezh. gos. tekhn. un-t, 2015. 106 s. [Methods and means of assessing the effectiveness of the subsystem of protection of confidential information resource in its design in electronic document management systems: monograph / I.I. Zastrozhnov [and others]. Voronezh: Voronezh. state tech. UN-t, 2015. 106 p. (in Russ)].
4. Avsent'yev O.S. Metodika upravleniya zashchitoy informatsionnogo resursa sistemy elektronnoy dokumentooborota / O.S. Avsent'yev, I.G. Drovnikova, I.I. Zastrozhnov, A.D. Popov, Ye.A. Rogozin // Trudy SPIIRAN. № 2 (57) (2018). S.-Pb.: SPIIRAN, 2018. № 2(57). S. 188-210. DOI 10.15622/sp.57.8. [Avxentiev O.S. The management of protection

- information resource electronic document management system / O.S. Avxentiev, I.G. Drovnikova, I.I. Zastrozhnov, A.D. Popov, E.A. Rogozin // Proceedings of SPIIRAS. № 2 (57) (2018). S.-Pb.: Spiran, 2018. 2018. № 2 (57). P. 188-210. DOI 10.15622 / sp.57.8 (in Russ)].
5. Drovnikova I.G. Verbal'naya model' upravleniya razgranicheniyem dostupa pol'zovateley k konfidentsial'nym svedeniyam sistem avtomatizirovannogo dokumentooborota / I.G. Drovnikova, V.P. Alferov // Okhrana, bezopasnost', svyaz' — 2017: sb. st. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. V. 3. CH. 3. (Voronezh, 16 noyabrya 2017 g.). Voronezh: VI MVD Rossii, 2018. S. 77-80. [Drovnikova I.G. Verbal control model differentiation of user access to confidential information of automated document management / I.G. Drovnikova, P.V. Alferov // Protection, security, communications — 2017: collection of articles]. scientific-practical conf. V. 3. Part 3. (Voronezh, 16 November 2017). Voronezh: VI Ministry of internal Affairs of Russia, 2018. P. 77-80 (in Russ)].
  6. Drovnikova I.G. Kontseptual'naya model' upravleniya zashchitoy informatsionnogo resursa sistemy elektronnoy dokumentooborota / I.G. Drovnikova, I.I. Zastrozhnov, Ye.A. Rogozin // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2016. № 2. S. 147-154. [Drovnikova I.G. A conceptual model for managing information resource of an electronic document management system / I.G. Drovnikova, I.I. Zastrozhnov, E.A. Rogozin // Bulletin of Voronezh Institute of MIA Russia. 2016. № 2. P. 147-154 (in Russ)].
  7. Zastrozhnov I.I. Metodologicheskiye osnovy bezopasnosti ispol'zovaniya informatsionnykh tekhnologiy v sistemakh elektronnoy dokumentooborota: monografiya / I.I. Zastrozhnov, Ye.A. Rogozin, M.A. Bagayev. — Voronezh: IPTS «Nauchnaya kniga», 2011. 252 s. [Zastrozhnov I.I. Methodological basis for the safe use of information technologies in electronic document management systems: monograph / I.I. Zastrozhnov, E.A. Rogozin, M.A. Bagayev. Voronezh: CPI «Scientific book», 2011. 252 p. (in Russ)].
  8. Drovnikova I.G. Metodika proyektirovaniya sistem informatsionnoy bezopasnosti v avtomatizirovannykh sistemakh [Elektronnyy resurs] / I.G. Drovnikova, A.A. Nikitin, Ye.A. Rogozin // Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti». 2016. Vypusk № 4 (68) (avgust). [http:// ipb.mos.ru/ttb/2016-4](http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4). [Drovnikova I.G. Methods of designing of information security systems in automated systems [Electronic resource] / I.G. Drovnikova, A.A. Nikitin, E.A. Rogozin // Internet journal «Technologies of technospheric safety». — 2016. Issue № 4 (68) (August). [http:// ipb.mos.ru/ttb/2016-4](http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4) (in Russ)].
  9. Drovnikova I.G. Razrabotka metoda «myagkogo administrirovaniya» dlya organizatsii upravleniya podsystemoy razgranicheniya dostupa v avtomatizirovannykh sistemakh / I.G. Drovnikova, D.A. Kabanov // Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2014. № 4. S. 269-276. [Drovnikova I.G. Development of a method for «soft admin» organization control subsystem of access control in automated systems / I.G. Drovnikova, D.A. Kabanov // Vestnik of Voronezh Institute of MIA Russia. — 2014. № 4. P. 269-276 (in Russ)].
  10. Buzov G.A. Zashchita informatsii ogranichennoy dostupa ot utechki po tekhnicheskim kanalams / G.A. Buzov. M.: GLT, 2016. 586 c. [Buzov G.A. Protection of limited access information from leakage through technical channels / G.A. Buzov. M.: GLT, 2016. 586 p. (in Russ)].
  11. Malyuk A.A. Osnovy politiki bezopasnosti kriticheskikh sistem informatsionnoy infrastruktury: ucheb. posobiye / A.A. Malyuk M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2018. 314 s. [Malyuk A.A. Fundamentals of security policy of critical information infrastructure systems: proc. manual / A.A. Malyuk M.: Hot line — Telecom, 2018. 314 p. (in Russ)].
  12. Babash A.A. Aktual'nyye voprosy zashchity informatsii: monografiya / A.A. Babash [i dr.]. — M.: Rior, 2017. 111 s. [Babash A.A. Actual questions of information security: monograph / A.A. Babash [and others]. M.: Rior, 2017. 111 p. (in Russ)].
  13. Danilenko A.V. Bezopasnost' sistem elektronnoy dokumentooborota. Tekhnologiya zashchity elektronnykh dokumentov / A.V. Danilenko. M.: Lenand, 2015. 232 s. [Danilenko A.V. Security of electronic document management systems. Technology to protect electronic documents / A.V. Danilenko. M.: Lenand, 2015. 232 p. (in Russ)].
  14. Markov A.S. Metody otsenki nesootvetstviya sredstv zashchity informatsii / A. S. Markov [i dr.]. — M.: Radio i svyaz', 2012. 192 s.
  15. Markov A.S. Methods for assessing the mismatch of information security tools / A. S. Markov [et al.]. - M.: Radio and Communications, 2012. 192 s. [Markov A.S. Methods of evaluation of information security means. M.: Radio and communication, 2012. 192 p. (in Russ)].
  16. Xiao Y. Handbook of security and networks / Y. Xiao [and ot.]. Word Scientific Pub Co Inc. 1 edition, 2012. 576 p.
  17. Schaefer R. Information Theoretic Security and Privacy of Information Systems / R. Schaefer. — Cambridge University Press, 2017. 574 p.
  18. Sheikh F. Circuits and Systems for Security and Privacy / F. Sheikh [and others]. CRC Press, 2016. 400 p.
  19. Fields B. Handbook of Research on Information and Cyber Security in the Fourth Industrial Revolution / B. Fields. IGI Global, 2018. 648 p.
  20. Rudra B. Flexible Network Architectures Security: Issues and Principles /B. Rudra. Auerbach Publications, 2018. 326 p.
  21. 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.
  22. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // Information & Management. 2015. vol. 52. Issue 1. P. 123–134.
  23. 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)].
  24. GOST R ISO/MEK 15408-2-2013. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. CH. 2: Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (data obrashcheniya 23.11.2018). [GOST R ISO/IEC 15408-2-2013.



- Information technology. Methods and means of security. Criteria for evaluating the security of information technology. Part 2: Functional safety components. [Electronic resource.] — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105710> (accessed 23.11.2018) (in Russ)].
24. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Terminy i opredeleniya: rukovodyashchiy dokument // sb. rukovodyashchikh. dokum. po zashchite informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komissii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii. M.: Ross. inzhener. Akademiya, 1998. S. 5-14. [Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions: guidance document // sat. docum. on protection of information from unauthorized access of the state technical Commission under the President of the Russian Federation. M.: Ross. engineer. Academy, 1998. P. 5-14 (in Russ)].
25. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noy tekhniki i avtomatizirovannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii: rukovodyashchiy dokument // sb. rukovodyashchikh. dokum. po zashchite informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komissii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii. M.: Ross. inzhener. Akademiya, 1998. S. 15-21. [The concept of protection of computer equipment and automated systems from unauthorized access to information: guidance document // sat. docum. on protection of information from unauthorized access of the state technical Commission under the President of the Russian Federation. M.: Ross. engineer. Academy, 1998. P. 15-21 (in Russ)].
26. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii: rukovodyashchiy dokument // sb. rukovodyashchikh. dokum. po zashchite informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komissii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii. M.: Ross. inzhener. Akademiya, 1998. S. 22-51. [Automated system. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information security requirements: guidance document // sat. docum. on protection of information from unauthorized access of the state technical Commission under the President of the Russian Federation. — M.: Ross. engineer. Academy, 1998. P. 22-51 (in Russ)].
27. Sredstva vychislitel'noy tekhniki. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zashchishchonnosti ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii: rukovodyashchiy dokument // sb. rukovodyashchikh. dokum. po zashchite informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komissii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii. M.: Ross. inzhener. Akademiya, 1998. S. 52-71. [Computer aids. Protection against unauthorized access to information. Indicators of protection against unauthorized access to information: guidance document // sat. docum. on protection of information from unauthorized access of the state technical Commission under the President of the Russian Federation. M.: Ross. engineer. Academy, 1998. pp. 52-71 (in Russ)].
28. Vremennoye polozheniye po organizatsii razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii programmykh i tekhnicheskikh sredstv zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh sistemakh i sredstvakh vychislitel'noy tekhniki: rukovodyashchiy dokument // sb. rukovodyashchikh. dokum. po zashchite informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa Gosudarstvennoy tekhnicheskoy komissii pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii. — M.: Ross. inzhener. Akademiya, 1998. S. 72-92. [Temporary position on the organization of development, production and operation of software and hardware to protect information from unauthorized access to automated systems and computer equipment: guidance document // sat. docum. on protection of information from unauthorized access of the state technical Commission under the President of the Russian Federation. M.: Ross. engineer. Academy, 1998. pp. 72-92 (in Russ)].

**Сведения об авторах:**

**Алфёров Владимир Павлович** — соискатель, кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры.

**Дровникова Ирина Григорьевна** — доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел

**Обухова Людмила Александровна** — кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел

**Рогозин Евгений Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел.

**Information about the authors:**

**Vladimir P. Alferov** — Applicant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Equipment .

**Irina G. Drovnikova** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

**Lyudmila A. Obukhova** – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Automated Information Systems of the Internal Affairs

**Evgeny A. Rogozin** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

**Конфликт интересов**

**Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию 10.03.2019.**

**Received 10.03.2019.**

**Принята в печать 30.05.2019.**

**Accepted for publication 30.05.2019.**

**Для цитирования:** Асалханов П.Г., Бендик Н.В., Иваньо Я.М. Экспертные оценки в задачах оптимизации производства продовольственной продукции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(2): 50-60. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-50-60

**For citation:** Asalkhanov P. G., Bendik N. V., Ivan'o Y. M. Expert evaluations in the problems of optimizing the production of food products. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 50-60. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-50-60

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 631.5:519.6

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-50-60

### ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Асалханов П.Г.<sup>3</sup>, Бендик Н.В.<sup>2</sup>, Иваньо Я.М.<sup>1</sup>

<sup>1-3</sup>Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,

<sup>1-3</sup>664038, Иркутская обл., Иркутский р-н., п. Молодежный, 1/1, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: iymex@rambler.ru, <sup>2</sup>e-mail: starkovan@list.ru, <sup>3</sup>e-mail: asalkhanov@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью работы является использование различных моделей оптимизации производства аграрной продукции для управления с применением эмпирических данных и экспертных оценок. **Метод.** В качестве экспертных оценок для приведенных задач линейного программирования в условиях неопределенности предложено применять индивидуальные или групповые усредненные и интервальные значения производственно-экономических параметров. Использование усредненных или интервальных экспертных оценок связано с особенностями прикладных экстремальных задач и обеспечением моделей исходными данными. **Результат.** Предложены модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции и заготовки пищевых дикорастущих ресурсов, для реализации которых необходимо использовать экспертные оценки, дополняющие эмпирические данные. В первой задаче оптимизации структуры посевов использованы интервальные значения коэффициентов, предложенных экспертами, которые характеризуют своевременность выполнения технологических операций. Во второй задаче, связанной с планированием заготовки дикорастущей продукции, интервальные экспертные оценки отражают колебания урожайности дикоросов, трудозатраты и стоимостные показатели продукции. В третьей задаче использована индивидуальная экспертная оценка влияния загрязнения на однолетние, многолетние травы и зерновые культуры. **Вывод.** Задачи оптимизации аграрного производства с учетом экспертных оценок реализованы для двух аграрных предприятий Иркутской области и Братского района, обладающего значительными запасами пищевых дикорастущих ресурсов.

**Ключевые слова:** оптимизация, посевы, дикоросы, богарные земли, орошение, экспертные оценки

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### EXPERT EVALUATIONS IN THE PROBLEMS OF OPTIMIZING THE PRODUCTION OF FOOD PRODUCTS

*Peter G. Asalkhanov<sup>3</sup>, Nadezhda V. Bendik<sup>2</sup>, Yaroslav M. Ivan'ov<sup>1</sup>*

<sup>1-3</sup>Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,

<sup>1-3</sup>1/1 Str., Irkutsk region, Molodezhny village 664038, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: iymex@rambler.ru, <sup>2</sup>e-mail: starkovan@list.ru, <sup>3</sup>e-mail: asalkhanov@mail.ru

**Abstract. Objectives** The aim of the work is the use of various models for optimizing the production of agricultural products for management using empirical data and expert estimates. **Method** It is proposed to use individual or group averaged and interval values of production and economic parameters as expert estimates for the above linear programming problems under uncertainty. The use of averaged or interval expert evaluations is associated with the features of applied extreme problems and providing models with initial data. **Result** Models are proposed for optimizing the production of agricultural products and harvesting wild food resources, for the implementation of which it is necessary to use expert estimates that supplement empirical data. The first task of optimizing the crop structure used interval values of the coefficients proposed by experts that characterize the timeliness of implementation technological operations. In the second task related to the planning of procurement of wild-growing products, interval expert estimates reflect fluctuations in the yield of wild plants, labor costs, and cost indicators of production. In the third task, an individual expert assessment of the effect of pollution on annual, perennial grasses and crops was used. **Conclusion** Optimization tasks for agricultural production, taking into account expert assessments, have been implemented for two agricultural enterprises in the Irkutsk region and the Bratsk region, which has significant reserves of wild food resources.

**Key words:** optimization, crops, wild plants, rainfed land, irrigation, expert assessments

**Введение.** Метод экспертных оценок как самостоятельный научный инструмент для решения неформализуемых проблем начал развиваться с 40-х годов прошлого века. Экспертные оценки получаются в результате обработки мнений опытных специалистов конкретной предметной области [9, 11].

Одним из основных направлений использования экспертных оценок в сельском хозяйстве является управление рисками аграрного производства [5, 21, 22]. Эффективное управление риском включает предвидение и прогнозирование возможных трудностей и планирование мероприятий с целью уменьшения неблагоприятных последствий, а не просто реагирование на неблагоприятные события после того, как они уже произошли.

При этом существуют два первичных аспекта управления рисками: предвидение и прогнозирование возможностей наступления неблагоприятных условий хозяйствования и разработка мер, направленных на уменьшения вероятности проявления таких событий; разработка мероприятий, направленных на снижение неблагоприятных последствий, в случае если они уже произошли [15].

**Постановка задачи.** Целью работы является использование различных моделей оптимизации производства аграрной продукции для управления с применением эмпирических данных и экспертных оценок. Для достижения этой цели предложено решение следующих задач: анализ трех моделей математического программирования для решения задач управления деятельностью аграрного предприятия с использованием экспертных оценок; реализация моделей на примере реальных аграрных предприятий.

**Методы исследования.** В работе использованы многолетние ряды агрометеорологических параметров по районам Иркутской области и показатели сельскохозяйственного производства предприятий агропромышленного комплекса региона. Для получения точечных значений, верхних и нижних оценок коэффициентов влияния своевременности посевов на параметры

производства, а также оценки изменчивости урожайности пищевой дикорастущей продукции и других параметров применен метод экспертной оценки.

Использованы три прикладные задачи: 1) оптимизация производства аграрной продукции с учетом экспертных оценок, характеризующих своевременность посева сельскохозяйственных культур; 2) оптимизация заготовки пищевой дикорастущей продукции с экспертными оценками урожайности дикоросов и стоимости продукции; 3) минимизация ущерба окружающей среде при производстве аграрной продукции на богарных и орошаемых землях.

**Обсуждение результатов.** Во многих случаях рассматривают две группы экспертных оценок: индивидуальные, основанные на использовании мнения отдельных экспертов, независимых друг от друга, и коллективные, в которых высказывает мнения группа экспертов. Индивидуальные оценки эффективны для определения интервала значений количественного параметра. Однако коллективные оценки, как показала практика, более точны.

Одним из примеров использования экспертных оценок в сельском хозяйстве может быть задача оптимизации размещения сельскохозяйственных культур.

Существуют разные варианты построения данной задачи в зависимости от свойств параметров прикладной экстремальной модели. Если колебания параметров модели оптимизации структуры посевных площадей являются незначительными, то, как правило, их значения усредняют, в этом случае используют задачу линейного программирования, характеризующую своевременность посева. В частном случае некоторые коэффициенты при неизвестных, целевой функций и левых частей ограничений могут быть описаны в виде регрессионных зависимостей. В этом случае для оптимизации размещения сельскохозяйственных культур применима задача параметрического программирования, в которой в качестве параметров используются расходы трудовых и материальных ресурсов, а также урожайность сельскохозяйственных культур. При этом регрессионные уравнения, характеризующие изменение урожайности сельскохозяйственных культур, трудовых ресурсов могут быть однофакторными и двухфакторными. В качестве факторов используются время, предшествующие значения температур и осадки.

В моделях оптимизации структуры посевов, применяемые коэффициенты влияния своевременности посева на затраты и урожайность, оценивают эксперты. Ими учитывается тот факт, что сроки посева (своевременность посева) влияют на объемы внесения удобрений и ядохимикатов, урожайность сельскохозяйственных культур, всхожесть, влажность, качество семян и другие [2]. Отсюда, рассматриваются три варианта получения продукции в зависимости от даты посева: ранний посев, посев в оптимальные сроки и поздний посев.

Для реализации этих моделей предлагается использовать оценки параметров, полученные экспертом-агрономом [3, 18]. При этом в задаче можно использовать конкретные точечные значения коэффициентов влияния своевременности посевов сельскохозяйственных культур на показатели производства [3]. В таком случае задача решается для некоторых усредненных значений показателей.

Помимо такого подхода эксперты могут оценить возможные колебания параметров, входящих в модели. В этом случае формулируется задача математического программирования с интервальными параметрами [2]. В такой задаче вместо точечных значений коэффициентов влияния своевременности посева используются их верхние и нижние оценки (таб. 1).

В работе [2] приведена задача математического моделирования с интервальными оценками коэффициентов влияния своевременности посева. Если не брать в расчет постоянные затраты на производство, т.е. независимые от своевременности посева, общий вид математической модели будет выглядеть следующим образом.

**Таблица 1. Верхние и нижние оценки коэффициентов влияния своевременности посева**  
**Table 1. The upper and lower estimates of the coefficients of the impact of timely sowing**

Ситуации посева Sowing situations		Ранний посев Early sowing		Оптимальный посев Optimal sowing		Поздний посев Late sowing	
Границы интервалов Interval boundaries		Нижний Lower	Верхний Upper	Нижний Lower	Верхний Upper	Нижний Lower	Верхний Upper
Коэффициенты влияния Influence factors	Затраты на удобрение Fertilizer Costs	0,9	1,1	0,2	0,4	0,1	0,2
	Затраты на ядохимикаты Pesticides costs	0,9	1,1	0,1	0,3	0,4	0,6
	Затраты на сушку зерна Grain drying costs	0,1	0,3	0,1	0,3	0,9	1
	Урожайность Productivity	0,7	0,9	0,9	1,1	0,7	0,9

Минимизируются переменные затраты на возделывание культур одного предприятия:

$$f(x) = \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \tilde{k}_{ij} v_{ij} x_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\underline{\tilde{k}}_{ij} \leq \tilde{k}_{ij} \leq \bar{\tilde{k}}_{ij}$ ,  $v_{ij}$  - переменные затраты на группу операций  $i$  возделывания 1 га культуры  $j$ .

При этом введены следующие ограничения:

1) по использованию земельных угодий

$$\sum_{j \in N} x_j \leq B; \quad (2)$$

2) по предельным площадям отдельных групп культур

$$x_j \leq \bar{b}_j \quad (j \in N) \quad (3)$$

3) по потребности в продукции каждой культуры

$$\sum_{i \in M} \tilde{l}_{ij} a_{ij} x_j \geq A_j \quad (j \in N), \quad (4)$$

где  $\underline{\tilde{l}}_{ij} \leq \tilde{l}_{ij} \leq \bar{\tilde{l}}_{ij}$ ;

4) по использованию трудовых ресурсов

$$\sum_{j \in N} b_{ij} x_j \leq V_i \quad (i \in M); \quad (5)$$

5) по обеспечению материальными ресурсами

$$\sum_{j \in N} w_{ij} x_j + \sum_{j \in N} k_{ij} v_{ij} x_j \leq W_i \quad (i \in M); \quad (6)$$

6) неотрицательности переменных

$$x_j \geq 0 \quad (j \in N). \quad (7)$$

В модели (1) – (7) коэффициенты  $\underline{\tilde{k}}_{ij}$  и  $\bar{\tilde{k}}_{ij}$  - нижние и верхние оценки влияния затрат на  $i$ -ю группу операций возделывания 1 га  $j$ -ой культуры;  $\underline{\tilde{l}}_{ij}$  и  $\bar{\tilde{l}}_{ij}$  - нижние и верхние оценки коэффициентов влияния на урожайность  $j$ -ой культуры при  $i$ -ой группе операций;  $B$  – площадь сельскохозяйственных культур;  $\bar{b}_j$  - площади отдельных групп культур;  $a_{ij}$  – биопродуктив-

ность сельскохозяйственных культур;  $b_{ij}$  – трудовые ресурсы, используемые для производства продукции с 1 га;  $x_j$  – искомые площади сельскохозяйственных культур  $j$ .

В такой постановке задачи учтены только переменные затраты на производство продукции, которые связаны с коэффициентами влияния своевременности посева. Помимо этого, урожайность сельскохозяйственных культур также изменяется в зависимости от значений  $\tilde{k}_{ij}$ . Задача оптимизации производства растениеводческой продукции с учетом интервальных экспертных оценок своевременности посева решена для ООО «Академия». Из множества оптимальных решений, полученных при реализации трех моделей (ранний, оптимальный и поздний посев) выбраны те из них, которые соответствуют верхним и нижним значениям целевой функции с соответствующими оптимальными планами. Сравнивая три варианта результатов между несвоевременным и оптимальным посевом (наибольшее, наименьшее и медианное значения целевой функции) для восьми основных сельскохозяйственных культур получены расхождения: 9,8, 7,3 и 7,6%. При этом значительное отличие наблюдается между оптимальными планами производства однолетних и многолетних трав при своевременном и несвоевременном посеве, достигающее 20-70%. Наличие разных ситуаций оптимизации размещения сельскохозяйственных культур необходимо учитывать при планировании деятельности аграрного предприятия.

Помимо моделирования аграрного производства использование экспертных оценок актуально в моделях оптимизации заготовки пищевой дикорастущей продукции с интервальными оценками [12]. К факторам, влияющим на урожай дикорастущей продукции, относятся температура воздуха, осадки и другие климатические параметры. В частности, на биопродуктивность ягод отрицательно влияют обильные осадки, температуры воздуха и заморозки. Основными показателями дикорастущей продукции, входящими в задачу оптимизации заготовки дикоросов, являются урожайность, допустимый объем сбора, трудозатраты и площади произрастания.

Ввиду затруднительности моделирования динамики урожайности дикорастущей продукции в виде трендов или функций распределения вероятностей этот параметр можно рассматривать как интервальный. При этом при заготовке дикоросов учитывают экспертные оценки, характеризующие не только значения урожайности пищевых дикорастущих ресурсов, но и затраты труда на получение продукции с единицы площади. Методы экспертных оценок могут быть использованы для определения стоимости дикоросов. В табл. 2 приведены значения интервальных оценок, характеризующих урожайность нескольких видов дикорастущих культур [12].

**Таблица 2. Интервальные оценки, используемые в моделях заготовки дикорастущей продукции в Иркутской области**

№	Вид дикорастущей продукции Type of wild products	Интервальные оценки, кг/га Interval estimates, kg / ha	
		Нижняя оценка Bottom Grade	Верхняя оценка Upper Grade
1	Кедровые орехи Pine nuts	50	175
2	Брусника Lingonberry	700	4000
3	Черника Blueberries	120	2200
4	Облепиха Sea buckthorn	2000	3000
5	Грибы Mushrooms	36	137
6	Маслята Butter	35	50
7	Грузди Gruzdy	35	45
8	Кипрей узколистый (Иван-чай) Fireweed narrow-leaved (Ivan tea)	69	5880

Общая модель оптимизации заготовок грибов и плодово-ягодных дикорастущих культур с интервальными параметрами приведена в работе [7]. Целевая функция, оптимизирующая доходы от заготовки дикоросов, имеет следующий вид:

$$f = \sum_{j \in J} \tilde{c}_j y_j \rightarrow \max, \quad (8)$$

где  $\tilde{c}_j$  и  $\bar{\tilde{c}}_j$  – нижние и верхние оценки  $\tilde{c}_j$ , характеризующие минимальную и максимальную стоимости килограмма ягод или грибов  $j$ -вида. Первая группа ограничений связана с урожайностью ягодоносных растений и грибов, кг/га:

$$\sum_{j \in J} \frac{x_j}{\tilde{p}_j} \leq \tilde{S}, \quad (9)$$

где  $\tilde{p}_j$  и  $\bar{\tilde{p}}_j$  – нижние и верхние оценки  $\tilde{p}_j$ , характеризующие минимальную и максимальную урожайность ягодоносных растений и грибов  $j$ -вида;  $\tilde{S}$  – потенциальная площадь для осуществления сбора дикорастущей продукции  $j$ -вида одним заготовителем в пределах  $\underline{\tilde{S}} \leq \tilde{S} \leq \bar{\tilde{S}}$ ;  $\underline{\tilde{S}}$  и  $\bar{\tilde{S}}$  – нижние и верхние оценки, характеризующие минимальную и максимальную площадь сбора дикорастущей продукции  $j$ -вида одним заготовителем.

Вторая группа ограничений связана с трудозатратами на заготовку одним заготовителем дикорастущей продукции:

$$\sum_{j \in J} \tilde{\beta}_j x_j \leq \tilde{B}, \quad (10)$$

где  $\tilde{\beta}_j$  и  $\bar{\tilde{\beta}}_j$  – нижние и верхние оценки  $\tilde{\beta}_j$ , характеризующие минимальное и максимальное количество чел.-дней для заготовки одного килограмма дикорастущей продукции  $j$ -вида одним заготовителем;  $\underline{\tilde{B}}$  и  $\bar{\tilde{B}}$  – нижние и верхние оценки, характеризующие минимальное и максимальное количество имеющихся чел.-дней для заготовки дикорастущей продукции  $j$ -вида одним заготовителем. Трудовые ресурсы по заготовке  $j$ -вида дикоросов зависят от ягодоносной и грибоносной площадей, трудоемкости сбора ягод и грибов и занятости населения.

Ограничение на неотрицательность переменных имеет следующий вид:

$$x_j \geq 0. \quad (11)$$

При использовании модели (8)–(11) определяется множество оптимальных планов, которое соответствует некоторым значениям целевой функции.

Для реализации подобных моделей эффективным является использование метода Монте-Карло. Из заданного множества полученных решений особый интерес вызывают оптимальные планы, соответствующие экстремумам и медианному значению целевой функции. Очевидно, что случаи, характеризующие оптимальный план с критерием  $f_{\max}^{\min}$ , описывают неурожайные годы, а решения, связанные со значениями  $f_{\max}^{\max}$  отображают урожайные годы.

Применение модели (8) – (11) для Братского района с учетом 25 видов дикоросов позволило получить следующие результаты. Значения целевой функции, характеризующие доходы, колеблются от 2,46 до 3,27 млрд. руб.

Расхождения между верхними и нижними оценками относительно медианы составляет 28%. Следует отметить, что в задаче линейного программирования с интервальными параметрами в качестве таковых использовались помимо урожайности дикоросов стоимостные показатели и трудовые затраты на заготовку единицы продукции. Модель (8) – (11) позволяет планировать заготовку пищевой дикорастущей продукции с учетом возможных рисков.

При моделировании производства продовольственной продукции большое значение имеет описание негативного влияния источников загрязнения на земельные и водные ресурсы. Одно из направлений оценки загрязнения окружающей среды является ввод в модели эмпирических коэффициентов, учитывающих ухудшение рассматриваемого объекта [6].

Коэффициенты деградации почвы характеризуют влияние загрязнения почвы, эрозионных процессов, деформации почвы копытными животными и др.

В первом случае коэффициент находится делением площади загрязненных или эродированных земель на общую площадь. Во втором случае можно использовать метод недополучения продукции на загрязненном или эродированном участке земли. Кроме того, данные коэффициенты могут быть рассчитаны экспертным путем.

Коэффициенты воздействия загрязнений на производство растениеводческой продукции определены с помощью экспертных оценок агрономов хозяйств. Например, для Нукутского района значения этого параметра соответствуют: многолетние травы –  $[0; 0,02]$ , однолетние травы –  $[0,01; 0,03]$ , зерновые –  $[0,02; 0,05]$ .

В том случае, если нет информации по уровню эродированности или загрязненности вредными веществами земель сельскохозяйственных предприятий предлагается использовать усредненные данные муниципальных районов.

Общий вид математической модели, включающий богарное и орошаемое земледелие, выглядит следующим образом. Минимизируются затраты на производство растениеводческой продукции с учетом ущербов окружающей среде.

Критерий оптимальности математической модели производства растениеводческой продукции, как частный случай целевой функции оптимизации сочетания отраслей [2], имеет вид

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} \omega_{ik} p_{ik}^F x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c'_{ik} \omega'_{ik} \tilde{p}'_{ik} x'_{ik} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где  $c_{ik}$  - прибыль, получаемая в сельскохозяйственной зоне  $i$  от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида  $k$  на богарных землях;  $c'_{ik}$  - прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции на орошаемых землях;  $x_{ik}$  - площадь угодий на богарных землях;  $x'_{ik}$  - площадь угодий на орошаемых землях;  $p_{ik}^F$  - урожайность на богарной земле как случайная величина с вероятностью  $F$ ;  $\tilde{p}'_{ik} \leq \tilde{p}'_{ik} \leq \bar{\tilde{p}}'_{ik}$  - верхние и нижние оценки урожайности на орошаемой земле;  $\omega_{ik}$ ,  $\omega'_{ik}$  - оценки негативного влияния на окружающую среду: на богарных землях; на орошаемых землях.

Ограничения по минимальному объему производства товарной растениеводческой продукции в регионе выглядят так

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (1 - \omega_{ik}) p_{ik}^F x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (1 - \omega'_{ik}) \tilde{p}'_{ik} x'_{ik} \geq S \quad (13)$$

где  $S$  - минимальный объем производства растениеводческой продукции в регионе на богарных и орошаемых землях.

Ограничения по площади пашни в каждой сельскохозяйственной зоне определены в следующей редакции

$$\sum_{k \in K} x_{ik} + \sum_{k \in K} x'_{ik} \leq a_i \quad (i \in I), \quad (14)$$

где  $a_i$  - площадь пашни в сельскохозяйственной зоне  $i$ .

Ограничения по наличию трудовых ресурсов в каждой сельскохозяйственной зоне имеют вид

$$\sum_{k \in K} b_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in K} b'_{ik} x'_{ik} \leq B_i \quad (i \in I), \quad (15)$$

где  $b_{ik}$  - затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га богарных земель;  $b'_{ik}$  - затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га орошаемых земель;  $B_i$  - трудовые ресурсы, которые используются в сельскохозяйственной зоне  $i$ .

Условия по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в почве выглядят так



$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \varphi_{ikl} x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \varphi'_{ikl} x'_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \tilde{v}_{ikl} x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \tilde{v}'_{ikl} x'_{ik} \leq \rho_l \quad (l \in L), \quad (16)$$

где  $\varphi_{ikl}$ ,  $\varphi'_{ikl}$  - исходная концентрация вредного вещества  $l$  на богарных и орошаемых землях;  $\tilde{v}_{ikl} \leq \tilde{v}'_{ikl} \leq \bar{\tilde{v}}_{ikl}$ ,  $\tilde{v}'_{ikl} \leq \bar{\tilde{v}}'_{ikl} \leq \bar{\tilde{v}}'_{ikl}$  - верхние и нижние оценки концентрации вредного вещества  $l$ , попавшего на богарные и орошаемые земли;  $\rho_l$  - величина предельно допустимой концентрации вредного вещества  $l$  в почве.

Параметры  $v_{ikl}$  и  $v'_{ikl}$  определены как интервальные оценки  $\tilde{v}_{ikl}$  и  $\tilde{v}'_{ikl}$ .

Ограничения на водозабор в реке имеют вид

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} q_{ik} x'_{ik} \leq T' \xi, \quad (17)$$

где  $q_{ik}$  - оросительная норма на площади  $x'_{ik}$  с культурой  $k$ ;  $T'$  - вегетационный период;  $\xi$  - расход воды реки.

Условия по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в реке записываются в виде

$$\psi_l \xi + \mu_l \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} q_{ik} x'_{ik} \leq W_l \quad (l \in L), \quad (18)$$

где  $\psi_l$  - исходная концентрация вредного вещества  $l$  в реке;  $\mu_l$  - концентрация вредного вещества  $l$  в единице объема возвратных вод хозяйства;  $W_l$  - заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества  $l$  в реке.

Стекающие воды образуют промоины и овраги, вымывают и уносят питательные вещества. Водная и ветровая эрозия почвы наносит большой ущерб сельскому хозяйству степных районов.

Ограничение на почвенные потери от водной эрозии имеет вид

$$\sum_{k \in K} R^F U_{ik} D_{ik} V_{ik} C_{ik} P_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in K} R^F U_{ik} D_{ik} V_{ik} C_{ik} P_{ik} x'_{ik} \leq \eta_i, \quad (19)$$

где  $\eta_i$  - годовые почвенные потери (т/га) в сельскохозяйственной зоне  $i$ ;  $R^F$  - фактор эродирующей способности дождей как случайная величина с вероятностью  $F$ ;  $U_{ik}$  - фактор податливости почв эрозии (т/га);  $D_{ik}$  - фактор длины склона;  $V_{ik}$  - фактор крутизны склона;  $C_{ik}$  - фактор растительности и севооборота;  $P_{ik}$  - фактор эффективности противоэрозионных мероприятий.

Модель (12) – (18) реализована для предприятия СХ ЗАО «Приморский» Нукутского района с использованием значений коэффициентов воздействия загрязнений на производство растениеводческой продукции, полученных экспертным путем. Расхождение значений целевой функции для вероятностей 0,2 и 0,8 составили около 10%. При этом усредненный ущерб хозяйству составляет свыше 2 млн. руб. Полученные результаты и оптимальные решения, приведенные в работе [6], показывают, что влияние загрязнения на результаты работы аграрного предприятия могут быть довольно ощутимыми. При этом следует иметь в виду продолжительное восстановление земельных ресурсов. Другими словами, эффект уменьшения получения продукции и деградации земель наблюдается в течение многолетнего периода.

**Вывод.** 1. Рассмотрено применение усредненных и интервальных экспертных оценок совместно с эмпирическими данными для моделирования сельскохозяйственного производства и заготовки пищевой дикорастущей продукции.

2. Для моделирования структуры посевных площадей применимы усредненные и интервальные экспертные оценки влияния своевременности посева на параметры производства, полученные одним или группой экспертов. В примере использованы индивидуальные интервальные оценки эксперта-агронома.

3. При оптимизации заготовки пищевой дикорастущей продукции применимы верхние и нижние оценки, полученные экспертным путем для урожайности ягодоносных растений и гри-

бов, стоимости единицы заготавливаемых видов продукции и трудовые затраты на заготовку дикоросов.

4. В задачах оценки негативного влияния источников загрязнения на земельные и водные ресурсы показана возможность использования экспертных оценок при определении коэффициентов воздействия загрязнений на производство растениеводческой продукции.

5. Приведены три модели, включающие экспертные оценки, позволяющие оптимизировать размещение сельскохозяйственных культур с учетом своевременности посева, планировать заготовку пищевых дикорастущих ресурсов и моделировать производство растениеводческой продукции с учетом минимизации ущерба окружающей среде. Модели математического программирования с экспертными оценками апробированы на реальных объектах Иркутской области.

#### **Библиографический список:**

1. Артющикина Д.В., Шеврина Е.В. Применение методов линейного программирования в сельском хозяйстве // Экономическая наука сегодня: теория и практика: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 29 июня 2017 г.), Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. - С. 201-204.
2. Асалханов П.Г., Иванько Я.М. Прогнозирование и планирование агротехнологических операций для природно-климатических зон региона. Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. - 143 с.
3. Асалханов П.Г., Иванько Я.М., Зайцев А.М. Оптимизация производства растениеводческой продукции с учетом прогноза даты посева // Материалы 13-й междунар. науч. конф. «Сахаровские чтения 2013: экологические проблемы XXI века», Минск: МГЭУ им. Сахарова, 2013. - С. 163-164.
4. Асалханов П.Г., Иванько Я.М., Полковская М.Н. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2017. - №. 2 (121). С. 57-66.
5. Кибиров А.Я., Белова Е.В. Эффективный инструмент регулирования рисков в сельском хозяйстве // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве – 2012. - № 2. - С. 60-62.
6. Бендик Н.В., Иванько Я.М., Ковалева Е.А. Эколого-математические модели оптимизации производства сельскохозяйственной продукции // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2016. - № 4 (111). - С. 66-74.
7. Болтвина Е.К., Иванько Я.М. Модели оптимизации заготовки дикорастущей продукции с интервальными параметрами // Вестник ИрГТУ. – 2016. - № 6. - С. 73–81.
8. Гайдук В.И., Калитко С.А., Багмут С.В. Управление рисками в аграрном предпринимательстве региона // АПК – экономика управления - 2010. - № 10. - С. 41.
9. Гуцыкова С.В. Метод экспертных оценок. Теория и практика. - М.: Когито-Центр. - 2017. – 509.
10. Давыденко А.Ю., Иванько Я.М., Хогоева Е.А. Эколого-математическая модель производства сельскохозяйственной продукции со случайными параметрами // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. - 2014. - Вып. 61. - С. 115-120.
11. Хосиев Б.Н., Дзедисова А.Х. Применение экспертного способа оценки эколого-экономических рисков в сельском хозяйстве // Известия Горского государственного аграрного университета – 2012. - Т. 49. - № 1-2. - С. 270-276.
12. Иванько Я.М. и др. Потенциальные запасы дикорастущих ресурсов Иркутской области - Иркутск: Иркутский ГАУ, 2017. — 156 с.
13. Иванько Я.М. и др. Решение задач управления аграрным производством в условиях неполной информации - Иркутск: Изд-во ИрГСХА. - 2012. - 199 с
14. Иванько Я.М., Хогоева Е.А. Региональные экономико-математические модели аграрного производства с интервальными природными и производственно-экологическими параметрами // Известия Иркутской государственной экономической академии – 2013. - Вып. 6 (92). - 2013. - С 138-143.
15. Иванько Я.М., Петрова С.А. Оптимизационные модели аграрного производства в решении задач оценки природных и техногенных рисков - Иркутск: Изд-во ИрГСХА. – 2015. - 180 с.
16. Иванько Я.М., Сатркова Н.В. Моделирование природных событий для управления региональными народно-хозяйственными объектами - Иркутск: Изд-во ИрГСХА. – 2011. – 160 с.
17. Левин В.И. Интервальный подход к оптимизации в условиях неопределенности // Системы управления, связи и безопасности – 2015. - № 4. - С. 123–141.
18. Солодун В.И., Зайцев А.М., Бояркин Е.В. Обоснование способов и сроков посева зерновых культур в Предбайкалье // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова – 2017. № 3. С. 101-105.
19. Сухановский Ю.П. Модель дождевой эрозии почв // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1114-1125.
20. Тяпаев Т.Б. Основные инструменты стратегического управления аграрным производством с учетом рисков // Символ науки. № 4-1 (16). 2016. С. 235-238.

21. Serebryakova M.F. The conditions forming uncertainty in agriculture // the Concept. 2015. Special issue No. 21.
22. Williams C.A., Heins R.M. Risk Management and Insurance, 5-th Ed, New York: McGraw-Hill Book Co. – 2003. – 755 p.

#### References:

1. Artyushkina D.V., Shevrina Ye.V. Primeneniye metodov lineynogo programmirovaniya v sel'skom khozyaystve // Ekonomicheskaya nauka segodnya: teoriya i praktika: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Cheboksary, 29 iyunya 2017 g.), Cheboksary: TSNS «Interaktiv plus», 2017. - S. 201-204. [Artyushkina D.V., Shevrina E.V. Application of methods of linear programming in agriculture // Economics today: theory and practice: materials of the VII International. scientific-practical conf. (Cheboksary, June 29, 2017), Cheboksary: CNS Interactive Plus, 2017. pp. 201-204. (In Russ.)]
2. Asalkhanov P.G., Ivan'o YA.M. Prognozirovaniye i planirovaniye agrotekhnologicheskikh operatsiy dlya prirodno-klimaticheskikh zon regiona. Irkutsk: Izd-vo IrGSKHA, 2014. - 143 s. [Asalkhanov PG, Ivanyo Ya.M. Forecasting and planning agrotechnological operations for the climatic zones of the region. Irkutsk: Publishing house Irsha, 2014. 143 p. (In Russ.)]
3. Asalkhanov P.G., Ivan'o YA.M., Zaytsev A.M. Optimizatsiya proizvodstva rasteniyevodcheskoy produktsii s uchetom prognoza daty poseva // Materialy 13-y mezhdunar. nauch. konf. «Sakharovskiye chteniya 2013: ekologicheskiye problemy XXI veka», Minsk: MGEU im. Sakharova, 2013. pp. 163-164. [Asalkhanov PG, Ivanyo Ya.M., Zaitsev A.M. Optimization of crop production, taking into account the forecast date of sowing // Materials of the 13th Intern. scientific conf. "Sakharov Readings 2013: Environmental Problems of the 21st Century", Minsk: Moscow State University of Economics Sakharova, 2013. p. 163-164. (In Russ.)]
4. Asalkhanov P.G., Ivan'o YA.M., Polkovskaya M.N. Modeli prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v zadachakh parametricheskogo programmirovaniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – 2017. - № 2 (121). S. 57-66. [Asalkhanov PG, Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N. Models for forecasting crop yields in parametric programming problems // Bulletin of Irkutsk State Technical University 2017. № 2 (121). pp. 57-66. (In Russ.)]
5. Kibirov A.YA., Belova Ye.V. Effektivnyy instrument regulirovaniya riskov v sel'skom khozyaystve // Ekonomika, trud, upravleniye v sel'skom khozyaystve 2012. № 2. pp. 60-62. [Kibirov A.Y., Belova E.V. Effective tool for risk management in agriculture // Economy, labor, management in agriculture - 2012. № 2. - pp. 60-62. (In Russ.)]
6. Bendik N.V., Ivan'o YA.M., Kovaleva Ye.A. Ekologo-matematicheskiye modeli optimizatsii proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – 2016. - № 4 (111). S. 66-74. [Bendik N.V., Ivanyo Ya.M., Kovaleva E.A. Ecological-mathematical models of optimization of agricultural production // Bulletin of the Irkutsk State Technical University 2016. № 4 (111). pp. 66-74. (In Russ.)]
7. Boltvina Ye.K., Ivan'o YA.M. Modeli optimizatsii zagotovki dikorastushchey produktsii s interval'nymi parametrami // Vestnik IrGTU. – 2016. - № 6. - S. 73–81. [Boltvina E.K, Ivanyo Ya.M. Optimization models for harvesting wild-growing products with interval parameters // Vestnik ISTU. 2016. № 6. pp. 73–81. (In Russ.)]
8. Gayduk V.I., Kalitko S.A., Bagmut S.V. Upravleniye riskami v agrarnom predprinimatel'stve regiona // APK – ekonomika upravleniya - 2010. - № 10. - S. 41. [Gayduk V.I., Kalitko S.A., Bagmut S.V. Risk management in the agricultural entrepreneurship of the region // APK - Management Economics 2010. № 10. pp. 41. (In Russ.)]
9. Gutsykova S.V. Metod ekspertnykh otsenok. Teoriya i praktika. - M.: Kogito-Tsent. - 2017. – 509. [Gutsykova S.V. The method of expert estimates. Theory and practice. - M.: Kogito Center. - 2017. - 509. (In Russ.)]
10. Davydenko A.YU., Ivan'o YA.M., Khogoyeva Ye.A. Ekologo-matematicheskaya model' proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii so sluchaynymi parametrami // Vestnik Irkutskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. - 2014. Vol. 61. S. 115-120. [Davydenko A.Yu., Ivanyo Ya.M., Khogoeva E.A. Ecological and mathematical model of agricultural production with random parameters // Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy. 2014. Vol. 61. pp. 115-120. (In Russ.)]
11. Khosiyev B.N., Dzebisova A.KH. Primeneniye ekspertnogo sposoba otsenki ekologo-ekonomicheskikh riskov v sel'skom khozyaystve // Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta 2012. T. 49. № 1-2. - S. 270-276. [Khosiev B.N., Dzebisova A.Kh. Application of expert method for assessing environmental and economic risks in agriculture // Izvestia Gorsky State Agrarian University. 2012. V. 49. № 1-2. pp. 270-276. (In Russ.)]
12. Ivan'o YA.M. i dr. Potentsial'nyye zapasy dikorastushchikh resursov Irkutskoy oblasti - Irkutsk: Irkutskiy GAU, 2017. — 156 s. [Ivanyo Ya.M. Potential reserves of wild-growing resources of the Irkutsk region - Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University, 2017. 156 p. (In Russ.)]
13. Ivan'o YA.M. i dr. Resheniye zadach upravleniya agrarnym proizvodstvom v usloviyakh nepolnoy informatsii - Irkutsk: Izd-vo IrGSKHA. 2012. 199 s. [Ivanyo Ya.M. and others. Solution of agricultural production management problems in the context of incomplete information - Irkutsk: Ir.AAAAA. 2012. 199 p. (In Russ.)]
14. Ivan'o YA.M., Khogoyeva Ye.A. Regional'nyye ekonomiko-matematicheskiye modeli agrarnogo proizvodstva s interval'nymi prirodnymi i proizvodstvenno-ekologicheskimi parametrami // Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii – 2013. - Vol. 6 (92). 2013. S 138-143. [Ivanyo Ya.M., Khogoeva E.A. Regional economic and mathematical models of agricultural production with interval natural and production and environmental parameters // News of the Irkutsk State Economic Academy 2013. Vol. 6 (92). - 2013. Pp. 138-143. (In Russ.)]

15. Ivan'o YA.M., Petrova S.A. Optimizatsionnyye modeli agrarnogo proizvodstva v reshenii zadach otsenki prirodnykh i tekhnogennykh riskov - Irkutsk: Izd-vo IrGSKHA. 2015. 180 s. [Ivano Y.M., Petrova S.A. Optimization models of agricultural production in solving problems of assessing natural and man-made risks - Irkutsk: Ir.AAAAA. 2015. 180 p. (In Russ.)]
16. Ivan'o YA.M., Satrkova N.V. Modelirovaniye prirodnykh sobyitiy dlya upravleniya regional'nymi narodno-khozyaystvennymi ob'yektami - Irkutsk: Izd-vo IrGSKHA. 2011. 160 s. [Ivano Ya.M., Satrkova N.V. Simulation of natural events for the management of regional national economic objects - Irkutsk: Publishing house IGCA. 2011. 160 p. (In Russ.)]
17. Levin V.I. Interval'nyy podkhod k optimizatsii v usloviyakh neopredelennosti // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti – 2015. - № 4. - S. 123–141. [Levin, V.I. Interval approach to optimization in conditions of uncertainty // Control Systems, Communications and Security 2015. № 4. pp. 123–141. (In Russ.)]
18. Solodun V.I., Zaitsev A.M., Boyarkin Ye.V. Obosnovaniye sposobov i srokov poseva zernovykh kul'tur v Predbaykal'ye // Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova – 2017. - № 3. - S. 101-105. [Solodun V.I., Zaitsev A.M., Boyarkin E.V. Justification of the methods and timing of sowing crops in the Baikal region // Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy. V.R. Filippova - 2017. № 3. pp. 101-105. (In Russ.)]
19. Sukhanovskiy YU.P. Model' dozhdevoy erozii pochv // Pochvovedeniye 2010. № 9. S. 1114-1125. [Sukhanovsky Yu.P. Model of soil rain erosion // Soil Science . 2010. № 9. pp. 1114-1125. (In Russ.)]
20. Tyapayev T.B. Osnovnyye instrumenty strategicheskogo upravleniya agrarnym proizvodstvom s uchetom riskov // Simvol nauki. № 4-1 (16). 2016. S. 235-238. [Tyapayev T.B. The main tools of strategic management of agricultural production with regard to risk // Symbol of science. No. 4-1 (16). 2016. pp. 235-238. (In Russ.)]
23. Serebryakova M.F. The conditions forming uncertainty in agriculture // the Concept. 2015. Special issue No. 21.
24. Williams C.A., Heins R.M. Risk Management and Insurance, 5-th Ed, New York: McGraw-Hill Book Co. – 2003. 755 p.

**Сведения об авторах:**

**Асалханов Петр Георгиевич** – кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики и математического моделирования.

**Бендик Надежда Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики и математического моделирования.

**Иваньо Ярослав Михайлович** – доктор технических наук, профессор, кафедра информатики и математического моделирования.

**Information about authors:**

**Peter G. Asalkhanov** - Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Informatics and Mathematical Modeling.

**Nadezhda V. Bendik** - Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., Department of Informatics and Mathematical Modeling.

**Yaroslav M. Ivan'o** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Informatics and Mathematical Modeling.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.05.2019.

Принята в печать 22.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Received 08.05.2019.

Accepted for publication 22.06.2019.

**Для цитирования:** Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46(2): 61-70. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70

**For citation:** Aslanov T. G., Musaeva U.A. Analysis of error distribution density in determining the coordinates of earthquake in the methods of spheres and ellipsoids. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 61-70. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70

### АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОШИБОК В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО МЕТОДАМ СФЕР И ЭЛЛИПСОИДОВ

Асланов Т.Г.<sup>1</sup>, Мусаева У.А.<sup>2</sup>

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

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

<sup>1</sup>e-mail: tabasik@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: uma9@list.ru

**Резюме: Цель.** Целью исследования является получение выражения для определения координат очага землетрясения методом эллипсоидов, а также проверки возможности использования методов с использованием фигур второго порядка эллипсоида при первоначальном определении координат гипоцентра землетрясения. **Метод.** Проводится сравнительный анализ плотностей распределения вероятностей ошибок в определении гипоцентра землетрясения для метода сфер, комбинированного метода сферы, эллипсоида и гиперboloида и метода эллипсоидов. **Результат.** Получено выражение для определения координат очага землетрясения методом эллипсов, а также получены плотности распределения ошибок. Получен график распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения при разных размещениях сейсмодатчиков и для различных значений ошибок в определении разностей времен пробега сейсмических волн. **Вывод.** Методы, использующие для определения координат гипоцентра эллипсоид, имеют большие ошибки по сравнению с методом сфер. Это объясняется тем, что при определении координат гипоцентра в методе сфер применяется три ошибки в определении разности времен пробега сейсмических волн, в то время как в методе эллипсоидов и комбинированном методе сферы эллипсоида и гиперboloида четыре ошибки, что и вносит итоговые ошибки в распределение. Все полученные зависимости распределения ошибок имеют вид близкий к распределению Коши.

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмодатчик, сфера, гиперboloид, уравнение, метод эллипсоидов, ошибка

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT  
ANALYSIS OF ERROR DISTRIBUTION DENSITY IN DETERMINING THE  
COORDINATES OF EARTHQUAKE FOCUS IN THE METHODS OF SPHERES AND  
ELLIPSOIDS

Tagirbek G. Aslanov<sup>1</sup>, Uma A. Musaeva<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Daghestan State Technical University,  
<sup>1-2</sup>367026, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70, Russia,  
<sup>1</sup>e-mail: tabasik@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: uma9@list.ru

**Abstract Objectives** The purpose of the study is to obtain an expression for determining the coordinates of the earthquake focus using the ellipsoid method, as well as testing the possibility of using the method using the figures of the second order of the ellipsoid during the initial determination of the coordinates of the earthquake hypocenter. **Method** A comparative analysis of the probability density of errors in the hypocentral zone of the earth's surface, in combination with various spheres, ellipsoid and hyperboloid and ellipsoids, is carried out. **Result** Obtained an expression for determining the coordinates of the earthquake focus by the method of ellipsoids, as well as the density of the distribution of error probabilities in the determination of the earthquake hypocenter the in calculations by the method of spheres, by the combined method of spheres, hyperboloid and ellipsoid, and also by the method of ellipsoids. **Conclusion** Methods used to determine the coordinates of the hypocenter ellipsoid, have large errors in comparison with the method of areas. This can explained by the fact that in determining the coordinates of the hypocenter in the sphere method, three errors are used in determining the difference in the travel times of seismic waves, while in the ellipsoid method and the combined method of the sphere of the ellipsoid and hyperboloid have four errors, which introduces final errors in the distribution. All the obtained dependences of the error distribution have the form close to the Cauchy distribution.

**Keywords:** earthquake, seismic sensor, sphere, hyperboloid, equation, ellipsoid method, error

**Введение.** В Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» разработаны программы [1-4], позволяющие по магнитуде и глубине очага землетрясения, плотности населения, типам застроек в районе землетрясения [5-7], времени суток и т.д. оценить возможные людские потери [8]. Это дает возможность оперативно решить вопрос о привлечении к спасательным работам необходимого количества материальных, технических и людских ресурсов. Иногда, из-за неверного определения глубины очага и эпицентра землетрясения, оценки потерь бывают не достоверными, [9-15].

В настоящее время определение координат очага землетрясения, в основном, производится по временам пробега поперечной и продольной сейсмических волн на сейсмодатчики [16, 17]. При этом, основной причиной возникновения ошибок в определении координат очага землетрясения является не правильный выбор сейсмодатчиков [14, 17-20].

В работе приводятся математические зависимости для определения плотностей распределения вероятностей ошибок в определении гипоцентра землетрясения по методам сфер [21], комбинированного метода сферы, эллипсоида и гиперboloида [22] и метода эллипсоидов [23].

**Постановка задачи.** Для нахождения математических выражений для расчета плотности распределения вероятностей ошибок при определении координат гипоцентра землетрясения использовались методы сфер, комбинированный метод сферы, эллипсоида и гиперboloида и метод эллипсоидов.

При этом, для расчетов координат гипоцентра землетрясения используются величины скоростей поперечной и продольной сейсмических волн.

В методах сфер и эллипсоидов, кроме значений скоростей сейсмических волн, при расчетах координат гипоцентра землетрясения используется разности времен пробега сейсмиче-

ских волн на сейсмодатчики, а в комбинированном методе сферы, эллипсоида и гиперboloида разности времен прихода сейсмических волн на все сейсмодатчики и разность времен прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам.

Во всех рассматриваемых методах заранее задаются возможные ошибки в определении разностей времен пробега сейсмических волн. По исходным данным, с учетом ошибок в определении разностей времен пробега сейсмических волн и без них, определяются глубины и координаты эпицентров землетрясений. Разности значений глубин и координат эпицентров землетрясения определяют невязку.

В работе получены графики распределения ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения при различных размещении сейсмодатчиков и для различных значений ошибок в определении разностей времен пробега сейсмических волн.

**Методы исследования.** В работе [21] получена формула, позволяющая вычислить координаты очага землетрясения методом сферы:

$$\begin{cases} X = \frac{R_2^2 Y_3 - Y_3 X_2^2 - Y_2^2 Y_3 - Y_2 X_3^2 + Y_3^2 Y_2 + R_1^2 Y_2 - R_3^2 Y_2 - R_1^2 Y_3}{2(Y_2 X_3 - X_2 Y_3)} \\ Y = \frac{R_2^2 X_3 - X_3 Y_2^2 - X_2^2 X_3 - X_2 Y_3^2 + X_3^2 X_2 + R_1^2 X_2 - R_3^2 X_2 - R_1^2 X_3}{2(X_2 Y_3 - Y_2 X_3)} \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2} \end{cases} \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты гипоцентра землетрясения;

$X_i, Y_i$  – координаты соответственно второго и третьего сейсмодатчика;

$R_i$  – радиусы сфер, в центрах которых расположены сейсмодатчики с радиусами равными расстоянию до гипоцентра землетрясения, которые задаются формулой

$R_i = t_i V_1 V_2 / (V_2 - V_1)$ ;

$V_1, V_2$  – скорости соответственно поперечной и продольной волны;

$t_i$  – разность времен прихода сейсмических волн к сейсмодатчику.

В работе [22] приведена формула, позволяющая вычислить координаты очага землетрясения комбинированным методом сферы, эллипсоида и гиперboloида:

$$\begin{cases} X = \frac{C_u(X_2^2 - t_r^2 V_1^2)}{2(t_r V_1 + X_2 C_u)}; \\ Y = \frac{(X_3 - X)^2 + Y_3^2 + R_e^2 - X^2 - R_3^2}{2Y_3}; \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$R_e = \frac{X_2^2 - t_r^2 V_1^2}{2(t_r V_1 + X_2 C_u)};$$

$$C_u = \frac{k((t_1 + t_2)(X_2^2 - t_r^2 V_1^2)(1 - k) - t_r k V_1^2 (t_1 + t_2)^2) + t_r X_2^2 (1 - k)^2}{V_1 X_2 (k^2 (t_1 + t_2)^2 - t_r^2 (1 - k)^2)}, \quad (3)$$

где  $t_r$  – разность времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам;

$k = V_2 / V_1$ .

Следует отметить, что в приведенных двух формулах расчета гипоцентра первый сейсмодатчик является опорным и расположен в начале координат, а в комбинированном, считается, что второй сейсмодатчик расположен на оси абсцисс.

Задавая ошибку в определении разности времен прихода сейсмических волн, можно определить координаты гипоцентра с учетом ошибки. Разность координат очага землетрясения, вычисленной с учетом ошибок в измерении разности времен прихода сейсмических волн и без них позволяет определить зависимость ошибки в определении гипоцентра землетрясения от значений ошибок в измерении разностей времен прихода сейсмических волн.

Ставится задача получить выражение для определения координат очага землетрясения методом эллипсов. В работе [24] получено уравнение для определения радиуса от опорного сейсмодатчика до гипоцентра землетрясения методом гипербол:

$$\begin{aligned} R = & (S_1 S_2 S_3 (S_3 \sin \alpha\beta - S_2 \sin \alpha\gamma) + S_1 (\Delta t_2^2 S_3 \sin \alpha\gamma - \Delta t_3^2 S_2 \sin \alpha\beta) \\ & + S_1^2 S_3 S_2 \sin(\alpha\gamma - \alpha\beta) \\ & + \Delta t_1^2 S_3 S_2 \sin(\alpha\beta - \alpha\gamma)) / (2 \Delta t_1 S_2 S_3 \sin(\alpha\gamma - \alpha\beta)) \\ & + 2 S_1 (\Delta t_3 S_2 \sin \alpha\beta - \Delta t_2 S_3 \sin \alpha\gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

Произведя замену  $\Delta t_i$ , которой обозначается разность времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам, один из которых опорный, на сумму расстояний  $R_i$  от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения в паре с расстояниями до остальных сейсмодатчиков, после некоторых преобразований получим:

$$K = 2(t_0 + t_1) S_2 S_3 \sin(\alpha\gamma - \alpha\beta) + 2 S_1 ((t_0 + t_3) S_2 \sin \alpha\beta - (t_0 + t_2) S_3 \sin \alpha\gamma); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R = & \frac{S_1 S_2 S_3 (S_2 \sin \alpha\gamma - S_3 \sin \alpha\beta + S_1 (\alpha\beta - \alpha\gamma))}{K} * \frac{(V_1 - V_2)}{V_1 V_2} + \frac{V_1 V_2}{(V_1 - V_2)} * \\ & * \frac{S_1 ((t_0 + t_3)^2 S_2 \sin \alpha\beta - (t_0 + t_2)^2 S_3 \sin \alpha\gamma) + (t_0 + t_1)^2 S_3 S_2 \sin(\alpha\gamma - \alpha\beta)}{K}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $S_i$  – расстояния между опорным сейсмодатчиком и остальными сейсмодатчиками;  
 $\alpha\beta, \alpha\gamma$  – угол образованный между первым и вторым, а также первым и третьим сейсмодатчиком, с вершиной в точке расположения опорного сейсмодатчика.

Так как нам известны разности времен прихода сейсмических волн ко всем сейсмодатчикам, то возможно найти расстояния и от очага землетрясения до остальных сейсмодатчиков:

$$R_1 = V_1 V_2 (t_0 + t_1) / (V_1 - V_2) - R; \quad (7)$$

$$R_2 = V_1 V_2 (t_0 + t_2) / (V_1 - V_2) - R;$$

$$R_3 = V_1 V_2 (t_0 + t_3) / (V_1 - V_2) - R.$$

Для проведения сравнительного анализа с работами [21, 22] необходимо определить координаты очага методом эллипсов в декартовых координатах. Так как расстояния от очага землетрясения до всех сейсмодатчиков определены, воспользуемся формулой, приведенной в работе [22]:

$$\begin{aligned} X = & \frac{R_2^2 Y_3 - Y_3 X_2^2 - Y_2^2 Y_3 + Y_2 X_3^2 + Y_3^2 Y_2 + R_1^2 Y_2 - R_3^2 Y_2 - R_1^2 Y_3}{2(Y_2 X_3 - Y_3 X_2)}; \\ Y = & \frac{R_2^2 X_3 - X_3 Y_2^2 - X_2^2 X_3 + X_2 Y_3^2 + X_3^2 X_2 + R_1^2 X_2 - R_3^2 X_2 - R_1^2 X_3}{2(X_2 Y_3 - X_3 Y_2)}; \end{aligned} \quad (8)$$

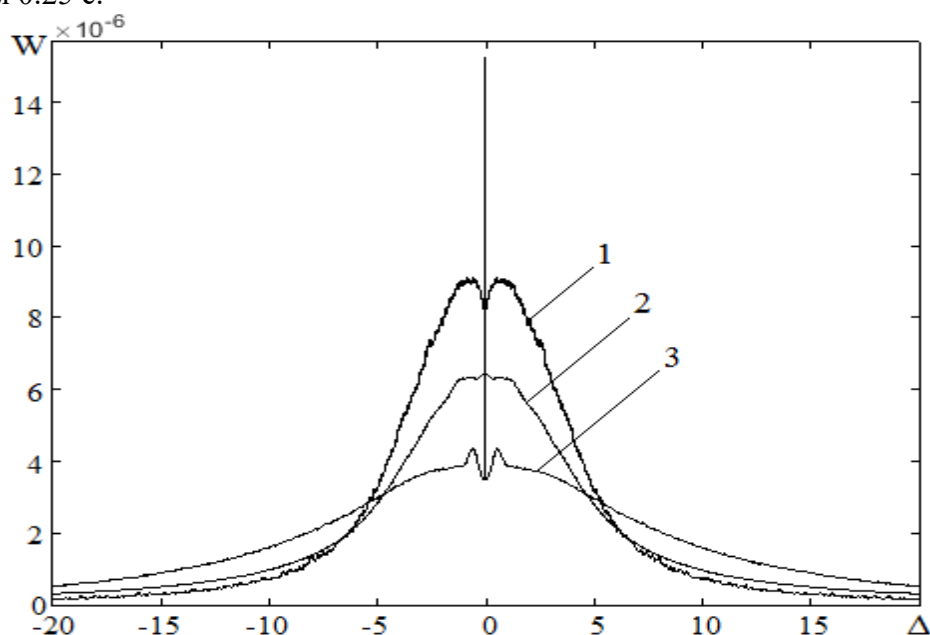


$$Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2}.$$

Для получения плотности распределения ошибки в определении очага землетрясения зададим область размерами 150 на 150 км, в которой будем менять взаимное расположение сейсмодатчиков. Примем за координаты очага землетрясения  $X = 75$  км.,  $Y = 75$  км.,  $Z = 10$  км. На рис.1 и 2 приведены нормированные плотности распределения ошибки в определении гипоцентра землетрясения.

Для получения распределения производилось определение координат очага землетрясения с изменением координат сейсмодатчиков с шагом 18,75 км. Также были введены преднамеренные ошибки в определении времени по разности координат очагов землетрясений с ошибкой и без нее и была получена дисперсия.

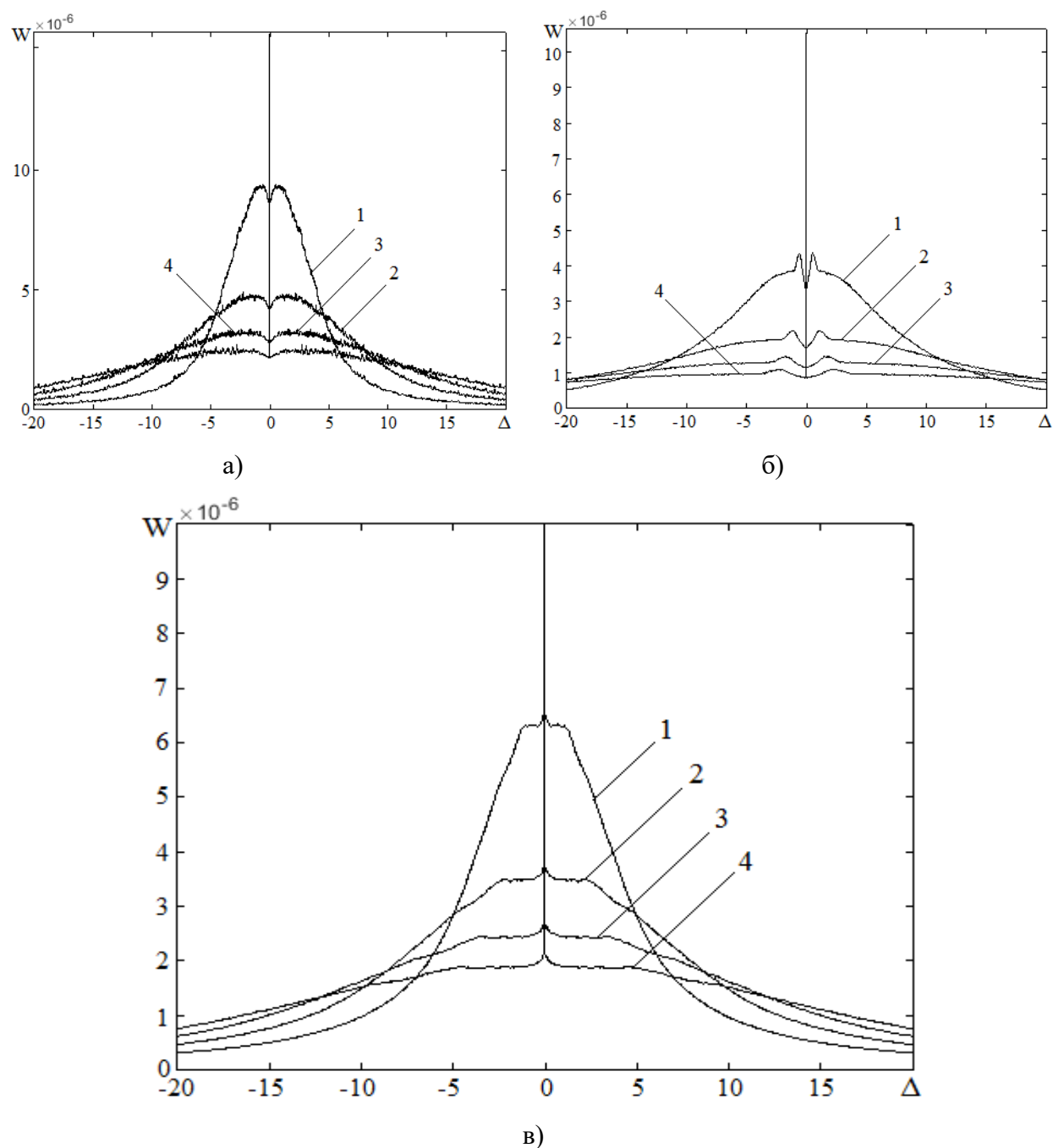
На рис. 1 кривой 1 соответствует метод сфер, кривой 2 – метод эллипсоидов и кривой 3 – комбинированный метод сферы, эллипсоида и гиперboloида. При расчете производилось изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 0.5 до 0.5 с шагом 0.25 с.



**Рис. 1. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами**

**Fig. 1. The density distribution of errors in determining the hypocenter of an earthquake by three methods**

На рис. 2 кривой 1 соответствует изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 0.5 до 0.5 с шагом 0.25 с., кривой 2 – изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 1 до 1 с шагом 0.5 с., кривой 3 – изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 1.5 до 1.5 с шагом 0.75 с. и кривой 4 – изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 2 до 2 с шагом 1 с.



**Рис. 2. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами с различными интервалами ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн**

**Fig. 2. The density of the distribution of errors in determining the hypocenter of an earthquake by three methods with different error intervals in determining the difference in the arrival times of seismic waves**

На рис. 2а приведено распределение ошибок для метода сфер, на рис. 2б – распределение ошибок для комбинированного метода сферы, эллипсоида и гиперboloида и на рисунке 2в – распределение ошибок для метода эллипсоидов.

**Обсуждение результатов.** В результате выполненной работы предложен метод эллипсов, позволяющий определить координаты очага землетрясения, а также получены плотности распределения ошибок.

Ошибки в методах, использующих эллипсоид, больше чем у метода сфер, в связи с тем, что в первых двух методах используется четыре ошибки в определении разности времен, тогда как в методе сфер всего лишь три, а также с особенностью эллипсов, которая была отражена в

работе [22] – более точное определение глубины гипоцентра землетрясения, по сравнению с координатами эпицентра.

### **Вывод.**

1. Получено выражение для определения координат очага землетрясения методом эллипсов, а также получены плотности распределения ошибок.
2. Все полученные зависимости имеют вид распределения ошибок близкий к распределению Коши.
3. Всплеск в районе нуля у всех распределений получен в результате расчетов координат очага землетрясения при отсутствии ошибок в определении разности времен.
4. В методе эллипсов по уровню 0,7 интервалы ошибок одинаковы с методом сфер.

### **Библиографический список:**

1. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике / В.Г. Гитис, Б.В. Ермаков — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.— 256 с.
2. Jing Z., Laurie G. B., MagalyK.. Mapping earthquake induced liquefaction surface effects from the 2011 Toho-ku earthquake using satellite imagery // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 2328 - 2331
3. Rui J., Shuanggen J. Ionosphericacousitc and rayleigh waves detected by GPS following the 2005 Mw=7.2 northern California earthquake // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 3956 – 3959
4. Aixia D., Xiaoqing W., Xiaoxiang Y., Shumin W. The loss assessment method of building earthquake damage using The Remote Sensing and building grid data // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 4255 - 4258
5. Wei Z., Huan-Feng Sh., Chun-Lin H., Wan-Sheng P. Building damage information investigation after earthquake using single post-event PolSAR image // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 7338 – 7341
6. Hao D., Xin X., Rong G., Chao S., Haigang S. Metric learning based collapsed building extraction from post-earthquake PolSAR imagery // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 4742 - 4745
7. Liu L. B., Liu M., Wang J. Q. Electromagnetic environment comprehension for radar detection of vital signs at China National Training Center for earthquake search & rescue // 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2016, pp. 1-4
8. Радоуцкий, В.Ю. Опасные природные процессы: учеб.пособие / В.Ю. Радоуцкий, Ю.В. Ветрова, Д.И. Васюткина; под ред. В.Ю. Радоуцкого. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 206 с.
9. Архангельский В.Т., Веденская И.А., Гайский В.Н. Руководство по производству и обработке наблюдений на сейсмических станциях СССР / Акад. наук СССР. Совет по сейсмологии. - Москва : Изд-во Акад. наук СССР, 1954
10. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. / И.П. Добровольский— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. —240 с.
11. Гуревич П.С. Психология чрезвычайных ситуаций учебное пособие/ П.С. Гуревич — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012.— 495 с.
12. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография/ О.В. Мкртычев — М.: МГСУ, 2010.— 152 с.
13. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Асланов Г.К., Алимерденов В.Ш. Математическая модель расчета энергетического класса, интенсивности и магнитуды землетрясения в реальном масштабе времени // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №2 (37), 2015 – Махачкала: ДГТУ, 2015. – С. 66-71
14. Асланов Т.Г. Разработка алгоритма определения координат очага землетрясения, с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Научные труды молодых исследователей программы «Шаг в будущее». Том 8. «Профессионал». Москва. 2005. С. 32-34.
15. RahinulH., ShoaibH., AkterS., AsadullahilG., TahiaF. K. Earthquake monitoring and warning system // 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2015, pp. 109 - 112
16. Alphonsa A., Ravi G. Earthquake early warning system by IOT using Wireless sensor networks // 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2016, pp. 1201 – 1205.
17. Асланов Т.Г., Алимерденов В.Ш. Определение структуры земли по статистическим данным времен прихода сейсмических волн произошедших землетрясений // Старт в будущее – 2013. Труды III научнотехнической конференции молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург.

18. Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84
19. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
20. Асланов Г.К., Гаджиев М.М., Исмаилов Т.А., Магомедов Х.Д. О землетрясениях (прошлое и современность). – Махачкала, Информационно полиграфический центр ДГТУ. 2001.
21. Асланов Т.Г., Даниялов М.Г., Магомедов Х.Д., Асланов Г.К. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН, Материалы. Издательство ДНЦ РАН. Махачкала 2010. – С. 54-59.
22. Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. К определению координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка – эллипса и гиперболы. Автоматизация. Современные технологии. 2018; 1: 53-59.
23. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения методом эллипсов // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617620 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста сии). - № 2017615712; заявл. 13.06.17; опубл. 11.07.17.
24. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболюидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>

#### References:

1. Gitis V.G., Yermakov B.V. Osnovy prostranstvenno-vremennogo prognozirovaniya v geoinforma-tike / V.G. Gitis, B.V. Yermakov — M.: FIZMATLIT, 2004.— 256 c. [Gitis V.G., Ermakov B.V. The basics of spatio-temporal forecasting in geoinformatics / V.G. Gitis, B.V. Ermakov - M.: FIZMATLIT, 2004. 256 p. (In Russ.)]
2. Jing Z., Laurie G. B., MagalyK .. Mapping earthquake induced liquefaction surface effects from the 2011 Tohoku earthquake using satellite imagery // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 2328 - 2331
3. Rui J., Shuanggen J. Ionosphericacousitc and rayleigh waves detected by GPS following the 2005 Mw = 7.2 northern California earthquake // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 3956 - 3959
4. Aixia D., Xiaoqing W., Xiaoxiang Y., Shumin W. The loss assessment method of building earthquake damage using The Remote Sensing and building grid data // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 , pp. 4255 - 4258
5. Wei Z., Huan-Feng Sh., Chun-Lin H., Wan-Sheng P. Building damage information investigation after earthquake using single post-event PolSAR image // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 7338 - 7341
6. Hao D., Xin X., Rong G., Chao S., Haigang S. Metric learning based collapsed building extraction from post-earthquake PolSAR imagery // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016, pp. 4742 - 4745
7. Liu L. B., Liu M., Wang J. Q. Electromagnetic environment comprehension for radar detection of vital signs at China National Training Center for earthquake search & rescue // 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2016, pp. 1-4
8. Radoutskiy, V.YU. Opasnyye prirodnyye protsessy: ucheb.posobiye / V.YU. Radoutskiy, YU.V. Vetrova, D.I. Vasyutkina; pod red. V.YU. Radoutskogo. – Belgorod: Izd-vo BGTU, 2013. – 206 s. [ Radotsky, V.Yu. Hazardous natural processes: textbook / V.Yu. Radotsky, Yu.V. Vetrova D.I. Vasyutkina; under the editorship of V.Yu. Radotsky. - Belgorod: Publishing House of BSTU, 2013 . 206 p. (In Russ.)]
9. Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Rukovodstvo po proizvodstvu i obrabotke nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh SSSR / Akad. nauk SSSR. Sovet po seysmologii. - Moskva : Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1954 [Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Guidelines for the production and processing of observations at seismic stations of the USSR / Akad. sciences of the USSR. Seismology Council. - Moscow: Acad. USSR Sciences, 1954 (In Russ.)]
10. Dobrovol'skiy I.P. Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryase-niya. / I.P. Dobrovol'skiy— M.: FIZMATLIT, 2009. —240 s. [Dobrovolsky I.P. The mathematical theory of the preparation and prediction of tectonic earthquake. / I.P. Dobrovolsky — M.: FIZMATLIT, 2009. —240 p.
11. Gurevich P.S. Psikhologiya chrezvychaynykh situatsiy uchebnoye posobiye/ P.S., Gurevich — M.: YUNI-TI-DANA, 2012.— 495 c. [Gurevich P.S. Psychology of emergency situations textbook / P.S., Gurevich - M.: UNI-TI-DANA, 2012. 495 p. (In Russ.)]
12. Mkrtychev O.V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynnykh vozdeystvi-yakh: monografiya/ O.V. Mkrtychev — M.: MGSU, 2010.— 152 c. [ Mkrtychev O.V. Safety of buildings and structures during seismic and emergency impacts: monograph / O.V. Mkrtychev M.: MGSU, 2010. 152 p. (In Russ.)]

13. Aslanov T.G., Tagirov KH.YU., Aslanov G.K., Alimerdenov V.SH. Matematicheskaya model' rascheta energeticheskogo klassa, intensivnosti i magnitudy zemletryaseniya v real'nom masshtabe vremeni // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. №2 (37), 2015 – Ma-khachkala: DGTU, 2015. – S. 66-71 [Aslanov T.G., Tagirov H.Yu., Aslanov G.K., Alimerdenov V.Sh. A mathematical model for calculating the energy class, intensity and magnitude of an earthquake in real time // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. No. 2 (37), 2015 - Ma-Khachkala: DGTU, 2015. pp. 66-71(In Russ.)]
14. Aslanov T.G. Razrabotka algoritma opredeleniya koordinat ochaga zemletryaseniya, s odnovremen-nym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln // Nauchnyye trudy molodykh issledovateley programmy «Shag v budushcheye». Tom 8. «Professional». Moskva. 2005. – S. 32-34. [Aslanov T.G. Development of an algorithm for determining the coordinates of the earthquake source, with the simultaneous determination of the speeds of seismic waves // Scientific works of young researchers of the program "Step into the Future". Volume 8. "Professional." Moscow. 2005 pp. 32-34. (In Russ.)]
15. Rahinul H., Shoaib H., Akter S., Asadullahil G., Tahia F. K .. Earthquake monitoring and warning system // 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2015, pp. 109 - 112
16. Alphonsa A., Ravi G. Earthquake early warning system by IOT using Wireless sensor networks // 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2016, pp. 1201 - 1205.
17. Aslanov T.G., Alimerdenov V.SH. Opredeleniye struktury zemli po statisticheskim dannym vremen prikhoda seysmicheskikh voln proizoshedshikh zemletryaseniya // Start v budushcheye – 2013. Trudy III nauchnotekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov. Sankt-Peterburg. [Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Determination of the structure of the earth according to statistics of the times of arrival of seismic waves of earthquakes // Start to the Future - 2013. Proceedings of the III scientific and technical conference of young scientists and specialists. St. Petersburg. (In Russ.)]
18. Aslanov T.G., Magomedov KH.D., Musayeva U.A., Tagirov KH.YU. Vliyaniye prostranstvennogo raspolozheniya seysmodatchikov na tochnost' opredeleniya gipotsentra zemletryaseniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073- 6185-2016-43-4-73-84 [ Aslanov T.G., Magomedov Kh.D., Musaeva U.A., Tagirov H.Yu. The influence of the spatial location of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2016; 43 (4): 73-84. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2016-43-4-73-84(In Russ.)]
19. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017;44 (2):118- 125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125 [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 118-125. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2017-44-2-118-125(In Russ.)]
20. Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov KH.D. O zemletryasenyakh (proshloye i so-vremennost'). – Makhachkala, Informatsionno poligraficheskiy tsentr DGTU. 2001. [Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. On earthquakes (past and present). - Makhachkala, Information and printing center DGTU. 2001. (In Russ.)]
21. Aslanov T.G., Danialov M.G., Magomedov KH.D., Aslanov G.K. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln // Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN, Materialy. Izdatel'stvo DNTS RAN. Makhachkala 2010. – S. 54-59. [Aslanov T.G., Danialov M.G., Magomedov H.D., Aslanov G.K. On a method for determining the source of an earthquake with simultaneous determination of the velocities of seismic waves // Transactions of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Materials. Publishing House of the DSC RAS. Makhachkala 2010 .pp 54-59. (In Russ.)]
22. Shakhtarin B.I., Aslanov G.K., Aslanov T.G. K opredeleniyu koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur vtorogo poryadka – ellipsa i giperboly. Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2018; 1: 53-59. [Shakhtarin B.I., Aslanov G.K., Aslanov T.G. To determine the coordinates of the earthquake source using second-order figures - an ellipse and a hyperbola. Automation. Modern technologies. 2018; 1: 53-59. (In Russ.)]
23. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya metodom ellipsov // Svid. o gos. reg. progr. EVM № 2017617620 Ros. Federatsiya / zayavitel' i pravoobladatel' VGUYU (RPA Minyusta Rossii). № 2017615712; zayavl. 13.06.17; opubl. 11.07.17. [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source by the ellipse method // Svid. about state reg. prog. Computer No. 2017617620 Ros. Federation / applicant and copyright holder of Voronezh State University of Law (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615712; declared 06/13/17; publ. 07/11/17. (In Russ.)]
24. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Issledovaniye zavisimosti oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98> [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (4): 87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98> (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Асланов Тагирбек Гайдарбекович** – кандидат технических наук, докторант, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

**Мусаева Ума Алиевна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

**Information about the authors.**

**Tagirbek G.Aslanov** – Cand. Sci. (Technical), Doctoral cand., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

**Uma A.Musaeva** - Cand. Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 14.04.2019.

**Принята в печать** 22.05.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 14.04.2019.

**Accepted for publication** 22.05.2019.

**Для цитирования:** Баркалов Ю.М., Нестеров А.Д. Особенности обеспечения информационной безопасности в мобильных устройствах под управлением операционной системы Android. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 71-80. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-71-80.

**For citation:** Barkalov Yu.M., Nesterov A.D. Peculiarities of information security in mobile devices running the Android operating system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 71-80. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-71-80

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.3

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-71-80

### ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ANDROID

Баркалов Ю.М.<sup>2</sup>, Нестеров А.Д.<sup>1</sup>

<sup>1-2</sup>Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации,  
<sup>1-2</sup>394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: nevvostok@gmail.com, <sup>2</sup>email: ekcvor@mail.ru

**Резюме. Цель.** В статье приведена формальная модель обеспечения информационной безопасности в мобильных устройствах под управлением операционной системы Android, а также рассмотрен статический и динамический анализ вредоносного программного обеспечения. **Метод.** Для обеспечения защиты конфиденциальной информации в мобильных устройствах можно одновременно использовать программные обеспечения, а также организационные мероприятия. **Результат.** Предложенная формальная модель обеспечения информационной безопасности и анализ предположительно вредоносного программного обеспечения позволят обеспечить безопасность информации в мобильных устройствах, а также снизить риск реализации угроз до приемлемого уровня при минимальной стоимости системы защиты. Представленный алгоритм работы приложения, предназначенного для незаконного перевода денежных средств, а также пример анализа данного приложения позволят специалисту повысить качество выполнения своих профессиональных задач при разборе инцидентов в сфере информационной безопасности. **Вывод.** В связи с тем, что на сегодняшний день отсутствует научно-обоснованная методика выявления и анализа вредоносного программного обеспечения в памяти мобильных устройств, сведения, приведенные в данной статье, будут способствовать повышению эффективности защиты информации в мобильных устройствах под управлением операционной системы Android.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, мобильные устройства, Android

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### PECULIARITIES OF INFORMATION SECURITY IN MOBILE DEVICES RUNNING THE ANDROID OPERATING SYSTEM

**Yuri M. Barkalov**<sup>2</sup>, **Anton D. Nesterov**<sup>1</sup>

<sup>1-2</sup>Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,

<sup>1-2</sup>53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: nevvostok@gmail.com, <sup>2</sup>email: ekevov@mail.ru

**Abstract. Objectives** The article presents a formal model of information security in mobile devices running the Android operating system, an example of detection and investigation of malicious software, as well as static and dynamic analysis of malicious software. **Method** To protect sensitive information on mobile devices, you can use software and organizational measures at the same time. **Result** The proposed formal model of information security and analysis of suspected malicious software will ensure the security of information in mobile devices, as well as reduce the risk of threats to an acceptable level at a minimum cost of the protection system. The presented algorithm of the application designed for illegal transfer of funds, as well as an example of the analysis of this application will allow the specialist to improve the quality of their professional tasks in the analysis of incidents in the field of information security. **Conclusion** Due to the fact that today there is no scientifically based method of detection and analysis of malicious software in the memory of mobile devices, the information provided in this article will help to improve the efficiency of information protection in mobile devices running the Android operating system.

**Keywords:** information security, mobile devices, Android

**Введение.** На сегодняшний день для получения конфиденциальной информации, хранящейся в памяти мобильных устройств, а также с целью денежного обогащения, злоумышленники стали разрабатывать вредоносные программные обеспечения для мобильных устройств под управлением операционной системы Android, которые позволяют осуществить несанкционированный доступ к информации, хранящейся в памяти мобильного устройства [1,2].

Актуальной задачей является обеспечение информационной безопасности в мобильных устройствах под управлением операционной системы Android. Одним из основных требований к обеспечению безопасности является использование современных методов защиты информации с возможностью адаптации к возникающим вызовам и угрозам информационной безопасности [3,15], а также своевременное выявление угроз «нулевого дня».

В то же время, для снижения стоимости системы защиты и ее влияния на производительность системы, необходимо искать незадействованные ресурсы информационной системы и направлять их на решение задач обеспечения безопасности [4,5].

**Постановка задачи.** Предлагаемая формальная модель обеспечения безопасности, а также проведение анализа предположительно вредоносного программного обеспечения, позволят обеспечить безопасность информации в мобильных устройствах, а также позволят добиться снижения риска реализации угроз до приемлемого уровня при минимальной стоимости системы защиты.

**Методы исследования.** Для обеспечения защиты конфиденциальной информации в мобильных устройствах возможно использовать программные и одновременно организационные мероприятия [6]. Ниже приведена формальная модель обеспечения безопасности информации в мобильных устройствах.

Для решения поставленной задачи введем следующие обозначения:

$A = \{a_1, \dots, a_m\}$  – множество всех возможных программных средств, обеспечивающих защиту информации;



$B = \{b_1, \dots, b_n\}$  – множество всех возможных организационных мероприятий по защите информации;

$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если используется } i - e \text{ программное обеспечение;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если применяется } i - e \text{ организационное мероприятие;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

$W$  – возможное количество одновременно используемых программных средств;

$Q$  – возможное количество одновременно применяемых организационных мероприятий;

$c_{ij}$  – стоимость применяемых программных средств  $i$ -го типа и  $j$ -го организационного мероприятия;

$C$  – максимально возможные затраты;

$p_{ij}$  – коэффициент надежности при использовании программного обеспечения  $i$ -го типа и  $j$ -го организационного мероприятия.

Количество всех возможных действий по защите информации с использованием мобильных устройств представляет декартово произведение  $N \subset A \times B$ .

Следовательно, задача оптимизации обеспечения защиты информации решается в условиях следующих ограничений:

– на количество программных средств  $i$ -го типа

$$\sum_{i=1}^k x_i \leq W, k \in Z^+;$$

– на количество организационных мероприятий  $i$ -го типа

$$\sum_{i=1}^k y_i \leq Q, k \in Z^+;$$

– на затраты по защите информации

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^d c_{ij} \cdot (x(a_i) + y(b_j)) \leq C;$$

– на значение переменных

$x_i \in \{0, 1\}, y_i \in \{0, 1\}, i, j = 1, 2, \dots$

Задача нахождения оптимального набора действий по защите информации принимает следующий вид:

найти

$$C^* = Arg \max_{i,j} P_{ij}, \text{ где } P_{ij} = p_{ij}(\{A\}, \{B\}).$$

Для обеспечения информационной безопасности следует также проводить анализ приложений в памяти мобильного устройства [7,9]. Существует два типа анализа предположительно вредоносных программ: динамический и статический.

В рамках динамического анализа предположительно вредоносной программы анализируются особенности ее поведения, в частности её взаимодействие с операционной системой.

Для проведения динамического анализа используются программные продукты, позволяющие собрать информацию о программе и ее деятельности в системе:

- хеш-сумма APK-файла (алгоритмы MD5, SHA-1 и SHA-256);
- сведения о полученных и отправленных по сети данных;
- сведения об операциях чтения и записи файлов;

- сведения о запущенных службах и загруженных классах;
- сведения о сборе и отправке пользовательских данных;
- сведения о разрешениях, которые получило приложение;
- сведения об отправляемых SMS-сообщениях и осуществляемых вызовах.

В рамках статического анализа предположительно вредоносной программы производится анализ ее кода. Главной задачей рассматриваемого типа анализа является выделение части кода, ответственной за предположительно вредоносные действия исследуемой программы.

Существует два наиболее распространенных способа проведения статического анализа, а именно с использованием программного обеспечения ArkTool, которое позволяет произвести дизассемблирование предположительно вредоносной программы, а также с помощью программного продукта JD-GUI, для анализа исходного кода. По результатам проведения динамического и статического анализа специалист может сделать вывод, является ли исследуемая программа вредоносной [10,11].

В качестве примера рассмотрим вредоносное программное обеспечение, предназначенное для несанкционированной отправки СМС - сообщений на короткие номера.

Использование вредоносных приложений, способных незаметно для владельцев мобильных устройств на платформе Android отправлять СМС - сообщения на короткие номера, уже длительное время является одним из главных способов обогащения для злоумышленников [12,13]. С ростом популярности дистанционного банковского обслуживания злоумышленники стали применять более продвинутые вирусы.

Алгоритм работы приложения, предназначенного для незаконного перевода денежных средств представлен на рис.1.

Умение правильно получить информацию из памяти мобильного устройства требует от специалиста глубоких знаний и компетентности, а также основательной подготовки. Для получения и исследования приложения, расположенного в памяти мобильного устройства, необходимо снять дампы памяти и выполнить декомпиляцию интересующего приложения [8,14].

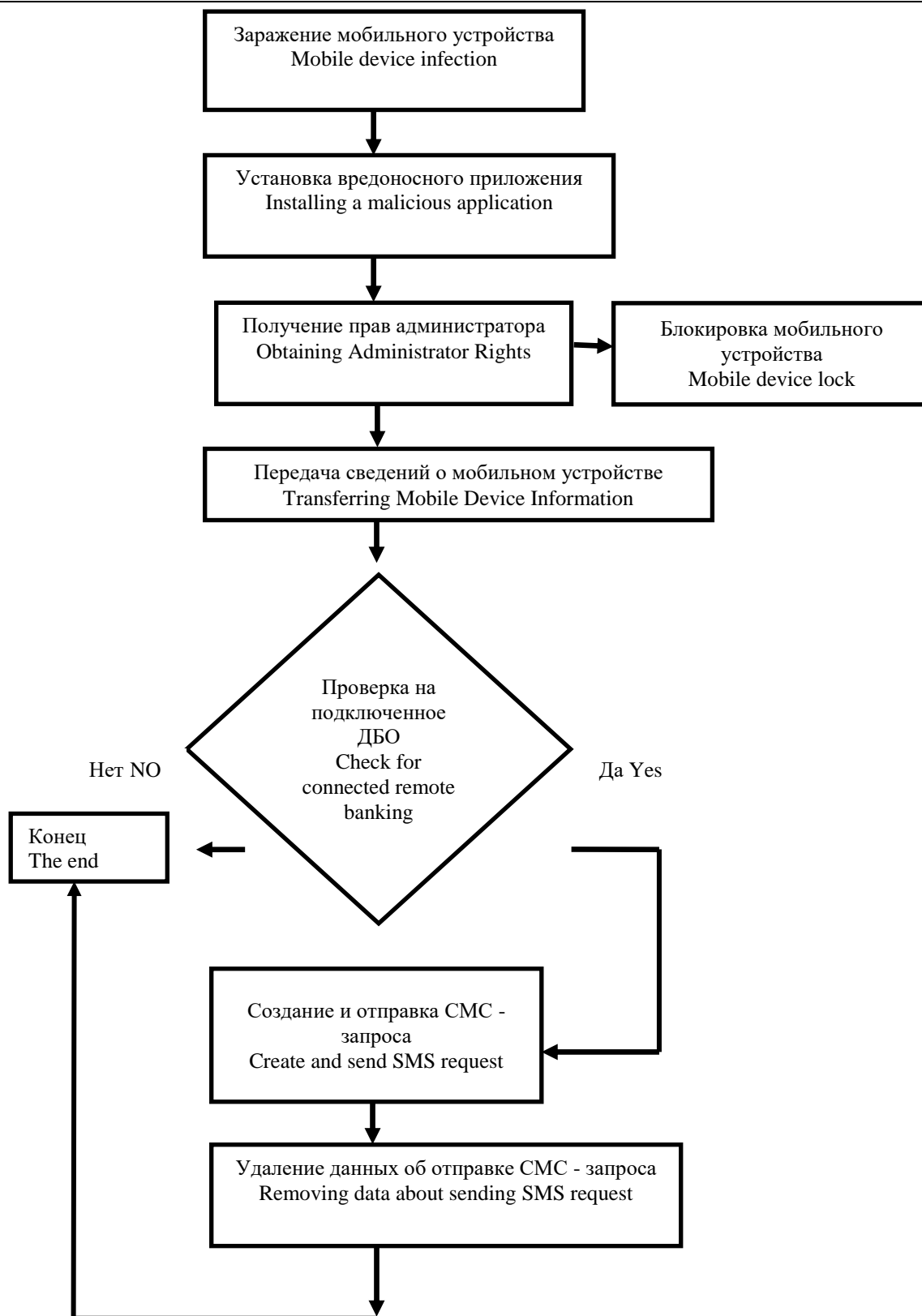
Для исследования вредоносного кода в APK приложениях необходимо выполнить декомпиляцию приложения, то есть извлечь все данные, которые находятся в APK.

Приложение работает в изолированной среде и имеет в своей структуре собственные разрешения и область рабочей памяти. Различные приложения могут взаимодействовать между собой, а также запрашивать систему для выделения ресурсов через предписания.

Все приложения для Android компилируются в файл AndroidPackage и устанавливаются на мобильное устройство.

Файл APK является вариантом формата JAR и в основном содержит две папки META-INF и RES со следующими файлами: AndroidManifest.xml, classes.dex и resources.arsc. AndroidManifest.xml содержит основную информацию о приложении и включает в себя список библиотек, необходимых для работы программы, указывает необходимые разрешения, а также выполняет следующие задачи:

- задает имя пакета Java для приложения. Данное имя пакета служит уникальным идентификатором приложения;
- описывает компоненты приложения — операции, службы, приемники широковестьных сообщений и поставщиков контента, из которых состоит приложение. AndroidManifest.xml содержит имена классов, которые реализуют каждый компонент, и публикует их возможности.



**Рис. 1. Алгоритм приложения для незаконного перевода денежных средств**

**Fig. 1. The algorithm of the application for illegal money transfers**

На основании этих деклараций операционная система определяет, из каких компонентов состоит приложение и при каких условиях их можно запускать;

– определяет, в каких процессах будут размещаться компоненты приложения;

- объявляет, какие разрешения должны быть выданы приложению, для получения доступа к защищенным частям API-интерфейса, а также для взаимодействия с другими приложениями;
- объявляет минимальный уровень API-интерфейса Android, который требуется приложению.
- содержит список библиотек, с которыми должно быть связано приложение.

Classes.dex содержит код всего приложения для Dalvik. Dalvik это регистровая виртуальная машина для выполнения программ, написанных на языке программирования Java, которая входит в операционную систему Android.

**Обсуждение результатов.** В качестве разбора вредоносного кода в приложении рассмотрим приложение, которое осуществляло несанкционированную отправку СМС - сообщений. По результатам анализа приложений, имеющихся на мобильном устройстве, выявлено приложение «SMSSender».

Первым шагом стала декомпиляция приложения, которая позволила получить необходимый для исследования код.

Дальнейшее исследование файла, а именно определение содержащихся в нем данных или команд, осуществлялось при помощи «AndroidStudio» - интегрированной средой разработки для работы с платформой Android.

Проанализировав файл «AndroidManifest.xml», который содержит запросы для получения различных функций и прав на мобильном устройстве, обнаружена функция «SMS\_SEND», которая позволяет приложению осуществлять отправку SMS-сообщений.

Далее исследовался метод «onCreate», который содержится в классе приложения «Activation». Данный метод содержит следующий код:

```
new-instance v0, Lcl/catsboat/c;  
invoke-direct {v0, p0}, Lcl/catsboat/c;-><init>(Lcl/catsboat/Main;)V  
invoke-virtual {v0}, Lcl/catsboat/c;->
```

Анализ кода показывает, что после запуска приложения дополнительно открывается еще одно активное окно, которое не отображается на экране мобильного устройства.

Стоит обратить внимание на класс «cl/catsboat/c», который содержит следующий код:

```
invoke-direct {v1, v2, v3}, Lcl/catsboat/a;-  
><init>(Landroid/content/Context;Landroid/os/Handler;)V
```

Данная строка кода содержит обращение к классу «a.smali». Конструкция данного класса содержит следующий код:

```
const-string v1, "image.png"  
invoke-virtual {v0, v1}, Landroid/content/res/AssetManager;-  
>open(Ljava/lang/String;)Ljava/io/InputStream;  
move-result-object v0  
const-wide/16 v2, 0x3486  
invoke-virtual {v0, v2, v3}, Ljava/io/InputStream;->skip(J)J  
new-instance v1, Ljava/io/DataInputStream;
```

```
invoke-direct {v1, v0}, Ljava/io/DataInputStream;-><init>(Ljava/io/InputStream;)V
```

Данный блок кода создает объект, представляющий собой поток байтов для чтения из файла «image.png», находящегося в каталоге «Assets» приложения «SMSSender». Далее блок пропускает первые 13446 байт и создает на основе него поток для чтения Java данных. Логично предположить, что в файле «image.png» имеется зашифрованный код, к которому обращается приложение после запуска.

Для получения зашифрованного кода в файле «image.png» необходимо воспользоваться шестнадцатеричным редактором «WinHex» и выполнить следующие действия:

В редакторе «WinHex» выбрать изображение «image.png», которое находится в каталоге «\SMSSender\assets». Так как графическое изображение «image.png» имеет формат png, то его байт-код всегда заканчивается как 44 4E 44 AE 42 60 82 (END@B',).

Переход к байт - коду (END@B',) показывает окончание файла. Однако в исследуемом графическом изображении image после него имеется дополнительный код, представленный на рис. 2.

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	
000033F0	20	2C	17	A3	AF	CF	C4	B6	BC	0F	F9	10	72	26	06	CC	, 4TAT4 u r4 i
00003400	59	F4	FF	58	5A	C7	FF	90	1A	24	80	48	41	D7	C7	80	Y0yXZCqY S*HA>CE
00003410	A5	65	8D	3E	21	40	53	00	10	40	03	1D	81	0C	58	72	We > !8S 8 Xr
00003420	22	F2	6A	67	E4	D9	6E	E4	40	43	0F	6C	64	8C	6D	65	"0jq8Un8@C l0dme
00003430	D8	7F	B4	00	C5	35	89	8C	EF	82	0E	46	34	9A	01	4B	0 - A5u8i, F48 K
00003440	F7	E0	3F	11	E6	50	15	00	04	D0	60	88	40	74	CF	FF	+a? eP B'0tiy
00003450	45	CA	5D	8C	0C	B8	97	29	A0	E7	1A	62	02	8C	92	80	E8]E .-) c b G'e
00003460	1D	94	3B	90	01	02	88	11	72	5B	E8	28	18	AA	00	20	"; - rfe( a
00003470	C0	00	E6	A5	34	7D	A3	3A	16	51	00	00	00	00	49	45	A eY4): Q IE
00003480	4E	44	AE	42	60	82	63	6F	74	6A	74	73	28	3D	43	7C	ND8B',cotjts(=C
00003490	4A	21	63	66	2A	66	69	69	7C	39	43	6C	16	0D	65	6C	U!cf*fi1 9Cl el
000034A0	70	60	7E	73	33	56	44	75	48	21	78	76	24	64	68	63	p'~s3VDuH!xv\$dhc
000034B0	7A	33	44	7C	16	3A	6F	6E	61	75	6E	68	66	25	03	4B	z3D :onaunhf% K
000034C0	55	3D	47	63	6A	64	61	62	7A	67	27	71	55	3E	65	70	U=Gcjdabzq'qU>ep
000034D0	70	25	67	69	6C	2E	42	71	5C	60	7D	6B	60	62	63	73	p%qil.Bq\`)'k'bc8
000034E0	26	08	42	79	4B	3A	31	08	57	68	75	4A	69	32	4C	7F	& ByK:l WhuJ12L
000034F0	5D	3C	2A	6F	24	38	26	54	65	2F	60	79	56	2F	6D	67	l<*oS84Te'`yV/mg
00003500	76	2B	61	62	7C	18	48	7E	59	3B	66	76	2C	2C	3D	0D	v+abl H-Y:fv,==
00003510	65	72	5E	7D	56	2A	5E	67	7C	71	4B	62	7B	2F	4C	7F	er^V*^g qKb(/L
00003520	5D	66	28	33	35	34	37	31	3D	6F	19	3A	14	6E	28	33	lf(35471=0 : n(3
00003530	35	34	24	2B	28	7E	EF	B9	70	21	66	63	25	27	2A	27	54S+(-1'p:fc%'*
00003540	66	29	41	74	14	6E	64	77	68	69	2F	3C	02	2E	0D	25	f)At ndwhi/< . %
00003550	18	20	6F	75	24	57	73	69	66	3D	4F	74	5D	66	23	22	ou\$Welf=Ot]f#"
00003560	7F	0F	26	75	7D	32	05	31	18	35	00	22	24	25	26	53	6u)2 1 S "S%65
00003570	67	3D	5E	6C	16	23	6B	69	61	51	63	7F	7C	74	4E	6C	g=^l #kiaQc ltnl
00003580	40	62	2A	20	C6	A4	4E	66	7B	28	4C	38	54	2F	2A	74	8b* 88P((L8T/*t
00003590	6D	76	72	66	29	7E	01	4C	57	2F	79	76	2A	49	43	49	mvr(f)~ LW/yv*ICI
000035A0	4F	08	65	47	74	01	44	45	2D	2B	75	6F	67	2B	05	31	O eGt DE~+uog+ 1
000035B0	03	44	2A	7F	0E	78	3D	0D	02	34	03	68	57	3D	7E	2A	D* x= 4 hW=~*
000035C0	76	2C	3D														v,

Рис. 2. Дополнительный код

Fig. 2. Additional code

Скопировав данный блок кода в отдельный файл, и присвоив ему имя «malware», переходим к его расшифровке. Для расшифровки байт-кода используется нижеприведенный код, который читает первые 317 байтов, по одному байту из файла «malware». Каждый из байтов выполняет сложение по модулю 2 (XOR) поочередно с байтом из буфера «key» и сохраняет их в буфер «buf».

```
import java.io.*;

public class test
{
    public static void main(String[] args)
    {
        byte [] key = {10,2,4,5,6,7,8,92,45,24,56,78};
        int kPos = 0;
        char[] buf = new char[317];
        try
        {
            InputStream is = new FileInputStream(new File("c:\night"));
            for(int i = 0;i<buf.length;i++) {
                if(is.available() == 0) break;
                buf[i] = (char)(is.read() ^ key[kPos]);
                kPos = (kPos == key.length - 1) ? 0 : (kPos + 1);
            }
            System.out.println(buf);
        }
        catch(Exception ex){}
    }
}
```

Создав файл «test», с приведенным выше кодом в каталоге «\*\Java\jdk1.7.0\_79\bin» с расширением java, необходимо в командной строке выполнить следующую команду: «cd \*\Java\jdk1.7.0\_79\bin». Далее выполняем следующую команду: «javac test.java». После этого в каталоге «bin» создается файл «test.class». Для расшифровки байт-кода, находящегося в файле «malware», воспользуемся командой: «java -classpath .test».

Далее в консоли отобразится расшифрованный код:

```
import android.content.Context;
import android.telephony.SmsManager
import android.widget.Toast
SmsManager m = SmsManager.getDefault();
m.sendMessage("900", " null", " Перевод 89001230000", null, null);
r = new Runnable() {
    run() {
        Toast.makeText(ctx, "??Hasta la vista!", Toast.LENGTH_LONG).show();
    }
}
h.post(r);
```

По результатам анализа кода было установлено, что приложение отправляет SMS-сообщения на абонентский номер «900» с текстом «89001230000».

Данное приложение может быть использовано злоумышленниками для хищения денежных средств с мобильных устройств и банковских карт. В связи с этим, стоит отметить, что необходимо исследовать все вложения, являющиеся продолжением головного кода приложения.

**Вывод.** Предложено использовать формальную модель, позволяющую находить оптимальный набор действий по защите информации с целью обеспечения информационной безопасности в мобильных устройствах под управлением операционной системы Android, а также проводить анализ приложений для выявления вредоносного программного обеспечения.

Исследование вредоносного программного обеспечения, предназначенного для незаконного перевода денежных средств, является актуальной задачей современной криминалистики. При этом следует учитывать отсутствие научно обоснованных методик решения данных криминалистических задач.

На сегодняшний день существуют несколько проблем в защите ОС Android. Отсутствует самозащита операционной системы Android, система должна защищаться от воздействий ещё неизвестных вредоносных приложений. Кроме перехвата вредоносного приложения необходимо распознать вирус в упакованном, зашифрованном или обфусцированном виде. Необходимо противодействовать неизвестным вредоносным приложениям, которые созданы злоумышленниками, с учетом знаний об антивирусных программах, а также получать обновление баз данных антивирусных программ для активного противодействия вредоносным приложениям.

Современные методы выявления вредоносного программного обеспечения не гарантируют надежной защиты. Сведения, приведенные в данной работе, позволят повысить качество выполнения специалистами своих профессиональных задач при разборе инцидентов в сфере информационной безопасности, связанных с незаконным переводом денежных средств, с использованием устройств под управлением операционной системы Android.

#### Библиографический список:

1. Защита информации. Основные термины и определения: ГОСТ Р 50922-2006. – взамен ГОСТ Р 50922-96; введ. 01.02.2008 // СПС «Консультант-Плюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель. – Введ. 2009-10-01.
3. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации : утв. Президентом Российской Федерации №646 от 06.12.2016 // СПС «Консультант Плюс». Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.
4. Нестеров, С. А. Информационная безопасность : учебник и практикум для академического бакалавриата / С. А. Нестеров. Москва : Издательство Юрайт, 2017. 321 с. (Университеты России). ISBN 978-5-534-00258-4. Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/398687> (дата обращения: 15.06.2019).
5. Бирюков А.А. Информационная безопасность. Защита и нападение. 2-е издание. М.: ДМК-Пресс, 2017.
6. Нестеров А.Д., Баркалов Ю.М. Выявление угроз информационной безопасности в мобильных операционных системах // Всероссийская научно-практическая конференция. Актуальные вопросы эксплуатации

систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. - Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2016. С. 17-19.

7. Кичук Д.Я., Бурдинский И.А. Особенности исследования информации в мобильных устройствах под управлением ОС Android по преступлениям в сфере дистанционного банковского обслуживания // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. Воронеж: Воронежский институт МВД, 2018. С. 123-124.

8. Нестеров А.Д., Баркалов Ю.М. Организационно-правовое обеспечение получения информации из мобильных устройств и облачных хранилищ при расследовании инцидентов в сфере информационной безопасности // Международная научно-практическая конференция. Преступность в СНГ: Проблемы предупреждения и раскрытия преступлений. - Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. - С. 34-36.

9. Анализ угроз информационной безопасности современных мобильных систем / Жернаков С. В., Гаврилов Г. Н. // Интеграционные процессы науки XXI века: сборник статей Международной научно-практической конференции. Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. С. 54 - 60.

10. Детектирование вредоносного программного обеспечения в мобильной операционной системе на базе Android на основе разрешений с применением метода опорных векторов / Жернаков С. В., Гаврилов Г. Н. // Научно периодическое издание Ceteris Paribus: Европейский фонд инновационного развития. Ежемес. науч. журнал «Ceteris Paribus», 2015.С. 10 -14.

11. Мастхэв для мобильной аналитики. Что нужно, чтобы вскрывать приложения для Android на Android // Хакер URL: <https://xakep.ru/2019/03/12/mobile-analytics-must-have/> (дата обращения: 15.06.2019).

12. Уязвимость в Android позволяет перехватывать конфиденциальные данные // Хакер URL: <https://xakep.ru/2018/09/03/wifi-broadcasts-leak/> (дата обращения: 15.06.2019).

13. Баркалов Ю.М. Методика расследования преступлений в сфере дистанционного банковского обслуживания // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. С. 172-176.

14. Баркалов Ю.М. Проведение экспертизы программного обеспечения мобильных устройств под управлением ОС "Андроид" // Преступность в сфере информационных и телекоммуникационных технологий: проблемы предупреждения, раскрытия и расследования преступлений. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2016. С. 137-142.

15. Баркалов Ю.М., Перминов Г.В. Выявление НСД к мобильным устройствам, используемым в ИСОД МВД России // Охрана, безопасность, связь. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2017. С. 32-36.

#### References:

1. Zashchita informatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya: GOST R 50922-2006. – vzamen GOST R 50922-96; vved. 01.02.2008 // SPS «Konsul'tant-Plyus». – Rezhim dostupa: <http://www.consultant.ru>. [Information protection. Basic terms and definitions: GOST R 50922-2006. – instead of GOST R 50922-96; enter. 01.02.2008 // ATP "Consultant-Plus". – Access mode: <http://www.consultant.ru>. (In Russ.)]

2. GOST R ISO/MEK 15408-1-2008. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. Chast' 1. Vvedeniye i obshchaya model'. – Vved. 2009-10-01. [GOST R ISO/IEC 15408-1-2008. Information technology. Methods and means of security. Criteria for assessing the security of information technology. Part 1. Introduction and General model. – Enter. 2009-10-01. (In Russ.)]

3. Doktrina informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii : utv. Prezidentom Rossiyskoy Federatsii №646 ot 06.12.2016 // SPS «Konsul'tant Plyus». – Rezhim dostupa: <http://www.consultant.ru> [The doctrine of information security of the Russian Federation : app. President of the Russian Federation №646 from 06.12.2016 // ATP "Consultant Plus". – Access mode: <http://www.consultant.ru>. (In Russ.)]

4. Nesterov S. A. Informatsionnaya bezopasnost' : uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata / S. A. Nesterov. Moskva : Izdatel'stvo Yurayt, 2017. 321 s. (Universitety Rossii). ISBN 978-5-534-00258-4. Tekst : elektronnyy // EBS Yurayt [sayt]. URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/398687> (data obrashcheniya: 15.06.2019). [Nesterov S. A. Information security : textbook and workshop for academic undergraduate / S. A. Nesterov. Moscow : Yurayt Publishing House, 2017. 321 p. (Russian Universities). ISBN 978-5-534-00258-4. Text : electronic // EBS yurayt [website]. URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/398687> (date accessed: 15.06.2019). (In Russ.)]

5. Biryukov A.A. Informatsionnaya bezopasnost'. Zashchita i napadeniye. 2-ye izdaniye. M.: DMK-Press, 2017. [Biryukov A. A. Information security. Defense and offense. 2nd edition. M.: DMK-Press, 2017. (In Russ.)]

6. Nesterov A.D., Barkalov YU.M. Vyavleniye ugroz informatsionnoy bezopasnosti v mobil'nykh operatsionnykh sistemakh // Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Aktual'nyye voprosy ekspluatatsii sistem okhrany i zashchishchennykh telekommunikatsionnykh sistem. - Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2016. - S. 17-19. [Nesterov A.D., Barkalov Yu. M. Identification of information security threats in mobile operating systems // all-Russian scientific and practical conference. Topical issues of operation of security systems and secure telecommunications systems. - Voronezh: Voronezh Institute of the Russian interior Ministry, 2016. pp. 17-19. (In Russ.)]

7. Kichuk D.YA., Burdinskiy I.A. Osobennosti issledovaniya informatsii v mobil'nykh ustroystvakh pod upravleniyem OS Android po prestupleniyam v sfere distantsionnogo bankovskogo obsluzhivaniya // Aktual'nyye voprosy ekspluatatsii sistem okhrany i zashchishchennykh telekommunikatsionnykh sistem. Voro-nezh: Voronezhskiy institut MVD, 2018. S. 123-124. [Kichuk D. Ya., Burdinsky I. A. Features of information research in mobile devices running Android OS on crimes in the field of remote banking // Actual issues of operation of security systems and secure telecommunications systems. Voronezh: Voronezh Institute of the interior Ministry, 2018. pp. 123-124. (In Russ.)]

8. Nesterov A.D., Barkalov YU.M. Organizatsionno-pravovoye obespecheniye polucheniya informatsii iz mobil'nykh ustroystv i oblachnykh khranilishch pri rassledovanii intsidentov v sfere informatsionnoy bezopasnosti // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Prestupnost' v SNG: Problemy preduprezhdeniya i raskrytiya prestupleniy. - Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2015. - S. 34-36. [Nesterov A.D., Barkalov Yu. M. Organizational and legal support for obtaining information from mobile devices and cloud storage in the investigation of incidents in the field of information security // international scientific and practical conference. Crime in the CIS: Problems of crime prevention and detection. - Voronezh: Voronezh Institute of the Russian interior Ministry, 2015. pp. 34-36. (In Russ.)]
9. Analiz ugroz informatsionnoy bezopasnosti sovremennykh mobil'nykh sistem / Zhernakov S. V., Gavrilov G. N. // Integratsionnyye protsessy nauki XXI veka: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sterlitamak: RITS AMI, 2015. С. 54 - 60. [Analysis of threats to information security of modern mobile systems / Zhernakov S. V., G Gavrilov. N. // Integration processes of science of the XXI century: collection of articles of scientific and practical International conference. Sterlitamak: the RITZ, 2015. pp. 54 - 60. (In Russ.)]
10. Detektirovaniye vredonosnogo programmnoy obespecheniya v mobil'noy operatsionnoy sisteme na baze Android na osnove razresheniya s primeneniye metoda opornykh vektorov / Zhernakov S. V., Gavrilov G. N. // Nauchno periodicheskoye izdaniye Ceteris Paribus: Yevropeyskiy fond innovatsionnogo razvitiya. Yezhemes. nauch. zhurnal «Ceteris Paribus», 2015.S. 10 -14. [Detection of malicious software in Android-based mobile operating system based on resolutions using the support vector machine / Zhernakov S. V., Gavrilov G. N. // Scientific periodical Ceteris Paribus: European Foundation for innovative development. Every minute. science. journal "Ceteris Paribus", 2015.pp. 10 -14. (In Russ.)]
11. Mastkhev dlya mobil'noy analitiki. Chto nuzhno, chtoby vskryvat' prilozheniya dlya Android na Android // Khaker URL: <https://xakep.ru/2019/03/12/mobile-analytics-must-have/> (data obrashcheniya: 15.06.2019). [A must have for mobile Analytics. You need to open Android apps on the Android // Hacker URL: <https://xakep.ru/2019/03/12/mobile-analytics-must-have/> (accessed: 15.06.2019). (In Russ.)]
12. Uyazvimost' v Android pozvolyayet perekhvatyvat' konfidentsial'nyye dannyye // Khaker URL: <https://xakep.ru/2018/09/03/wifi-broadcasts-leak/> (data obrashcheniya: 15.06.2019). [Vulnerability in Android allows you to intercept sensitive data // Hacker URL: <https://xakep.ru/2018/09/03/wifi-broadcasts-leak/> (date of application: 15.06.2009). (In Russ.)]
13. Barkalov YU.M. Metodika rassledovaniya prestupleniy v sfere distantsionnogo bankovskogo obsluzhivaniya // Obshchestvennaya bezopasnost', zakonnost' i pravoporyadok v III tysyacheletii. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2015. S. 172-176. [Barkalov Yu. M. Methods of investigation of crimes in the field of remote banking // Public security, law and order in the III Millennium. Voronezh: Voronezh Institute of the Russian interior Ministry, 2015. pp. 172-176. (In Russ.)]
14. Barkalov YU.M. Provedeniye ekspertizy programmnoy obespecheniya mobil'nykh ustroystv pod upravleniyem OS "Android" // Prestupnost' v sfere informatsionnykh i telekommunikatsionnykh tekhnologiy: problemy preduprezhdeniya, raskrytiya i rassledovaniya prestupleniy. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2016. S. 137-142. [Barkalov Yu. M. Examination of software for mobile devices running OS "Android" // Crime in the field of information and telecommunication technologies: problems of prevention, detection and investigation of crimes. Voronezh: Voronezh Institute of the Russian interior Ministry, 2016. pp. 137-142 (In Russ.)]
15. Barkalov YU.M., Perminov G.V. Vyyavleniye NSD k mobil'nykh ustroystvam, ispol'zuyemykh v ISOD MVD Rossii // Okhrana, bezopasnost', svyaz'. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2017. S. 32-36. [Barkalov S. M., Perminov, G. V., Detection of unauthorized access to mobile devices used in ISOD of the MIA of Russia // Security, safety, connectivity. Voronezh: Voronezh Institute of the Russian interior Ministry, 2017. pp. 32-36. (In Russ.)]

**Сведения об авторах:**

**Баркалов Юрий Михайлович** – заместитель начальника кафедры информационной безопасности.

**Нестеров Антон Дмитриевич** – адъюнкт.

**Information about the authors:**

**Yuri M. Barkalov** – Deputy head of information security Department.

**Anton D. Nesterov**–Adjunct.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 19.04.2019.

**Принята в печать** 01.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 19.04.2019.

**Accepted for publication** 01.06.2019.



**Для цитирования:** Кадиев И.П. Общие принципы построения систем индексации элементов конечных множеств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 81-88. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-81-88

**For citation:** Kadiev I.P. General principles of construction of systems of indexation of elements of finite sets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(2): 81-88. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-81-88

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.5

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-81-88

### ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ИНДЕКСАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ

**Кадиев И.П.**

Отделение - Национальный банк по Республике Дагестан Южного главного управления  
Центрального банка Российской Федерации,  
367000, г. Махачкала, ул. Даниялова, 29, Россия,  
e-mail:islam-kadi@mail.ru

**Резюме** *Цель.* Определение общих принципов построения систем индексации элементов конечных множеств. *Метод.* Построение модели процесса индексации. Определение общих правил присвоения атрибутов – индексов элементам множеств. *Результат.* Предложен общий принцип построения систем индексации элементов множеств и их совокупностей. Основой предложенного принципа индексации является обязательное наличие функциональных связей между значениями индексов элементов. Основным признаком различия систем индексации является отличие функциональных зависимостей между значениями индексами элементов окружения. Системы индексации определяют структурные свойства множеств и их совокупностей. Изменение систем индексации предопределяет изменение структуры. Это позволяет формировать из элементов исходных конфигураций множеств, множеств с различными структурами, менять их структурные свойства. *Вывод.* Предложен общий принцип построения систем индексации элементов множеств и их совокупностей, в основе которого функциональные зависимости между индексами элементов. Изменения используемых функциональных зависимостей между индексами элементов, как показано в работе, позволяет формировать комбинаторные конфигурации, обладающие различными структурными свойствами. Система индексации совокупность правил присвоения элементам множеств атрибутов - индексов, обеспечивающих их различимость и связи с окружением и определяющая их структурные свойства. В основе построения любых структур и систем индексации некоторые общие базовые принципы их построения. Они проиллюстрированы на основе используемых систем индексации в классической алгебре. По результатам исследования принципов построения систем индексации, предложена обобщенная модель систем индексации. В качестве общего принципа, являющегося общим принципом построения систем индексации, в качестве модели предложена система функциональных зависимостей между значениями индексов элемента множеств и значениями индексов элементов его окружения.

**Ключевые слова:** системы индексации, принцип функциональной зависимости, структурные свойства множеств

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### GENERAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF SYSTEMS OF INDEXATION OF ELEMENTS OF FINITE SETS

**Islamudin P. Kadiev**

Branch - National Bank for the Republic of Daghestan Southern Central Administration of the  
Central Bank of the Russian Federation,  
29 Danialova Str., Makhachkala 367000, Russia,  
e-mail:islam-kadi@mail.ru

**Abstract.** *Objectives* Definition of general principles for constructing indexing systems for elements of finite sets. **Method.** Building a model of the indexing process. Definition of general rules for assigning attributes - indices to elements of sets. **Result.** The general principle of constructing indexing systems for elements of sets and their aggregates is proposed. The basis of the proposed indexing principle is the mandatory presence of functional relationships between the values of the element indices. The main sign of differences in indexing systems is the difference in functional dependencies between the values of the indices of the environment elements. Indexing systems determine the structural properties of sets and their aggregates. A change in indexing systems predetermines a change in structure. This allows one to form sets, sets with different structures from elements of the initial configurations, and change their structural properties. **Conclusion.** A general principle is proposed for constructing systems for indexing elements of sets and their aggregates, based on which are functional dependencies between element indices. Changes in the used functional dependencies between the element indices, as shown in the work, allows one to form combinatorial configurations with different structural properties. The indexing system is a set of rules for assigning to the elements sets of attributes - indices, ensuring their visibility and communication with the environment and determining their structural properties. At the heart of the construction of any structures and indexing systems are some common basic principles for their construction. They are illustrated based on the indexing systems used in classical algebra. Based on the results of a study of the principles of constructing indexing systems, a generalized model of indexing systems is proposed. As a general principle, which is a general principle of constructing indexing systems, a system of functional dependencies between the values of the indices of an element of sets and the values of the indices of the elements of its environment is proposed as a model.

**Keywords:** indexing systems, principle of functional dependence, structural properties of sets

**Введение.** Существует множество систем индексации элементов множеств, образованных различными объектами, как физической природы, так и абстрактных, например, система индексация объектов почтовая связи, система индексации цен и т.д.

Общим их назначением является, прежде всего, установление возможности различения элементов во множествах, что является одним из основных требований к совокупности, образующих множеств. Существует понятие принципа построения систем, имеющих общее название [1]. Под принципом построения системы принято понимать, то общее что характерно для всех систем с общим названием [2].

**Постановка задачи.** При обзоре литературы автором четкого определения понятия общего принципа построения систем индексации не обнаружено [3-10]. Общим для всех систем индексации можно считать наличие функциональных связей между значениями индексов элементов и их окружения, которое упорядочивает структуру формируемого множества.

**Методы исследований.** Для выявления общей закономерности построения систем индексации был проведен анализ структуры множеств.

Конечное множество, при системном подходе, представляет собой «целое» - систему, образованную различными объектами, обладающими некоторым общим для них свойством. Для любой системы характерны информационные, общесистемные, структурные и функциональные свойства. Структурные свойства систем отражают состав ее элементов и связи между ними. Потому задание конечного множества в виде списка различных элементов и их взаимного расположения можно рассматривать как задание структуры системы [11].

Различимость элементов может быть задано использованием отличных друг от друга символьных обозначений элементов или, при использовании одного общего символа обозначения элементов, присвоением этому символу дополнительных атрибутов различимости.

Эти дополнительные элементы, известные как индексы, могут выполнять не только признак различимости элементов, но и отражать их местоположение во множестве, нести информацию об элементах непосредственного его «окружении». Состав элементов системы и их взаимное положение определяют её структуру. Присвоение атрибутов различимости производится по определенным правилам, которые образуют систему индексации элементов множества.

Системы индексации линейных конечных множеств с общим символом обозначением элементов с индексами, индексы, при классической индексации, являются цифровыми, приписываемыми снизу в правой части символа элемента [12-14]. Они несут информацию о местоположении элемента при списочном способе задания множества, одновременно отражая структурные свойства множества – связи, взаимное их расположение. Для этих множеств, как систем, структуры отражены при списочном способе их задания. Индексы отражают взаимное расположение элементов и задают списочный состав.

Для двумерных конфигураций, образованных конечными множествами, для обозначения элементов множеств могут быть использованы как различные, так и одинаковые символы. Если использованы различные символы для различения множеств, то индексы элементов во множествах могут быть одноэлементными, так как различие символов множеств позволяет различать принадлежность к множествам.

При использовании для обозначения элементов одинаковых символов, индексы являются двух элементными.

При «классической» их интерпретации они отражают одновременно адресное свойство элементов в конфигурации: строку и столбец, на пересечении которых они находятся, и одновременно являются признаком их различимости, по принадлежности к множеству и позиции, занимаемой элементом в нем.

Общий вид модели систем классической индексации элементов конечных множеств.

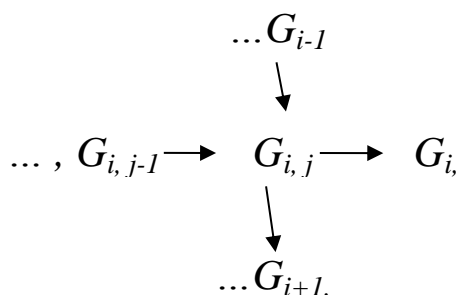
Для выявления общих свойств методов построения всех систем индексации множеств, которые могут быть предложены в качестве общего принципа построения систем индексации множеств, ниже рассмотрены существующие классические системы индексации.

Для линейных конечных множеств общая структура и индексация, определяющие состав и расположение элементов окружения  $G_i$  на позициях, имеет вид:  $G_1, \dots, G_{i-1}, G_i, G_{i+1}, \dots, G_n$ .

Очевидно, что существует функциональная связь между значением индексов элемента  $G_i$  и значениями индексов элементов  $G_{i-1}$  и  $G_{i+1}$  его окружения.

Общий вид модели этой зависимости может быть представлен в как:  $\dots, G_{Y_1(i)}, G_i, G_{Y_2(i)}, \dots$ , где  $Y_1(i) = i-1$ ,  $Y_2(i) = i+1$ .

Для двумерных множеств эта же зависимость имеет вид:



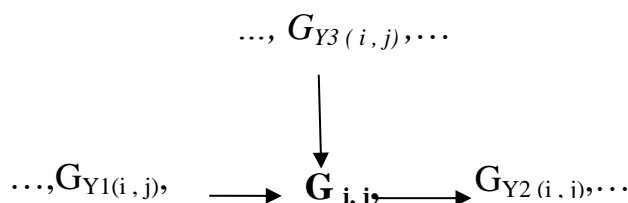
**Рис. 1. Схема «классической» индексации элементов окружения**  
**Fig. 1. The scheme of "classical" indexing of environment elements**

В двумерных совокупностях множеств (рис.1) первые индексы элементов, стоящих перед каждым элементом  $G_{i,j}$  в строках остаются постоянными, указывая его принадлежность строке (определенному множеству), вторые меняются на единицу.

В столбцах имеет место обратные изменения значений индексов: первые индексы элементов стоящих над данным элементом больше значения его индекса на единицу, первый индекс элемента стоящего под ним в столбце больше на единицу. Значения вторых индексов элементов в столбцах остаются постоянными, указывая его принадлежность определенному столбцу.

Так же как и для линейных множеств имеет место отмеченная функциональная зависимость значений индексов элементов окружения от значений индексов элемента, который они окружают.

Общий вид модели зависимостей индексов элементов окружения приведен на рис. 2.



Функции зависимости индексов элементов окружения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 &Y_1(i,j): y_{11}(i) = i, y_{12}(j) = j - 1 \\
 &Y_2(i,j): y_{21}(i) = i, y_{22}(j) = j + 1 \\
 &Y_3(i,j): y_{31}(i) = i - 1, y_{32}(j) = j \\
 &Y_4(i,j): y_{41}(i) = i + 1, y_{42}(j) = j
 \end{aligned} \tag{1}$$

**Рис.2 Общий вид модели принципа построения систем индексации**  
**Fig. 2 General view of the model of the construction of indexing**

**Обсуждение результатов.** Приведенные примеры иллюстрируют наличие общего принципа в процессах построения систем индексации [14-17]. Он заключается в том, что устанавливаются функциональные зависимости между значениями индексов элементов множеств в конфигурациях и значениями индексов элементов, которые их окружают.

Это свойство, характерное для основы построения существующих систем индексации, является общим принципом построения систем индексации.

На основании предложенного принципа могут быть построены различные системы индексации, соответствующие функциональным зависимостям  $Y_1(i,j) - Y_4(i,j)$  значений индексов элементов и значений индексов его окружения.

Эти зависимости определяют структуры формируемых множеств.

Для иллюстрации особенностей формируемых комбинаторных конфигураций с индексацией, отличной от классической, можно привести пример для линейного множества, в котором функциональные зависимости индексов, отличаются от классических  $Y_1(i) = i-1$ ,  $Y_2(i) = i+1$ .

Например, пусть имеется исходное множество  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7$  с функциональными зависимостями индексов  $Y_1(i) = i-1$ ,  $Y_2(i) = i+1$  и числом элементов равным  $n = 7$ .

Преобразуем множество, изменив функциональные зависимости индексов на  $Y_1(i) = i-2$ ,  $Y_2(i) = i+2$ .

Это приведет к сформировано из элементов исходного множества подмножества, структура которого имеет вид:  $G_3, G_5, G_7, G_2, G_4, G_6, G_1$ .

При значениях функций  $Y_1(i) = i-3$ ,  $Y_2(i) = i+3$  будет сформирована конфигурация  $G_4, G_7, G_3, G_6, G_2, G_5, G_1$ .

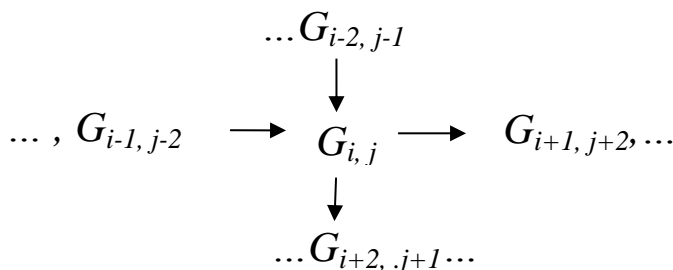
Используя различные функциональные зависимости индексов окружения, могут формироваться из элементов исходных множеств, с классической индексацией, различные подмножества, соответствующие конфигурациям, известным как «перестановки» или подстановки.

Формирование различных конфигураций перестановками элементов конечных множеств – одна из центральных задач комбинаторики и комбинаторного анализа. Следовательно, предлагаемый принцип формирования систем индексации может рассматриваться как метод формирования комбинаторных конфигураций из элементов конечных множеств. Для выявления закономерностей, характерных для принципов построения систем, приведенный пример для линейных множеств может быть рассмотрен для двумерных массивов, образованных конечными множествами. Эти массивы могут интерпретироваться как матрицы, в которых множества образуют строки.

В качестве примера формирования конфигураций в матричных конфигурациях можно привести формирование конфигурации с функциональными связями (2), отличными от классических (1):

$$\begin{aligned} Y_1(i, j): y_{11}(i) &= i - 1, y_{12}(j) = j - 2 \\ Y_3(i, j): y_{31}(i) &= i - 1, y_{32}(j) = j - 1 \\ Y_2(i, j): y_{21}(i) &= i + 1, y_{22}(j) = j + 2 \\ Y_4(i, j): y_{41}(i) &= i + 1, y_{42}(j) = j + 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Схема связей значений индексов окружения, соответствующий функциям (2), будет иметь вид, приведенный на рис. 3 [18-19].



**Рис. 3. Схема изменений индексации элементов окружения**  
**Fig. 3. Scheme of changes in the indexing of environment elements**

На рис. 4а и 4б для двумерной совокупности множеств  $G_{5 \times 5}$ , приведены конфигурации, соответствующие классической системе индексации (4а) и системе функциональных связей (2), в которых отражены изменения структур конфигураций.

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

**Рис.4а. Структура исходного массива множеств с классической индексацией**  
**Fig.4a. The structure of the original array of sets with classical indexing**

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

**Рис. 4б. Структура массива множеств с индексацией по функциям (2)**  
**Fig. 4b. The structure of an array of sets with indexing by functions (2)**

Полученные в примерах результаты позволяют привести общий вид функциональных зависимостей (2), с введением переменных в выражение для функциональных зависимостей индексов в виде функций:

$$\begin{aligned} Y_1(i, j): y_{11}(i) &= i - k, y_{12}(j) = j - (k + m) \\ Y_2(i, j): y_{21}(i) &= i + k, y_{22}(j) = j + (k + m) \\ Y_3(i, j): y_{31}(i) &= i - (k + m), y_{32}(j) = j - k \\ Y_4(i, j): y_{41}(i) &= i + (k + m), y_{42}(j) = j + k. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих уравнениях константы  $k$  и  $m$  определяет множества, элементы которых окружают элемент в строке и в столбце и структуру формируемой конфигурации.

Уравнения (3) представляют собой рекуррентные индексные соотношения, которые могут рассматриваться как система уравнений формирования систем индексации.

**Вывод.** Предложенный принцип построения систем индексации носит общий характер, чем классическая система, которая является частным случаем использования общего принципа, соответствующего значениям констант  $k = 0$  и  $m = 1$ .

Он может быть использован для построения систем индексации при решении ряда комбинаторных задач, таких как составление расписаний, шифрование данных, обеспечение достоверности содержимого массивов данных, построение числовых магических квадратов.

Автором принцип был апробирован в работах [15,18,19] при решении комбинаторных задач, указанных классов.

#### Библиографический список:

1. Виленкин Н. Я. Комбинаторика. – М.: Наука, 1969. 328 с.
2. Тараканов В.Е., Айгнер М.А. Комбинаторная теория. М.: Мир, 1982. 362 с.
3. Гнеденко Б.В., Журбенко И.Г. Теория вероятностей и комбинаторика // Математика в школе. 2007. №6. С. 49 – 58.
4. Ежов И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. Элементы комбинаторики. – М.: Наука. 1977. 80 с.
5. Холл М. Комбинаторика / Под ред. А.О. Гельфанда, В.Е. Тараканова В.Е. / Перевод с английского С.А. Широкова. - М.: Мир, 1970. 424 с.
6. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика. – М.: Мир, 1990. 440 с.
7. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ. – М.: МГУ, 1994. 308 с.
8. Скачков В.Н. Комбинаторные методы дискретной математики. – М.: Наука, 1977. 320 с.
9. Леонтьев В.К. Избранные задачи комбинаторного анализа. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 179 с.
10. Соболева Т.С., Чечкин А.В. Дискретная математика. Университетский учебник. М.: Академия. 2006. 160 с.
11. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ. – М.: Юрайт, 2015. 615с.
12. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991. 469 p.
13. Рыбников К. А. Комбинаторный анализ. Очерки истории. – М.: МГУ, 1996. 124 с.
14. Андерсен Дж.А. Дискретная математика и комбинаторика. /Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. 957 с.
15. Кадиев И.П., Кадиев П.А. Об одном классе комбинаторных конфигураций. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2013. № 4. С. 45 – 49.

16. Дж. Кларк, Дж. Кейн Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. с англ. С.И. Гельфанда.- М.: «Радио и связь», 1987г.- 390с.
17. Бабаш А.В., Шанкин Г.П. Криптография. - М.: Солон - Р, 2002. 511с.
18. Кадиев И.П., Кадиев П.А. Основы индексной структуризации nxn –комбинаторных конфигураций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2018.Т.45 №1, с.139-146.
19. Кадиев И.П., Мелехин В.Б. Система индексной структуризации комбинаторных конфигураций методом рекуррентных функциональных соотношений. Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. №2, 2019 с. 43-47

#### References:

1. Vilenkin N. YA. Kombinatorika. – М.: Nauka, 1969. - 328 s. [Vilenkin N. Ya. Combinatorics. М.: Nauka, 1969. 328 p.(In Russ.)]
2. Tarakanov V.Ye., Aigner M.A. Kombinatornaya teoriya. – М.: Mir, 1982. 362 s. [Tarakanov V.E., Aigner M.A. Combinatorial Theory - М.: Mir, 1982. 362 p. (In Russ.)]
3. Gnedenko B.V., Zhurbenko I.G. Teoriya veroyatnostey i kombinatorika // Matematika v shkole. 2007. №6. S. 49 – 58. [Gnedenko B.V., Zhurbenko I.G. Probability Theory and Combinatorics // Mathematics at School. 2007. No. 6. pp. 49 - 58. (In Russ.)]
4. Yezhov I.I., Skorokhod A.V., Yadrenko M.I. Elementy kombinatoriki. –М.: Nauka. 1977. 80 s. [Yezhov I.I., Skorokhod A.V., Yadrenko M.I. Elements of combinatorics. –М.: Science. 1977. 80 p. (In Russ.)]
5. Kholl M. Kombinatorika / Pod red. A.O. Gel'fanda, V.Ye. Tarakanova V.Ye. / Perevod s angliyskogo S.A. Shirokova. - М.: Mir, 1970. 424 s. [Hall M. Combinatorics / Ed. A.O. Gelfand, V.E. Tarakanova V.E. / Translation from English S.A. Shirokova. М.: Mir, 1970.442 p. (In Russ.)]
6. Stenli R. Perechislitel'naya kombinatorika. – М.: Mir, 1990. 440 s. [Stanley R. Enumeration combinatorics. М.: Mir, 1990.440 p. (In Russ.)]
7. Rybnikov K.A. Vvedeniye v kombinatornyy analiz. – М.: MGU, 1994. 308 s. [Rybnikov K.A. Introduction to combinatorial analysis. - М.: Moscow State University, 1994.308 p.(In Russ.)]
8. Skachkov V.N. Kombinatornyye metody diskretnoy matematiki. – М.: Nauka, 1977. 320 s. [Skachkov V.N. Combinatorial methods of discrete mathematics. М.: Nauka, 1977.320 p. (In Russ.)]
9. Leont'yev V.K. Izbrannyye zadachi kombinatornogo analiza. – М.: MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 179 s. [Leontiev V.K. Selected tasks of combinatorial analysis. М.: MSTU. N.E. Bauman, 2001.179 p. (In Russ.)]
10. Soboleva T.S., Chechkin A.V. Diskretnaya matematika. Universitetskiy uchebnik. – М.: Akademiya. 2006. 160 s. [Soboleva T.S., Chechkin A.V. Discrete Math. University textbook. - М.: Academy. 2006.160 p. (In Russ.)]
11. Volkova V.N., Denisov A.A. Teoriya sistem i sistemnyy analiz. – М.: Yurayt, 2015. 615s. [Volkova V.N., Denisov A.A. Theory of systems and systems analysis. М.: Yurayt, 2015.615p. (In Russ.)]
12. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics. Vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991.469 p.
13. Rybnikov K. A. Kombinatornyy analiz. Ocherki istorii. – М.: MGU, 1996. 124 s. [Rybnikov K. A. Combinatorial analysis. Essays on the story. М.: Moscow State University, 1996.124 p. (In Russ.)]
14. Andersen J.A. Discrete mathematics and combinatorics. / Per. from English М.: Williams, 2003.957 p.
15. Kadiyev I.P., Kadiyev P.A. Ob odnom klasse kombinatornykh konfiguratsiy. // Vestnik Dagestan-skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. № 4. S. 45 – 49 [Kadiyev I.P., Kadiyev P.A. On a class of combinatorial configurations. // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013. No. 4. pp. 45 - 49. (In Russ.)]
16. J. Clark, J. Kane Coding with error correction in digital communication systems. Per. from English S.I. Gelfanda.- М.: “Radio and Communications”, 1987. 390p.
17. Babash A.V., Shankin G.P. Kriptografiya. М.: Solon R, 2002.-511s. [Babash A.V., Shankin G.P. Cryptography. М.: Solon R, 2002. 511p.(In Russ.)]
18. Kadiyev I.P. Kadiyev P.A. Osnovy indeksnoy strukturizatsii nxn –kombinatornykh konfiguratsiy // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013.Т.45 №1, 2018г.- с.139-146 [Kadiyev I.P. Kadiyev P.A. Fundamentals of index structuring of nxn-combinatorial configurations // Bulletin of the Daghestan State Technical University. 2018.Т. 45 No. 1, pp. 139-146.(In Russ.)]
19. Kadiyev I.P., Melekhin V.B. Sistema indeksnoy strukturizatsii kombinatornykh konfiguratsiy metodom rekurrentnykh funktsional'nykh sootnosheniy. Pribory i sistemy: upravleniye, kontrol', diagnostika №2, 2019 s.– 43-47 [Kadiyev I.P., Melekhin V.B. The system of index structuring of combinatorial configurations by the method of recurrent functional relations. g. Devices and systems: management, control, diagnostic-stick. No. 2, 2019 pp. 43-47.(In Russ.)]

**Сведения об авторе:**

**Кадиев Исламудин Пашаевич** – ведущий специалист информационно-аналитического отдела Управления инспектирования кредитных организаций.

**Information about the author.**

**Islamudin P. Kadiev**– Leading specialist of the information and analytical department of the Inspectorate of Credit Organizations

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 15.02.2019.

**Принята в печать** 19.04.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

**Received** 15. 02. 2019.

**Accepted for publication** 19.04.2019.



**Для цитирования:** Лоскутов И.А. Нормирование сборочно-монтажных работ на предприятиях, разрабатывающих радиоэлектронное оборудование для АЭС. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 89-97. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-89-97

**For citation:** Loskutov I. A. Rationing assembly-mounting works at the developing electronic equipment for nuclear power plants. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 89-97. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-89-97

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК.658.531.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-89-97

### НОРМИРОВАНИЕ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АЭС

**Лоскутов И. А.**

Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»),  
107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,  
Политехнический колледж им. Н.Н. Годовикова,  
125130, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских, 19, Россия,  
МИРЭА - Российский технологический университет,  
119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, Россия,  
e-mail: faxvex@ya.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является моделирование сборочно-монтажных работ при создании оборудования для АЭС на основе радиоэлектроники **Метод.** Исследование основано на методах математического моделирования технологических процессов. **Результат.** В работе проводится структуризация знаний по теме сборки и монтажа радиоэлектронного оборудования для атомных электростанций. Описаны известные методы производства печатных плат. Поскольку нанесение паяльной пасты один из наиболее ответственных технологических приемов, то для минимизации возникновения дефектных отпечатков необходимо точно подобрать компоненты и изготовить соответствующий химический состав. Для модели системы «Вход-Выход» показаны параметры входного и возмущающего массива. **Вывод.** С учетом параметрических зависимостей и влияния усталости при последовательной работе, получено уравнение, позволяющее в первом приближении проводить нормировку сборочно-монтажных работ. В уравнении не учитывается навесной монтаж, т.к. данный технологический процесс рациональнее осуществлять во время непосредственной сборки оборудования или его компонентов.

**Ключевые слова:** моделирование, технологический процесс, нормирование, сборка, монтаж

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### RATIONING ASSEMBLY-MOUNTING WORKS AT THE DEVELOPING ELECTRONIC EQUIPMENT FOR NUCLEAR POWER PLANTS

**Ivan A. Loskutov**

*A.G. Iosifyana Space monitoring systems, information management and electromechanical complexes (JSC "Corporation" VNIEM"),  
30 Volnaya Str., p. 10, Moscow 107078, Russia,  
N.N. Godovikova Polytechnic College,  
19 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh Str., Moscow 125130, Russia,  
MIREA - Russian Technological University,  
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia,  
e-mail: faxvex@ya.ru*

**Abstract. Objectives** The aim of the study is to simulate assembly and installation work when creating equipment for nuclear power plants based on radio electronics **Method** The study is based on methods of mathematical modeling of technological processes. **Result** This work is the structuring of knowledge on the assembly and installation of electronic equipment for nuclear power plants. Known methods for the production of printed circuit boards are described. Since the application of solder paste is one of the most responsible technological methods, to minimize the occurrence of defective prints, it is necessary to precisely select the components and make the appropriate chemical composition. For the model of the "Entry-Exit" system, the parameters of the input and disturbing array are shown. **Conclusion** Taking into account the parametric dependences and the effect of fatigue during sequential operation, an equation is obtained that allows, as a first approximation, to normalize assembly and installation works. Mounted mounting is not taken into account in the equation, as This process is more rational to carry out during the direct assembly of equipment or its components.

**Keywords:** modeling, technological process, rationing, assembly, installation

**Введение.** Про этапы изготовления радиоэлектронной аппаратуры подробно описано в литературе [1-5]. При этом за основу берется жизненный цикл продукции, работы, носящие описательный характер, и главное не ставятся жесткие временные рамки. О необходимости нормирования этапов сборочно-монтажных работ информации крайне мало, особенно когда речь заходит о продукции, произведенной для атомной промышленности. Ранее уже проводились исследования по созданию математической модели сборочных работ каркаса силового и управляющего шкафов [6-10]. Также были показаны особенности производства оборудования для АЭС [11] и дана краткая характеристика процесса работы по созданию радиоэлектроники [12].

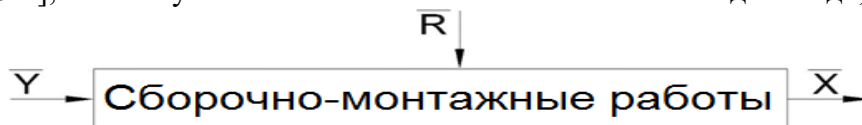
В [12] показано, что наиболее оправдана ручная сборка компонентов радиоэлектронного оборудования для АЭС. Разумно предположить, что технологический процесс будет осуществляться на одном рабочем месте в полном объеме, однако это не совсем верно. Во-первых, как правило, на производствах все еще существует жесткое разделение рабочих по критериям сборщик и монтажник, хотя в подобных работах это неоправданно. Во-вторых, существует ряд изделий, которые устанавливаются напрямую на нестандартные панели путем навесного монтажа. Такое, например, встречается в шкафах, обеспечивающих дополнительное или резервное питание при сбоях.

**Постановка задачи.** Нами установлено, что в большинстве случаев применяются первое и второе поколение оборудования. Третье поколение зачастую изготавливать неоправданно, во-первых, из-за высоких требований к получаемым на выходе изделиям (в отличие от второго поколения, сопротивление на дорожках сложнее проверить при изготовлении и увеличивается число брака), во-вторых – проблемы с оборудованием на предприятиях, несущих угрозу огромному количеству населения и природе необходимо решать в кратчайшие сроки. Хотя

имеются дополнительные контуры, обеспечивающие безопасность, перепайка платы, сделанной путем комбинации радиоэлементов в свободном доступе, значительно упрощает аварийные работы, поскольку уменьшается время эксплуатации на дополнительных средствах обеспечения, в редких случаях даже, требующих отключения реактора.

**Методы исследования.** На основании полученных выводов математически опишем работы по созданию оборудования для АЭС на основе радиоэлектроники. Заметим, что в уравнении не будет учитываться навесной монтаж, т.к. данный технологический процесс рациональнее осуществлять во время непосредственной сборки шкафа или его компонентов.

Операции сборочно-монтажного цикла работ покажем, основываясь на правилах, описанных в [13, с.3-4], используя классическое описание системы «Вход-выход», рис.1.



**Рис.1. Сборка и монтаж радиоэлектроники**

**Fig. 1. Assembly and installation of radio electronics**

Для этого разделим процесс на массивы входных параметров " $Y_2$ " и параметров возмущения " $R_2$ ".

Входными параметрами " $Y_2$ " являются:

- 1) Формирование печатной платы

Как правило, данный этап отсутствует, поскольку зачастую печатную плату уже в подготовленном состоянии доставляют рабочему. Сама плата в этом случае изготавливается на смежном предприятии-изготовителе. Однако в некоторых случаях, при использовании полного цикла сборочно-монтажных работ, данную операцию необходимо учитывать. Обозначим ее " $A_2$ ".

Опустим пояснения по поводу требований к выходным характеристическим параметрам печатных плат и конструктивным особенностям. Подробнее о них написано в [14-16] и т.п.

Отметим, что во время изготовления печатных плат, возможны дефекты, которые можно исправить с помощью ремонта. В этом случае предприятия пользуются [17].

Об изготовлении печатных плат при помощи часто применяемых методов подробно написано в [18, с.12-19]. Действительно, на практике передовых предприятий применяются описанные методы. Протицируем их: [12-15]

- Комбинированный позитивный метод (Субстраганат)
  - A. Сверление и очистка отверстий
  - B. Создание проводимости, удаление солей
  - C. Нанесение фоторезиста
  - D. Металлизация рисунка
  - E. Нанесение металлорезиста
  - F. Снятие фоторезиста
  - G. Травление рисунка схемы
  - H. Нанесение паяльной маски
  - I. Облуживание монтажных поверхностей
- Тентинг-метод
  - A. Сверление и очистка отверстий
  - B. Создание проводимости, удаление солей
  - C. Общая металлизация поверхности
  - D. Нанесение фоторезистивной маски
  - E. Травление меди на незащищенных фоторезистом участке
  - F. Удаление фоторезиста
  - G. Нанесение паяльной маски
  - H. Облуживание монтажных поверхностей

- Электрохимический (полуаддитивный) метод
  - А. Сверление и очистка
  - В. Создание проводимости
  - С. Общая гальваническая металлизация поверхности
  - Д. Нанесение фоторезиста на пробельные участки
  - Е. Гальваническая металлизация рисунка
  - Ф. Снятие фоторезиста
  - Г. Дифференциальное травление рисунка проводников

Видно, что первые два этапа совпадают во всех методах, обозначим их  $A_{12}$  и  $A_{22}$  соответственно. Остальные этапы обозначим  $A_{\alpha}^{\beta}$ , где  $\alpha$  – порядковый номер этапа метода  $\beta \in \{1 \dots 3\}$ , т.е. цикл поиска затраченного времени на работы по созданию печатной платы будет описываться следующим уравнением:

$$A_2 = \sum_{i=1}^2 t_{\text{раб} - A_i} + \sum_{j=3}^{\beta} t_{\text{раб} - A_j} \quad (1)$$

где:

- $t_{\text{раб} - A_i}$ ,  $t_{\text{раб} - A_j}$  – время работы соответствующего этапа создания печатной платы

Обратим внимание, что уравнение учитывает работу с одной поверхностью, т.е. оно описывает создание односторонней печатной платы. В случае с двусторонней или многослойной платой получим:

$$A_2 = \sum_{i=1}^2 t_{\text{раб} - A_i} + n \sum_{j=3}^{\beta} t_{\text{раб} - A_j} \quad (2)$$

где:

- $n$  – количество обрабатываемых сторон

Отметим, что первая часть уравнения не изменилось. Связано это с тем, что заготовка всегда будет сверлиться по принципу «Обработать совместно» в соответствии с [19]. Процесс создания проводимости для всех слоев происходит одновременно.

2) Проверка печатной платы на паяемость в соответствии с [14]. Данный этап проводится обязательно вне зависимости от того сразу ли печатная плата была поставлена на сборочно-монтажный участок или находилась на хранении. Обозначим ее “В<sub>2</sub>”

3) Маркировка печатной платы и гнезд под радиоэлектронные элементы “С<sub>2</sub>”

4) Повторная проверка печатных плат на паяемость в областях, лежащих близ зон маркировок “D<sub>2</sub>”

5) Проверка работоспособности устанавливаемых компонентов на наличие внутренних дефектов и соответствию паспортным данным “Е<sub>2</sub>”

6) Проверка типа металлического покрытия изделий под пайку “F<sub>2</sub>”

Поскольку преимущественно применяются импортные радиоэлементы, вследствие некоторых расхождений стандартов и возможности использования материалов, не содержащих свинца, данное исследование поможет выявить необходимую температуру нагрева припоя или его продолжительность.

7) Приготовление необходимого состава паяльной пасты “G<sub>2</sub>”

Поскольку нанесение паяльной пасты один из наиболее ответственных технологических приемов, то для минимизации возникновения дефектных отпечатков необходимо точно подобрать компоненты и изготовить соответствующий химический состав.

8) Разделение радиоэлектронных элементов по категориям “H<sub>2</sub>” на:

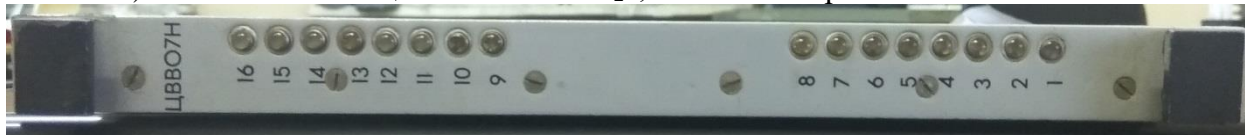
- А. Поверхностно монтируемое изделие

В. Изделие электронной техники

С. Изделие электротехники

Данная классификация необходима для определения порядка установки изделий на печатную плату. В соответствии с [20-24] изначально устанавливаются поверхностно монтируемые изделия, а только потом более точные

- 9) Пайка радиоэлектронных компонентов “I<sub>2</sub>”
- 10) Очистка полученной на предыдущих этапах заготовки “J<sub>2</sub>”
- 11) Покрытие лаком “K<sub>2</sub>”
- 12) Установка лицевой панели “M<sub>2</sub>”, показано на рис.2



**Рис.2. Лицевая панель**

**Fig. 2. Front panel**

- 13) Установка соединителя “N<sub>2</sub>”, показан на рис.3



**Рис.3. Соединитель**

**Fig. 3. Connector**

- 14) Установка соединителей между печатной платой и лицевой панелью “O<sub>2</sub>”, отображено на рис.4



**Рис.4. Соединение лицевой панели и печатной платы**

**Fig. 4. Front panel and PCB connection**

- 15) Регулировка и стопорение резьбовых соединений “P<sub>2</sub>”
- 16) Покрытие мест установки 12-15 дополнительным слоем лака “S<sub>2</sub>”
- 17) Прозвон платы “U<sub>2</sub>”
- 18) Контроль “V<sub>2</sub>”
- 19) Испытания “W<sub>2</sub>”

Возмущающими параметрами “R<sub>2</sub>” являются:

- 1) Выполнение другой, более важной на данный момент работы “ $\frac{A}{2}$ ”
- 2) Потребности человека (физиологические, психологические) “ $\frac{B}{2}$ ”
- 3) Ошибки “ $\frac{C}{2}$ ”
  - 3.1) Простой из-за недодачи устанавливаемых компонентов “ $\frac{C1}{2}$ ”
  - 3.2) Потеря крепежного материала “ $\frac{C2}{2}$ ”
  - 3.3) Прочие “ $\frac{C3}{2}$ ”

4) Усталость рабочего “ $D_2$ ”

5) Прочее “ $E_2$ ”

**Обсуждение результатов.** На основании рис.1. выходным параметром будет являться готовое изделие “ $X_2$ ”. Составим параметрические уравнения:

$$\bar{Y}_2 = \begin{Bmatrix} A1_2(t) \\ \dots \\ A\alpha_2^\beta(t) \\ B_2(t) \\ C_2(t) \\ D_2(t) \\ E_2(t) \\ F_2(t) \\ G_2(t) \\ H_2(t) \\ I_2(t) \\ J_2(t) \\ K_2(t) \\ M_2(t) \\ N_2(t) \\ O_2(t) \\ P_2(t) \\ S_2(t) \\ U_2(t) \\ V_2(t) \\ W_2(t) \end{Bmatrix}, \bar{R}_2 = \begin{Bmatrix} A_2'(t) \\ B_2'(t) \\ C1_2'(t) \\ C2_2'(t) \\ C3_2'(t) \\ D_2'(t) \\ E_2'(t) \end{Bmatrix}, \bar{X}_2 = X_2(t) \quad (3)$$

Поскольку в раскрытом варианте уравнение временных затрат будет весьма громоздким, «свернем» его. При учете возможных ошибок  $C_2$  уравнение изменится. Конечный результат будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} k = \sum_{l=1}^{18+\alpha} x_l + 2C_2 \\ \bar{X}_2 = \sum_{l=1}^{18+\alpha} \sum_{v=k}^{\beta} t_l \prod_{\mu=1}^l L_l^{k-v} + \sum_{l=19+\alpha}^{22+\alpha} \sum_{\delta=\zeta}^{\beta} t_l \prod_{\xi=19+\alpha}^l L_l^{\zeta-\delta} \prod_{\psi=1}^{18+\alpha} L_l^{x_\psi - v} \end{cases} \quad (4)$$

где:

- $x_l$  – количество операций работы с элементом из массива “Y”
- $C_2$  – количество ошибок, возникающих при работе с элементом массива “Y”
- $t_l$  – время работы  $l$ -го элемента массива Y или R
- $\prod_{\mu=1}^l L_l^{k-v}$  – учет накопления усталости при операции с элементом из массива “Y”
- $\zeta_l$  – количество операций работы с элементом из массива “R”

- $\prod_{\beta=19+\alpha}^l L_{\beta}^{\zeta_l - \delta}$  – учет накопления усталости при операции с элементом из массива “R”
- $\prod_{\psi=1}^{18+\alpha} L_{\psi}^{\beta x - \nu}$  – учет накопленной усталости после завершения массива “Y”

**Вывод.** Выведено уравнение сборочно-монтажных работ на предприятиях, занимающихся разработкой радиоэлектронного оборудования для АЭС в первом приближении. Однако полученный результат не окончательный. Данная модель требует дальнейшей доработки с целью получения более точного результата. Необходимо, например, учесть временные параметры сборочно-монтажных работ и возможности остановки работы вследствие необходимости локальной доработки изделия.

#### Библиографический список:

- Валетов В.А. Основы производства радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Валетов – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007, 112с.
- Короткова Е.И. Основы конструирования и технологии производства РЭС / Е.И. Короткова – Ярославль, ЯрГУ, 2013, 192с.
- Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А.М. Медведев – М.: Техносфера, 2005, 302с.
- Тупик В.А. Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005, 147с.
- Hanke H.-J., Fabian H. Technologie elektronischer Baugruppen / H.-J. Hanke, H. Fabian – Berlin: Verlag Technik, 1975, 542р.
- Лоскутов И. А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудование на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС // Журнал исследований по управлению. 2018. №.6. С.29-42. URL:<https://naukaru.ru/ru/nauka/article/21002/view>
- Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Второе приближение / И.А. Лоскутов // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.2. с.12-19 URL: <https://yadi.sk/i/amUic6FU3Yi363>
- Лоскутов И.А. Определение нормированного времени сборки устройств для АЭС с учетом временных особенностей рабочих смен / И.А. Лоскутов // Журнал исследований по управлению. 2018. №.8. С.24-32. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/22688/view>
- Лоскутов И.А. Учет обнуления усталости в уравнении нормирования времени сборки каркаса оборудования для АЭС / И.А. Лоскутов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. / под.ред. С.У. Увайсова – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018, с.445-450
- Лоскутов И.А. Выбор типа управления на производстве, занимающегося разработкой оборудования в области мирного атома / И.А. Лоскутов // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.3. с.18-26 URL: [kemripk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemripk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf)
- Loskutov I.A. Causes for protracted production of equipment for nuclear power plants / I.A. Loskutov // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference – Prague, 2018, p. 392-396
- Лоскутов И.А. Особенности сборки радиоэлектронного оборудования на предприятиях, работающих в атомной сфере / И.А. Лоскутов // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.3. с.26-31 URL: [kemripk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemripk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf)
- Trentelman H.L., Stoorvogel A.A., Malo H. Control theory for linear systems / H.L. Trentelman, A.A. Stoorvogel, H. Malo – Berlin, Springer, ISBN 978-1-4471-0339-4, 2001, 389р.
- ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия (с Изменениями N1-5)
- ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции
- ОСТ 11 073.062-2001. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Требования и методы защиты от статического электричества при разработке и применении
- ГОСТ Р 55491-2013. Платы печатные Правила восстановления и ремонта
- Крылов В.П. Технологии и подготовка производства печатных плат. Учебное пособие / В.П. Крылов – Владимир: ВлГУ, 2006, 64с.
- ГОСТ 2.109-73. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Основные требования к чертежам
- СТО ОАЮ.624.002-2007. Система менеджмента качества. Сборочные единицы радиоэлектронной аппаратуры с применением изделий электронной техники, монтируемых на поверхность печатных плат // ФГУП НИИЭМ, Истра, 4.05.2007, 43с.
- ОСТ 45.010.030-92. Электронные модули первого уровня РЭС. Установка изделий электронной техники на печатные платы. Технические требования. Конструкция и размеры
- ОСТ 16 0.684.032-92. Монтаж электрический внутренних электротехнических изделий. Общие технические требования

23. ОСТ 4Г 0.054.267 Аппаратура радиоэлектронная. Сборочно-монтажное производство. Пайка электромонтажных соединений. Типовые технологические операции. (Ред.1-80)
24. ОСТ 11 073.062-2001. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Требования и методы защиты от статического электричества при разработке, производстве и применении

#### References:

1. Valetov V.A. Osnovy proizvodstva radioelektronnoy apparatury / V.A. Valetov – SPb.: SPbGU ITMO, 2007, 112s. [Valetov V.A. Bases of production of the radio-electronic equipment / V.A. Valetov– SPb.: SPbSU ITMO, 2007, 112p. (In Russ)]
2. Korotkova Ye.I. Osnovy konstruirovaniya i tekhnologii proizvodstva RES / Ye.I. Korotkova – Yaroslavl', YarGU, 2013, 192s. [Korotkova E.I. design principles and technologies for the production of RES / E.I. Korotkova – Yaroslavl', Yaroslavl state University, 2013, 192p. (In Russ)]
3. Medvedev A.M. Pечатnye platy. Konstruktsii i materialy / A.M. Medvedev – M.: Tekhnosfera, 2005, 302s. [Medvedev A.M. of the PCB. Designs and materials / A.M. Medvedev – M.: Technosphere, 2005, 302p. (In Russ)]
4. Tupik V.A. Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva radioelektronnoy apparatury – SPb.: SPbGETU «LETI», 2005, 147s. [Tupik V.A. Technology and organization of production of electronic equipment / V.A. Tupik – SPb.: SPbGETU "LETI", 2005, 147p. (In Russ)]
5. Hanke H.-J., Fabian H. Technologie elektronischer Baugruppen / H.-J. Hanke, H. Fabian – Berlin: Verlag Technik, 1975, 542p.
6. Loskutov I. A. Opredeleniye normy rabocheho vremeni sborki karkasa silovogo i / ili upravlyayushchego, vlyuchaya radioelektronnoye oborudovaniye na predpriyatiyakh, zanimayushchikhsya razrabotkoy izdeliy dlya AES // Zhurnal issledovaniy po upravleniyu. 2018. №.6. S.29-42. URL:<https://naukaru.ru/ru/nauka/article/21002/view> [Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs / I.A. Loskutov // Journal of Management Studies. 2018. no.6. pp. 29-42. URL:<https://naukaru.ru/en/nauka/article/21002/view> (In Russ)]
7. Loskutov I.A. Opredeleniye normy rabocheho vremeni sborki karkasa silovogo i / ili upravlyayushchego, vlyuchaya radioelektronnoye oborudovaniye na predpriyatiyakh, zanimayushchikhsya razrabotkoy izdeliy dlya AES. Vtoroye priblizheniye / I.A. Loskutov // Vestnik KemRIPK – Kemerovo, 2018, T.2. s.12-19 URL: <https://yadi.sk/i/amUic6FU3Yi363> [Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs. second approximation / I.A. Loskutov // Bulletin of KemRIPK – Kemerovo, 2018, V.2. p.12-19 URL: <https://yadi.sk/i/amUic6FU3Yi363> (In Russ)]
8. Loskutov I. A. Opredeleniye normirovannogo vremeni sborki ustroystv dlya AES s uchetoм vremennykh osobennostey rabochikh smen / I.A. Loskutov // Zhurnal issledovaniy po upravleniyu. 2018. №.8. S.24-32. URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/22688/view> [Loskutov I.A. Determination of the normalized assembly time for devices for NPPs, taking into account the temporary features of work shifts / I.A. Loskutov // Journal of Management Studies . 2018. no. 8. pp. 24-32. URL: <https://naukaru.ru/en/nauka/article/22688/view> (In Russ)]
9. Loskutov I.A. Uchet obnuleniya ustalosti v uravnenii normirovaniya vremeni sborki kar-kasa oborudovaniya dlya AES / I.A. Loskutov // Innovatsionnyye, informatsionnyye i kommunikatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. / pod.red. S.U. Uvay-sova – M.: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2018, c.445-450 [Loskutov I.A. Accounting of zero fatigue in the equation of normalizing the time of Assembly of the frame of equipment for nuclear power plants / I.A. Loskutov // Innovative, information and communication technologies: proceedings of the XV International scientific and practical conference. / under edited by S.W. Uvaisov – M.: Association of alumni and staff vvvia im. prof. Zhukovsky, 2018, c.445-450 (In Russ)]
10. Loskutov I.A. Vybor tipa upravleniya na proizvodstve, zanimayushchegosya razrabotkoy obo-rudovaniya v oblasti mirnogo atoma / I.A. Loskutov // Vestnik KemRIPK – Kemerovo, 2018, T.3. s.18-26 URL: [kemriprk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemriprk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf). [Loskutov I.A. Selection of management type on production developed by the development of equipment for a peaceful AT-OM / I.A. Loskutov // Bulletin of KemRIPK – Kemerovo, 2018, vol.3. p. 18-26 URL: [kemriprk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemriprk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf) (In Russ)]
11. Loskutov I.A. Causes for produced production of equipment for nuclear power plants / I.A. Loskutov // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference – Prague, 2018, p. 11. 392-396
12. Loskutov I.A. Osobennosti sborki radioelektronnoy oborudovaniya na predpriyatiyakh, ra-botayushchikh v atomnoy sfere / I.A. Loskutov // Vestnik KemRIPK – Kemerovo, 2018, T.3. s.26-31 URL: [kemriprk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemriprk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf) [Loskutov I.A. Peculiarities of assembly of radioelectronic equipment at the enterprises working in the nuclear sector / I.A. Loskutov // Bulletin of KemRIPK – Kemerovo, 2018, vol.3. p. 26-31 URL: [kemriprk.ru/f/vestnik\\_2018\\_3.pdf](http://kemriprk.ru/f/vestnik_2018_3.pdf) (In Russ)]
13. Trentelman H. L., Stoorvogel A. A., Malo H. Control theory for linear systems / H.L. Trentelman, A.A. Stoorvogel, H. Malo – Berlin, Springer, ISBN 978-1-4471-0339-4, 2001, 389p.
14. GOST 23752-79. Platy pechatnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya (s Izmeneniyami N1-5) [GOST 23752-79. Printed circuit boards. General specifications (as Amended by N1-5) (In Russ)]
15. GOST R 53429-2009. Platy pechatnyye. Osnovnyye parametry konstruktsii [GOST R 53429-2009. Printed circuit boards. Basic parameters of structure(In Russ)]
16. OST 11 073.062-2001. Mikroskhemy integral'nyye i pribory poluprovodnikovyye. Trebova-niya i metody zashchity ot staticheskogo elektrichestva pri razrabotke i primenenii [OST 11 073.062-2001. Integrated circuits and semiconductor devices. Requirements and methods of protection against static electricity in the development and application(In Russ)]
17. GOST R 55491-2013. Platy pechatnyye Pravila vosstanovleniya i remonta [GOST R 55491-2013. Printed circuit boards. Re-work, modification and repair of electronic assemblies. (In Russ)]



18. Krylov V.P. Tekhnologii i podgotovka proizvodstva pechatnykh plat. Uchebnoye posobiye / V.P. Krylov – Vladimir: VIGU, 2006, 64s. [Krylov V.P. of Technology and preparation for the production of printed circuit boards. Tutorial / V.P. Krylov – Vladimir: Vladimir state University, 2006, 64p. (In Russ)]
19. GOST 2.109-73. Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (YESKD). Osnovnyye trebovaniya k chertezham [GOST 2.109-73. Unified system for design documentation. Basic requirements for drawings(In Russ)]
20. STO OAYU.624.002-2007. Sistema menedzhmenta kachestva. Sborochnyye yedinitsey radioelektronnnoy apparatury s primeniyem izdeliy elektronnoy tekhniki, montiruyemykh na poverkhnost' pechatnykh plat // FGUP NIIEM, Istra, 4.05.2007, 43s. [STO OAU.624.002-2007. Quality management system. Assembly units of electronic equipment with the use of electronic products mounted on the surface of printed circuit boards // FSUE NIIEM, Istra, 4.05.2007, 43p. (In Russ)]
21. OST 45.010.030-92. Elektronnyye moduli pervogo urovnya RES. Ustanovka izdeliy elek-tronnoy tekhniki na pechatnyye platy. Tekhnicheskiye trebovaniya. Konstruktsiya i razmery [OST 45.010.030-92. Electronic modules of the first level of RES. Installation of electronic products on printed circuit boards. Specifications. Design and dimensions(In Russ)]
22. OST 16 0.684.032-92. Montazh elektricheskikh vnutrenniy elektrotekhnicheskikh izdeliy. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [OST 16 0.684.032-92. Installation of electrical internal electrical products. General technical requirements(In Russ)]
23. OST 4G 0.054.267 Apparatura radioelektronnaya. Sborочно-монтажное производство. Payka elektromontazhnykh soyedineniy. Tipovyye tekhnologicheskkiye operatsii. (Red.1-80) [OST 4G 0.054.267 radio-electronic Equipment. Assembly and Assembly production. Soldering of electrical connections. Typical technological operations. (Ed.1-80) (In Russ)]
24. OST 11 073.062-2001. Mikroskhemy integral'nyye i pribory poluprovodnikovyye. Trebovaniya i metody zashchity ot staticheskogo elektrichestva pri razrabotke, proizvodstve i primenении. [OST 11 073.062-2001. Integrated circuits and semiconductor devices. Requirements and methods of protection against static electricity in the development, production and application(In Russ)]

**Сведения об авторе:**

**Лоскутов Иван Андреевич** - аспирант МИРЭА, инженер-конструктор «ВНИИЭМ», преподаватель колледжа.

**Information about the author.**

**Ivan A. Loskutov** - graduate student of MIREA, design engineer "VNIIEМ", a teacher of colleges.

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 06.05.2019.

**Принята в печать** 29.06.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

**Received** 06.05.2019.

**Accepted for publication** 29.06.2019.

**Для цитирования:** Магомедова М.Р. Расчетная модель движения твердых частиц в природных турбулентных потоках. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 98-107. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

**For citation:** Magomedova M.R. Calculation model of solid particles motion in natural turbulent flows. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 98-107. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**УДК 556.536:631.4**

**DOI:** 10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРИРОДНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

**Магомедова М.Р.**

Дагестанский государственный технический университет,  
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,  
e-mail: n-guseinova@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является совершенствование модели движения твердых частиц в природных турбулентных потоках. **Методы.** Совершенствование знаний о структуре водных потоков и характере русловых процессов привело к развитию взглядов на движение наносов, как на стохастический процесс, обусловленный случайным характером вызывающих его факторов: природно-климатическими и гидрологическими условиями, изменчивостью физико-механических свойств грунтов, турбулентностью водных потоков. В связи с этим при построении модели движения наносов использовались методы теории вероятностей и теории случайных процессов. **Результат.** На основе выполненных исследований разработана математическая модель переформирования естественных русел неустановившимся потоком, обеспечивающая более полный, по сравнению с существующими отечественными и зарубежными аналогами, учет факторов, влияющих на расход руслоформирующих наносов. Анализ математических моделей движения твердых частиц в водном потоке показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса (скачков) придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений и вихревых образований, с использованием математического аппарата. **Вывод.** Расчетная модель движения твердых частиц реализована на алгоритмическом языке Fortran Power Station и апробирована на материалах натурных и экспериментальных исследований в широком диапазоне гидравлических характеристик течения и физико-механических характеристик русловых грунтов.

**Ключевые слова:** турбулентный поток, руслоформирующие наносы, взвешенные наносы, донные наносы, скорость потока, расход наносов, математическая модель

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### CALCULATION MODEL OF SOLID PARTICLES MOTION IN NATURAL TURBULENT FLOWS

**Milada R. Magomedova**

Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026,  
e-mail: n-guseinova@mail.ru

**Abstract. Objectives** Improving the model of movement of solid particles in natural turbulent flows. **Method** The improvement of knowledge about the structure of water flows and the nature of channel processes has led to the development of views on sediment movement as a stochastic process due to the random nature of the factors causing it: natural-climatic and hydrological conditions, variability of the physical and mechanical properties of soils, and turbulence of water streams. In this regard, the methods of probability theory and the theory of random processes were used to construct the model of sediment movement. **Result** Based on the studies, a mathematical model of the reformation of natural channels was established by an unsteady flow, which provides a more complete, in comparison with existing domestic and foreign counterparts, consideration of factors affecting the flow of channel-forming sediments. The analysis of mathematical models of the movement of solid particles in the water stream showed that the physical nature of the transport of channel-forming sediments is more consistent with the model based on the parameters of the trajectories of solid particles, namely, lengths, heights and transport time (jumps) of bottom and suspended sediments and their concentration in the stream. Such a model is implemented by integrating averaged equations and vortex formations using a mathematical apparatus. **Conclusion** The calculated model of the movement of solid particles is implemented in the algorithmic language Fortran Power Station and tested on the basis of field and experimental studies in a wide range of hydraulic flow characteristics and physical and mechanical characteristics of channel soils.

**Keywords:** turbulent flow, channel-forming sediment, suspended sediment, bottom sediment, flow rate, sediment flow rate, mathematical model

**Введение.** Вследствие сложного пространственно-временного характера аккумулятивных процессов в открытых потоках проблема их прогнозирования требует разработки и апробации математических моделей отдельных этапов этих процессов. При этом одними из главных задач являются полный учет всех факторов, влияющих на транспортировку руслоформирующих наносов, выявление взаимных связей между ними, более глубокое раскрытие физической сущности механизма взаимодействия потока и русла, определение статистических характеристик физико-механических свойств грунтов и турбулентности водных потоков. Отсутствие обобщающих исследований, которые объединяли бы разрозненные данные различных экспериментов, затрудняет возможность учета количественного ряда характеристик турбулентности при теоретическом анализе русловых процессов. Поэтому неизбежна схематизация изучаемых явлений, заключающаяся в выделении и учете только главных, преобладающих факторов, о которых можно судить с большей или меньшей достоверностью. Таким главным фактором в процессах взаимодействия потока и русла, по исследованиям многих ученых, является крупномасштабная турбулентность.

Задача повышения надежности расчетов движения наносов требует учета таких характеристик крупномасштабной турбулентности, как средние квадратические отклонения, корреляционные и спектральные функции, частоты пульсаций эйлеровой и лагранжевой составляющих скорости потока, а также масштабы вихревых образований.

Для анализа процесса движения наносов, необходимо определение статистических характеристик турбулентности. Мгновенные скорости течения подчиняются нормальному закону распределения [1, 2]:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left[-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma_u^2}\right]; \quad (1)$$

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{(v)^2}{2\sigma_v^2}\right], \quad (2)$$

где  $f(u)$  и  $f(v)$  – одномерные плотности распределения горизонтальной  $u(t)$  и вертикальной  $v(t)$  составляющих мгновенной скорости;  $\sigma_u = \sqrt{(u')^2}$  и  $\sigma_v = \sqrt{(v')^2}$  – средние квадратические отклонения этих составляющих;  $u' = u - \bar{u}$ ,  $v' = v$  – пульсационные скорости.

Для расчета расхода наносов необходимо знать структуру, размер, частоту и длительность крупномасштабных турбулентных вихревых образований в потоке.

Распределение максимальных значений мгновенной скорости течения описывается законом Релея [1]:

$$f_m(u_m) = \frac{u_m - \bar{u}}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(u_m - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right], \quad u_m > \bar{u}. \quad (3)$$

где  $\bar{u}$  – осредненная во времени местная скорость,  $u_m$  – максимальное значение продольной составляющей скорости.

С учетом закона Релея, выражение для математического ожидания максимальных значений продольной составляющей донной скорости течения, определяемое по формуле [1]:

$$\bar{u}_m = \int_0^{\infty} u_m \cdot f_m(u_m) du_m, \quad (4)$$

принимает вид:

$$\bar{u}_{\Delta m} = \bar{u} + \sqrt{\pi/2} \sigma_{u_{\Delta}}; \quad (5)$$

Аналогично, выражение математического ожидания максимальных значений вертикальной составляющей скорости в придонной области имеет вид:

$$v_m = \sqrt{\pi/2} \sigma_v, \quad (6)$$

где  $\sigma_{u_{\Delta}}$  и  $\sigma_v$  – соответственно средние квадратические отклонения продольной и вертикальной составляющих донной скорости, согласно экспериментальным данным равные:

$$\sigma_{u_{\Delta}} = 0,33\bar{u}_{\Delta}, \quad \sigma_v = 0,15\bar{u}_{\Delta}. \quad (7)$$

На концентрацию донных и взвешенных наносов наибольшее воздействие оказывают гидравлические сопротивления.

Несмотря на многолетний период исследований, проблема еще далека от окончательного решения. В качестве гряд многие ученые в своих исследованиях рассматривают те наибольшие формирования, которые сползают по поверхности побочной, или максимальные формирования, соизмеримые с шириной русла водотока при беспобочневом русле, т.е. в подходах авторов исключается влияние иерархии гряд на гидравлические сопротивления [13]. Учитывать все многообразие влияющих на расход руслоформирующих наносов факторов практически невозможно, поэтому в существующих методах расчета ограничиваются основными параметрами.

**Постановка задачи.** Оценку деформаций русел, определение руслоформирующих наносов в лабораторной практике в настоящее время выполняют преимущественно по результатам исследований на жестких гидравлических моделях. Очевидно, что эти оценки выполняются косвенным путем: на модели детально изучается скоростное поле потока, результаты пересчи-

тываются на натуру и далее анализируются в совокупности со сведениями о натуральных грунтах на данном участке реки. На основании такого анализа формулируется вывод о возможных размывах, аккумуляции или транзитном транспорте наносов на исследуемом участке реки. В ряде случаев оцениваются геометрические и динамические характеристики русловых форм [3].

В природных условиях размеры и форма русла, подвижность наносов, характеристики русловых форм, темпы плановых и глубинных деформаций являются результатом динамического взаимодействия потока и размываемого русла, сложенного из различных смесей наносов [4, 5].

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных тщательному изучению структуры потока с использованием современных приборов и математических методов. В то же время материалы, посвященные исследованию состава наносов очень скудны. До сих пор во многих случаях в качестве расчетного диаметра принимают средний диаметр смеси, что является одной из основных ошибок в расчетах транспорта наносов и русловых деформаций.

Известно, что русло водотоков сложено из различных типов разнородных песков и гравелисто-галечных материалов, движение которых по дну происходит преимущественно в грядовой форме. В существующих работах влияние неоднородности состава наносов на формирование гряд, их геометрические и динамические характеристики, а также гидравлические сопротивления потока не изучались.

Структурная форма перемещения наносов оказывается основной формой транспорта руслоформирующих наносов. Вместе с тем, это очевидное положение в существующих методах расчета характеристик транспорта наносов в реках, включая такую характеристику как расход наносов, до сих пор не получило доминирующего распространения и должного практического использования [4, 5, 7].

Также недостатком большинства распространенных за рубежом чисто стохастических моделей срыва и транспорта наносов - необходимость введения эмпирических параметров. В последнее время в ряде отечественных работ намечается синтез детерминистического и вероятностного подхода к рассматриваемой проблеме, который представляется наиболее перспективным, так как при этом учитывается как стохастический характер взаимодействия потока и русла, так и физическая природа этого взаимодействия [6].

**Методы исследования.** В основе методики расчета расхода руслоформирующих наносов турбулентным русловым потоком лежит представление о том, что срыв и перенос твердых частиц осуществляется вихревыми образованиями, амплитудные и частотные характеристики которых наряду с гранулометрическим составом русловых отложений определяют вид перемещения наносов и его количественные закономерности [7, 8].

Сложная структура турбулентных течений определяет случайный характер пространственно-временных гидродинамических полей скорости, давления, примесей. Для анализа транспорта наносов необходимы сведения о величине и распределении по сечению потока следующих статистических характеристик турбулентности: осредненных местных скоростей, средних квадратических отклонений составляющих мгновенных скоростей течения, корреляционных и спектральных характеристик пульсаций скорости.

Поэтому для определения параметров движения твердых частиц в турбулентном потоке рассматриваем стационарный случайный процесс, предполагая его непрерывным и дифференцируемым, так как физически реальные случайные процессы представляют собой непрерывные случайные функции времени.

Срыв и перенос твердых частиц в турбулентном потоке можно описать системой дифференциальных уравнений [1]:

$$m_y \frac{du_y}{dt} = W_x - F_{mp}, \quad (8)$$

$$m_y \frac{d\vartheta_y}{dt} = (\overline{P - G})_c \pm W_y, \quad (9)$$

где  $m_s$  - эффективная масса частицы с учетом присоединенных масс жидкости,  $m_s = \frac{\rho_s \pi d^3}{6}$ ,  
 $\rho_s = \rho_z + 0,5\rho$ ;  $u_y$  и  $\vartheta_y$  - осредненные по совокупности срываемых однородных частиц горизонтальная и вертикальная составляющие скорости твердых частиц;  $(\overline{P-G})_c$  - осредненное в пределах срывающих возмущений значение разности между подъемной силой и весом частицы в воде;  $F_{mp}$  - сила трения, действующая на частицы грунта при качении и влечении по дну;  $W_x$  и  $W_y$  - осредненные по совокупности вихревых возмущений гидродинамические силы.

Пример реализации процесса  $P(t)$  длительностью  $t$  представлен на рис. 1.

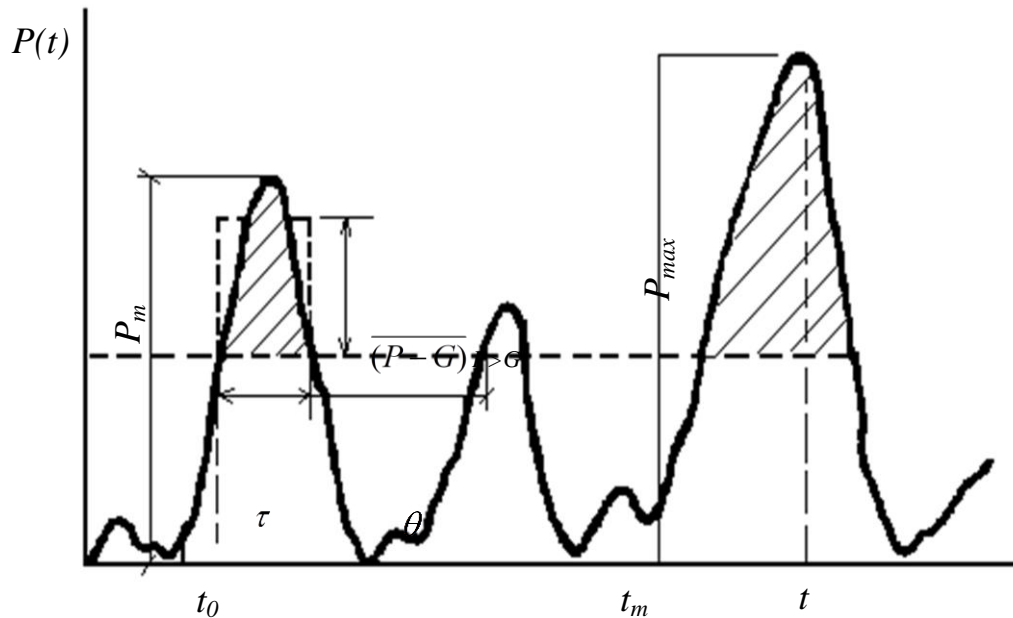


Рис.1 Пересечение траекторий случайного процесса  $P(t)$  критического уровня  $G$  [2]  
 Fig. 1 The intersection of the trajectory of a random process  $P(t)$  of the critical level  $G$  [2]

Статистические характеристики выбросов мгновенной подъемной силы за критический уровень определяется следующими характеристиками:

средняя высота выбросов за уровень  $G$

$$(\overline{P-G}) = S(G)/t(G) = \int_G^\infty (P-G)\psi(P)dP / \int_G^\infty \psi(P)dP \quad (10)$$

средняя частота выбросов

$$\nu(G) = N(G)/T = \int_0^\infty P\psi_2(G, P)dP \quad (11)$$

средняя длительность выбросов

$$\tau(G) = t(G)/N(G) = \int_0^\infty \psi(P)dP / \int_0^\infty P\psi_2(G, P)dP \quad (12)$$

площадь, ограниченная траекторией в пределах одного выброса

$$s(G) = S(G)/N(G) = (\overline{P-G})\tau(G) \quad (13)$$

средняя длительность пребывания случайной функции выше заданного уровня  $G$  в течении времени

$$t(G) = T \int_G^{\infty} \psi(P) dP \quad (14)$$

математическое ожидание площади, ограниченной траекторией случайной функции  $P(t) > G$  в течении времени  $T$  и заданным уровнем  $G$

$$S(G) = T \int_G^{\infty} (P - G) \psi(P) dP \quad (15)$$

среднее число положительных выбросов  $P(t)$  в течении времени  $T$

$$N(G) = T \int_0^{\infty} P \psi_2(G, P) dP \quad (16)$$

На основе методов теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов установлено состояние движения донных наносов в потоке, которое может определяться условиями [9, 10, 11]:

$$1.0 \leq u_{\Delta} / V_{\Delta n, \text{дон}} < 1.8 / \varphi, \quad (17)$$

$$\text{Вер.}(u(t) \geq u_{\Delta n}) = 0,001 u_{\Delta \text{max}} > u_{\Delta n}, \quad (18)$$

$$\frac{\bar{u}_{\Delta}}{V_{\Delta n, \text{дон}}} \geq 0,71, \quad (19)$$

где  $\varphi$  - параметр турбулентности поведения твердых частиц в воде,  $w$  - гидравлическая крупность частиц,  $V_{\Delta n, \text{дон}}$  - допускаемая неразмывающая скорость,  $u_{\Delta n}$  - актуальная неподвижная скорость.

Теоретическая зависимость для определения предельного расхода неоднородных по крупности наносов имеет вид [1, 2]:

$$q_T = \rho_s \frac{\pi d^3}{6} \mu V, \quad (20)$$

где  $\pi d^3/6$  – объем твердой частицы,  $\text{м}^3$ ,  $\mu_N$  – мутность потока,  $V = l/t$  – осредненная скорость транспортируемых частиц наносов;  $l$  и  $t$  – средние значения длины и длительности скачков.

Мутность потока  $\mu$  определяем по формуле:

$$\mu = A \frac{g^3}{g H \omega} \quad (21)$$

где  $g$  - средняя скорость потока,  $H$  – средняя глубина потока,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\omega$  - средняя гидравлическая крупность,  $A$  – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Для удельного расхода наносов формулу (12) преобразуют к виду [12]:

$$q_s = \frac{\rho_n \mu Q}{B} = A \frac{\rho_n v^3 Q}{g H \omega B} = A \frac{\rho_n}{g} \frac{v^4}{\omega}, \quad (22)$$

где  $Q$  – расход воды в русле,  $B$  – ширина потока,  $\rho_n$  – плотность наносов.

Величина  $A$  зависит от коэффициента Шези:

$$A = \frac{\kappa g}{a C^2} = \frac{\kappa g n^2}{a H^{1/3}}, \quad (23)$$

где  $a = \frac{\rho_n - \rho}{\rho}$  - относительная плотность наносов;  $B$  – ширина потока;  $\rho$  – плотность воды;  $\kappa$  –

безразмерный постоянный коэффициент пропорциональности между затратами энергии на поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии и энергией того же потока без наносов;  $n$  – коэффициент шероховатости.

После соответствующих постановок и преобразований формула (11) для определения предельного удельного расхода наносов может быть представлена в виде:

$$q_{дон} = \rho_{отл} d^2 \eta_c \tau_c \nu_c / t_{\Delta}, \quad (24)$$

где  $\rho_{отл} = \beta \rho_{\varepsilon}$  – плотность русловых отложений, кг/м<sup>3</sup>,  $\eta_c$  – вероятность срыва частиц грунта,  $\tau_c$  – средняя длительность срывающих выбросов донной скорости,  $\nu_c$  – средняя частота срывающих турбулентных возмущений.

Величины  $\eta_c$ ,  $\tau_c$  и  $\nu_c$  определяются выражениями:

$$\eta_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} f(x_2) & \text{при } \bar{u}_{\Delta} < u_{\Delta c} \\ 1 & \text{при } \bar{u}_{\Delta} \geq u_{\Delta c} \end{cases}, \quad (25)$$

$$\tau_c = \frac{1 - \Phi(x_1)}{\sqrt{2\pi} \bar{\nu}_u f(x_1)}, \quad (26)$$

$$\nu_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} \bar{\nu}_u f(x_1) & \text{при } \bar{u}_{\Delta} < u_{\Delta n} \\ \bar{\nu}_u & \text{при } \bar{u}_{\Delta} \geq u_{\Delta n} \end{cases}; \quad (27)$$

При определении расхода руслоформирующих наносов учитываем движение наносов по грядам [13-15].

Рассчитываем высоту, длину и скорость перемещения гряд:

- высота гряды

$$h_{\varepsilon} = 2.1 \frac{d}{Fr^{4.1}} \left( \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0} \right)^{1.4}, \quad (28)$$

- длина гряды

$$\ell_{\varepsilon} = H \sqrt[3]{\frac{c^2}{g}}, \quad (29)$$

- скорость гряды

$$c_{\Delta} = 950 \frac{h_{\varepsilon}}{\Delta} \nu Fr^3 \quad (30)$$

где  $\Delta$  – высота мезоформы, м.

Для расчета предельного расхода неоднородных по крупности руслоформирующих наносов в турбулентном потоке, получаем следующую зависимость:

$$q_T = \frac{q_{дон} \rho_{отл} \mu Q}{B}. \quad (31)$$

Сопоставление результатов расчета расхода наносов, рассчитанных по формуле (22), с экспериментальными и натурными данными других исследователей представлены на рис. 2 и 3.



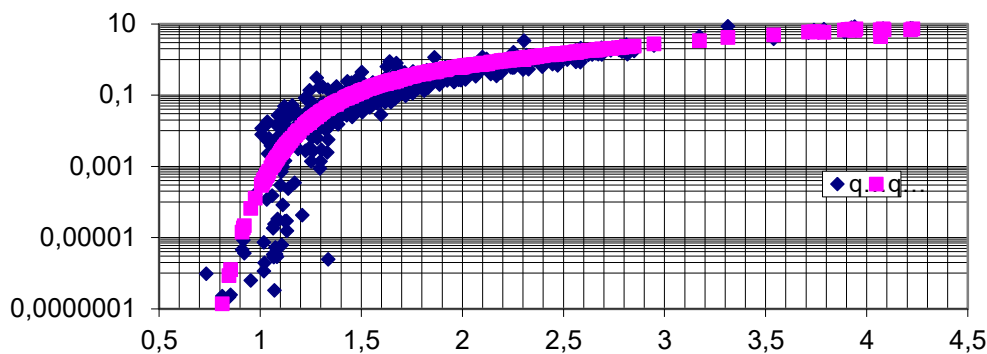


Рис. 2. Апробация модели движения руслоформирующих наносов на натуральных данных

Fig. 2. Testing the model of the movement of channel-forming sediments on field data

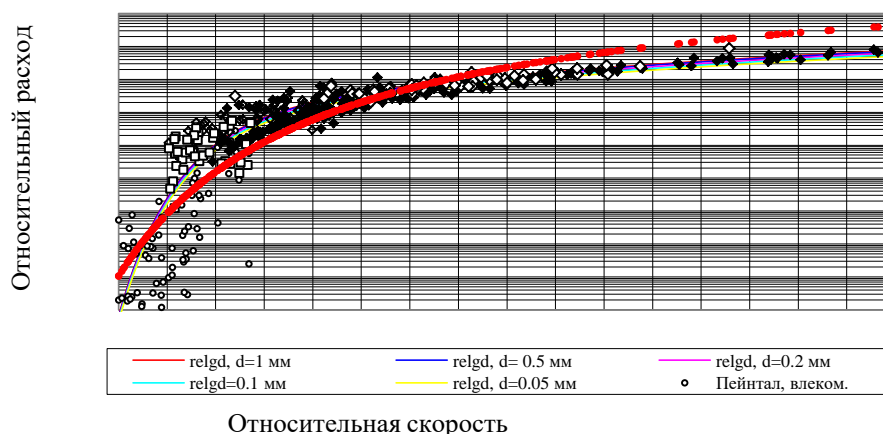


Рис. 3. Сопоставление кривой относительного расхода наносов с экспериментальными данными различных авторов

Fig. 3. Comparison of the curve of relative flow sediment with experimental data of various authors

**Обсуждение результатов.** Представление о преобладающей роли крупномасштабных турбулентных возмущений в процессах транспорта наносов позволяет подойти к анализу механизма движения твердых частиц на основе рассмотрения осредненных характеристик взаимодействия турбулентных образований с переносимыми ими частицами грунта. С этой целью низкочастотные скорости жидкости  $u(t)$  и  $v(t)$ , определяющие величину гидродинамических сил, статистически осредняются по некоторым областям крупномасштабных турбулентных образований, в пределах которых происходит срыв, взвешивание и транспорт наносов. Такое осреднение осуществляется с помощью математических методов теории выбросов случайных процессов, с использованием вероятностных критериев срыва и взвешивания частиц наносов в турбулентном потоке [2].

Анализ математических моделей движения твердых частиц в водном потоке показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса (скачков) придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений и вихревых образований, с использованием математического аппарата. В результате получены осредненные статистические характеристики траекторий частиц донных и взвешенных наносов: высота подъема над дном  $h_{дон}$  и  $h_{взв}$ , длительность переноса  $t_{дон}$  и  $t_{взв}$ , дальность переноса  $l_{дон}$  и  $l_{взв}$ , которые зависят от вероятностных параметров срывающих и взвешивающих турбулентных возмущений,

осуществляющих срыв, взвешивание и транспорт наносов: частоты и длительности воздействия возмущений на твердые частицы [10].

В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований физических процессов взаимодействия турбулентного водного потока с руслоформирующими наносами, на основе представлений о стохастическом характере этого взаимодействия и использования математических методов гидромеханики, механики грунтов, теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, разработаны основы математического моделирования процессов движения твердых частиц в естественных речных руслах, сложенных неоднородными по крупности несвязными грунтами.

**Вывод.** Выполненное сопоставление опытных и теоретических значений расхода руслоформирующих наносов показывает, что в диапазоне гидравлических условий и размеров частиц, охваченных рассматриваемыми опытами, полученные формулы движения руслоформирующих наносов, принимая во внимание чрезвычайную сложность явления, дают в основном удовлетворительные результаты.

Имеющиеся отклонения расчетных и опытных значений могут быть объяснены неточностью определения некоторых исходных параметров, в частности, использованием при определении параметров траекторий взвешенных наносов в весьма приближенной эмпирической зависимости для определения средней частоты пульсаций лагранжевой вертикальной скорости.

#### **Библиографический список:**

1. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.25-37.
2. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – С.53-68.
3. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
4. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
5. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках: сборник работ по гидрологии. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – № 27. – С. 25–40.
6. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.
7. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
8. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.
9. Магомедова А.В., Магомедова М.Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. Т.29. №2. С.58-64.
10. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т.42, №3 С.106-109.
11. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т.37, №2. С.84-91.
12. Базилевич В.А., Козицкий В.В. К вопросу определения расхода руслоформирующих взвешенных наносов в речных потоках // Гидромеханика. 1987. №10, с.61-63.
13. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел// Журнал университета водных коммуникаций. – СПб, т.2 , 2010. С.90-93.
14. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С.127-130.
15. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.

#### **References:**

1. Magomedova A.V. Eroziionnyye protsessy v ruslakh rek i kanalov. – M.: VZPI, 1990. – S.25-37. [Magomedova A.V. Erosion processes in riverbeds and canals. - M.: VZPI, 1990. S.25-37. (In Russ.)]

2. Magomedova M.R. Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014. – S.53-68. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014. pp.53-68. (In Russ.)]
3. Alekseyevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'yefa // Meteo-rologiya i gidrologiya. 1990. № 9, s. 100-105. [Alekseevsky N.I. Transport of sediment load with the developed structure of the channel relief // Meteorology and hydrology. 1990. No. 9, pp. 100-105. (In Russ.)]
4. Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181. [Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181. (In Russ.)]
5. Kopalani Z.D., Kostyuchenko A.A. Raschety raskhoda donnykh nanosov v rekakh: sbornik rabot po gidrologii. – SPb.: Gidrometeoizdat, 2004. – № 27. – S. 25–40. [Kopalani Z.D., Kostyuchenko A.A. Calculations of sediment discharge in rivers: a collection of works on hydrology. – St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004. No. 27. pp. 25–40. (In Russ.)]
6. Benoit C., Magnus L. A. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp. 251-258.
7. Klavin A.B., Kopalani Z.D. Eksperimental'nyye issledovaniya i gidravlicheskiye modelirovaniye rechnykh potokov i ruslovogo protsessa. – SPb.: Nestor-Istoriya, 2011. – S. 103–107. [Klavin A.B., Kopalani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. – St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. S. 103–107. (In Russ.)]
8. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, vol. 129, no.2, pp. 120-128.
9. Magomedova A.V., Magomedova M.R. O faktorakh, obuslovlivayushchikh protsess transporta rusloformiruyushchikh nanosov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki – 2013. – T.29. – №2 – S.58-64. [Magomedova A.V., Magomedova M.R. On the factors determining the transport process of channel-forming sediment // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences, 2013. Vol.29. No. 2 pp.58-64. (In Russ.)]
10. Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoye matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki – 2016. – T.42, - №3 - S.106-109. [Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the distribution of suspended particles to determine areas of high turbidity in assessing damage to the aquatic biological resources of the Cherek River // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016. Vol.42, No. 3 - S.106-109. (In Russ.)]
11. Magomedova M.R. Prakticheskoye primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki 2015. T.37, №2 S.84-91. [Magomedova M.R. The practical application of the author's model of transport of mineral particles // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015. Vol.37, No. 2 pp. 84-91. (In Russ.)]
12. Bazilevich V.A., Kozitskiy V.V. K voprosu opredeleniya raskhoda rusloformiruyushchikh vzveshennykh nanosov v rechnykh potokakh // Gidromekhanika. 1987. №10, s.61-63. [Bazilevich V.A., Kozitskiy V.V. On the issue of determining the flow rate of channel-forming suspended nanosov in river flows // Hydromechanics. 1987. No. 10, pp. 61-63. (In Russ.)]
13. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Gidravlicheskiye soprotivleniye rechnykh rusel // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. – SPb, t.2, 2010. – S.90-93. [Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Hydraulic resistance of river channels // Journal of the University of Water Communications. – SPb, t.2, 2010. pp.90-93. (In Russ.)]
14. Rzhantsyn N.A. Rusloformiruyushchiye protsessy rek. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – S.127-130. [Rzhantsyn N.A. River-forming processes of rivers. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. pp.127-130. (In Russ.)]
15. Brian W. D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp. 662-673.

**Сведения об авторе:**

**Магомедова Милада Руслановна** – кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства.

**Information about author:**

**Milada R. Magomedova** – Cand. Sci. (Technical), Dean of the Faculty of Oil, Gas and Environmental Engineering.

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.03.2019.

Принята в печать 21.05.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

Received 17.03.2019.

Accepted for publication 21.05.2019.

**Для цитирования:** Степанов О.И., Худякова С.А. Применение моделей систем информационно-аналитического обеспечения пожарно-спасательных подразделений при пожаротушении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 108-117. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-108-117.

**For citation:** Stepanov O. I., Khudyakova S.A. Application of models of information and analytical support systems fire fighting rescue units. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 108-117. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-108-117

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.8: 614.842.6

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-108-117

### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПРИ ПОЖАРОТУШЕНИИ

Степанов О. И.<sup>1</sup>, Худякова С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Главное управление МЧС России по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Студенческая, 5а, Россия,

<sup>2</sup>Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [oleg01911@yandex.ru](mailto:oleg01911@yandex.ru), <sup>2</sup>e-mail: [hudyakovac@mail.ru](mailto:hudyakovac@mail.ru)

**Резюме. Цель.** Предложено рассмотрение структуры сил и средств пожарно-спасательных подразделений, основанное на декомпозиции сил и средств подразделений на позиции по тушению пожара и позиции, обеспечивающие действия по тушению пожаров. **Метод.** Применена структурно-функциональная модель деятельности пожарно-спасательных подразделений, позволяющая представить этапы развития системы как составляющие единого процесса пожаротушения. Выявлены причины отсутствия сведений об обстановке на месте пожара у лица, принимающего решения в отношении сил и средств пожарно-спасательных подразделений. **Результат.** Проведен анализ сведений об обстановке на месте пожара, потребляемых лицом, принимающим решения в отношении сил и средств пожарно-спасательных подразделений. Приведено взаимоотношение источников и субъектов обработки информации на пожаре. Приведена структура базы данных об объекте возможного пожара, как источника расчетных параметров для системы информационно-аналитического обеспечения пожарно-спасательных подразделений. Предложена структура расчетного модуля системы информационно-аналитического обеспечения пожарно-спасательных подразделений при организации тушения пожаров в зданиях. Приведены условия взаимодействия лица, принимающего решения в отношении сил и средств пожарно-спасательных подразделений, с программными продуктами систем поддержки управления и документами предварительного планирования действий подразделений по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ. **Вывод.** Программная реализация моделей систем информационно-аналитического обеспечения пожарно-спасательных подразделений позволяет формализовать процесс исследования произошедших пожаров, провести оценку действий пожарно-спасательных подразделений по созданию позиций по ведению действий. Приведено направление перспективной интеграции моделей систем информационно-аналитического обеспечения пожарно-спасательных подразделений в их деятельность.

**Ключевые слова:** пожаротушение, система, поддержка принятия решений, алгоритм, расчетный модуль

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### APPLICATION OF MODELS OF INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT SYSTEMS FIRE FIGHTING RESCUE UNITS

**Oleg. I. Stepanov<sup>1</sup>, Svetlana A. Khudyakova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Main Directorate of the Ministry of Emergencies of Russia for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Ugra,

<sup>1</sup> 5a Studencheskaya Str., Khanty-Mansiysk 1628011, Russia,

<sup>2</sup> Ural Institute of the State Fire Service EMERCOM of Russia,

<sup>2</sup> 22 Mira Str., Sverdlovsk region, Ekaterinburg 2620062, Russia,

<sup>1</sup> e-mail: [oleg01911@yandex.ru](mailto:oleg01911@yandex.ru), <sup>2</sup> e-mail: [hudyakovac@mail.ru](mailto:hudyakovac@mail.ru)

**Abstract. Objectives** It was proposed to review the structure of the fire and rescue divisions management system, based on the decomposition of the forces and means of the subdivisions into fire extinguishing positions and ensuring fire extinguishing actions. **Method** The structural and functional model of the development of the fire and rescue divisions management system has been clarified, which allows to present the stages of the development of the system as components of a single fire extinguishing process. The reasons for the lack of information about the situation at the site of a fire in a person who makes management decisions regarding the forces and means of fire and rescue units are given. **Result** The analysis of information about the situation at the place of fire consumed by the person making management decisions. The structure of the database of the object of possible fire as a source of design parameters for the system of information and analytical support for the management of fire and rescue units is given. The structure of the settlement module of the system of information and analytical support for the management of fire and rescue units in the organization of extinguishing fires in buildings is proposed. The conditions for the interaction of the person making management decisions in relation to the forces and means of fire and rescue divisions with the software of management support systems and documents of preliminary planning of actions of the divisions for fighting fires and conducting rescue operations are given. **Conclusion** The software implementation of the models of information and analytical support systems for the management of fire and rescue units makes it possible to formalize the process of researching the fires that have occurred. The direction of perspective integration of models of information and analytical systems support systems for fire and rescue units in their activities is given.

**Keywords:** fire suppression, system, decision support, algorithm, calculation module

**Введение.** Поддержка, или обеспечение, управления пожарно-спасательными подразделениями при пожаротушении является одним из направлений совершенствования системы управления подразделениями [1-3]. Современное развитие технологий предопределяет направление развития систем поддержки управления, которые формализуются в виде компьютерных программ различного уровня интегрированности в действующие структуры и подразделения [3-5].

Первичная, или традиционная, формализация поддержки управления представляется документами предварительного планирования действий пожарно-спасательных подразделений на месте пожара – планы и карточки тушения пожара [6]. Условия использования и корректировки данных документов не позволяют лицу, принимающему управленческие решения (руководителю тушения пожара), быть объективно осведомленным об особенностях обстановки на месте пожара виду скоротечности изменения обстановки и рассмотрении ограниченного вариационного ряда сценариев развития пожара. Наиболее объективными остаются сведения об объемно-планировочных решениях объекта пожара, составе сил и средств подразделений.

Система управления пожарно-спасательными подразделениями претерпевает структурные изменения в течение периода своего функционирования на месте пожара (рис. 1) [1].

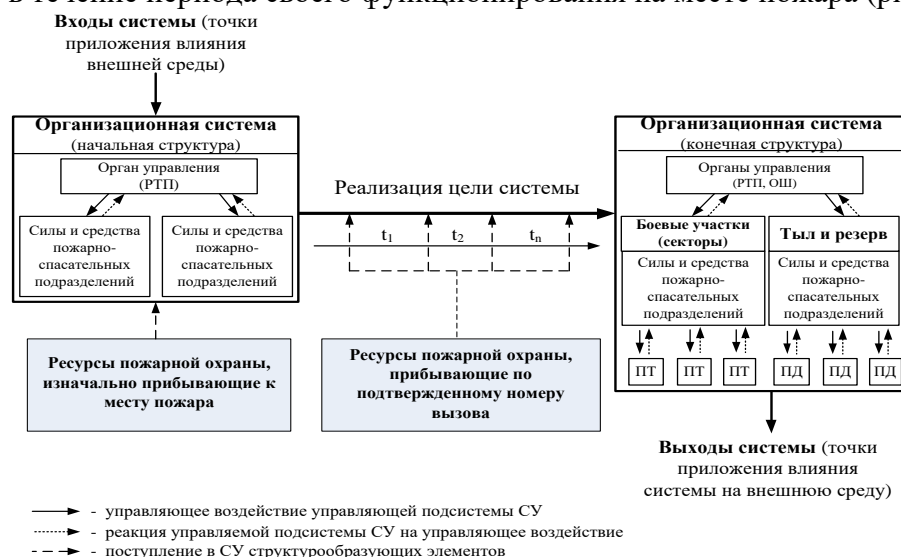


Рис. 1. Структурно-функциональная модель развития системы управления [1]

Fig. 1. The structural-functional model of the development of the control system [1]

где ПТ – позиции по тушению пожара, на которых осуществляется ведение действий по спасению людей, подаче огнетушащих веществ для тушения; ПД – позиции обеспечения действий по тушению пожара, на которых осуществляются обеспечивающие действия; РТП – руководитель тушения пожара; ОШ – оперативный штаб;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_n$  – условные этапы пожаротушения

where ПТ - fire extinguishing positions, at which actions are taken to save people, supply fire extinguishing substances for extinguishing; ПД - positions for providing actions to extinguish a fire, at which supporting actions are carried out; RTP - fire extinguishing manager; OSH - operational headquarters;  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_n$  - conditional stages of fire fighting

Вероятность отсутствия у руководителя тушения пожара (РТП) объективной информации о складывающейся обстановке возрастает на начальном этапе пожаротушения. Эта ситуация возникает по причинам отсутствия адекватных и достоверных источников информации в начальный период пожаротушения, поскольку еще не проведена разведка на месте пожара или избытка потенциальных элементов управляемой подсистемы, не имеющих конкретных задач, соответствующих их тактическим возможностям.

Наиболее адекватными и достоверными источниками информации об обстановке на объекте пожара являются сами позиции по тушению, а именно личный состав, задействованный на них. Зная основные особенности объекта, данные источники информации могут формировать у РТП наиболее адекватное представление о складывающейся обстановке.

На современном этапе развития науки о прогнозировании пожаров представляется возможным построение математических моделей развития пожара с определенным уровнем доверия. Рассмотрение и понимание закономерностей развития пожара, в том числе на конкретном объекте, дает возможность выработки алгоритмов действий РТП в отношении управляемой подсистемы системы управления подразделениями. Иными словами, принятие и реализация решений РТП, в ситуации корректного прогнозирования процесса развития пожара, подчиняется определенному алгоритму [1].

Исследователями предлагаются различные интерпретации таких алгоритмов, имеющих своей целью выработку стабильного порядка действий оперативных отделений пожарно-спасательных подразделений по тушению пожара, а должностных лиц – по управлению силами и средствами приданных подразделений.

Минимальная информация, требуемая РТП в начальный период пожаротушения, представляется следующим набором сведений:

- локация объекта пожара на местности и его текущее функциональное состояние (статические сведения);
- место расположения очага пожара (динамические сведения);

- степень распространения отдельных опасных факторов пожара (ОФП) (динамические сведения);
- наличие людей в пространстве объекта пожара (динамические сведения);
- нахождение сосудов под давлением и ЛВЖ (ГЖ) на объекте пожара (динамические сведения);
- места и порядок остановки технологического процесса, отключения систем электропитания (статические сведения);
- наличие источников наружного противопожарного водоснабжения (статические сведения);
- исправность источников наружного противопожарного водоснабжения (динамические сведения);
- состав сил и средств пожарно-спасательных подразделений, прибывающих по установленному рангу вызова (динамические сведения);
- прогноз распространения ОФП (динамические сведения);
- прогноз достаточности сил и средств пожарно-спасательных подразделений для локализации пожара (динамические сведения).

РТП, на начальном этапе пожаротушения, ограничен в адекватных и корректных источниках информации, что вызывает необходимость принятия решений в условиях неопределенности [1, 7].

Объективные источники информации (зачастую справочной) в виде планов и карточек тушения пожара [6, 8] не могут быть фактически применены непосредственно на месте пожара, ввиду того, что являются печатными источниками в формате брошюрованных справочников различного объема и уровня квантификации объекта. При этом РТП, в большинстве случаев, не обладает штатным носимым электронно-вычислительным устройством, функционирующим в различных климатических условиях с надлежащей степенью надежности для взаимодействия с системами поддержки управления.

В этой связи представляется целесообразным оснащение пожарных автомобилей устройствами обработки (ввода, анализа и вывода данных) информации об объекте пожара и прогнозируемой обстановке на месте пожара. Практика пожаротушения показывает, что до формирования управляющей подсистемы (штаб пожаротушения, оперативная группа, тыл) РТП фактически не имеет времени на применение средств поддержки управления, при этом такая возможность имеется при следовании к месту вызова, где существенную роль в предоставлении информации может играть диспетчер (радиотелефонист) подразделения (рис.2).



Рис. 2. Источники и субъекты обработки информации

Fig. 2. Sources and subjects of information processing

На практике, с учетом опыта работы должностных лиц, диспетчер, при следовании караула на место вызова, успевает наделить будущего РТП актуальными сведениями: о расположении и исправности источников наружного противопожарного водоснабжения, о следовании экстренных и служб жизнеобеспечения к месту вызова, о явном наличии пострадавших, нуждающихся в помощи, о перекрытых и затрудненных участках проезда.

При программной реализации все статические сведения и ряд динамических сведений являются составляющей частью баз данных об объекте (рис.3).



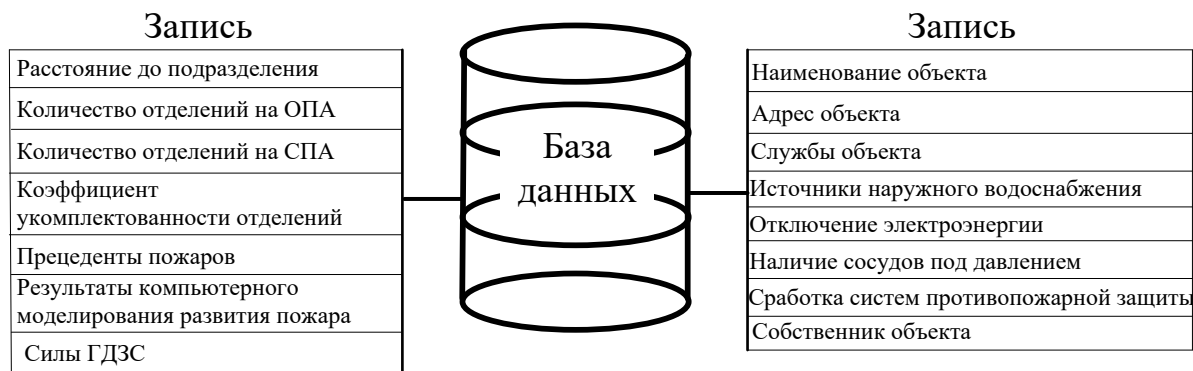


Рис. 3. Состав баз данных об объекте возможного пожара

Fig. 3. The composition of the database of the object of a possible fire

Расчетный модуль системы информационно-аналитического обеспечения управления пожарно-спасательными подразделениями при пожаротушении включает:

- блок расчета фактических параметров пожара ( $S_{\text{п}}$  – площадь пожара,  $P_{\text{п}}$  – периметр пожара,  $\Phi_{\text{п}}$  – фронт пожара);
- блок расчета требуемых параметров пожаротушения ( $S_{\text{т}}$  – площадь тушения,  $I_{\text{ф}}$  – фактическая интенсивность подачи огнетушащих веществ,  $Q_{\text{ф}}$  – фактический расход огнетушащих веществ,  $Q_{\text{уд}}$  – удельный расход огнетушащих веществ);
- блок расчета требуемых сил, средств и ресурсов пожарно-спасательных подразделений ( $N_{\text{лс}}$  – требуемое количество личного состава,  $N_{\text{ПА}}$  – требуемое количество пожарных автомобилей,  $N_{\text{ств}}$  – требуемое количество стволов для пожаротушения (защиты и тушения));
- блок контроля и оценки (расчет тактического потенциала [9, 10]).

Количественный (Пв) и качественный (Пр) критерии тактического потенциала [10] являются проверочными условиями соответствия системы управления подразделениями требуемым параметрам:

- для позиций по тушению пожара:  $P_{\text{в}}^{\text{ПТ}}$  – количественный критерий,  $P_{\text{р}}^{\text{ПТ}}$  – качественный критерий (критерий достаточности ресурсов);
- для позиций обеспечения действий по тушению пожара:  $P_{\text{в}}^{\text{ПД}}$  – количественный критерий,  $P_{\text{р}}^{\text{ПД}}$  – качественный критерий (критерий активности ПД).

Количественный критерий  $P_{\text{в}}^{\text{ПТ}}$  определяется как:

$$P_{\text{в}}^{\text{ПТ}} = \frac{\sum_{i=1}^I N_{\text{ПТ}i}}{\sum_{j=1}^J N_{\text{отд.}j}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ПТ}}$  – позиция ПТ;  $N_{\text{отд.}}$  – отделение на ОПА;  $I$  – число созданных ПТ;  $J$  – число отделений на ОПА, привлеченных к тушению пожара.

$P_{\text{р}}^{\text{ПТ}}$  определяется из возможности ПТ обеспечить необходимые условия локализации пожара. Параметрами при этом могут выступать площадь тушения ( $S_{\text{т}}$ ), объем тушения ( $V_{\text{т}}$ ), требуемый расход ОТВ ( $Q_{\text{туш.}}^{\text{треб.}}$ ):

$$P_{\text{р}}^{\text{ПТ}} = \frac{S_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}}{S_{\text{т}}} = \frac{V_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}}{V_{\text{т}}} = \frac{Q_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}}{Q_{\text{туш.}}^{\text{треб.}}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}$  – фактическая площадь тушения задействованными средствами подачи ОТВ;  $V_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}$  – фактический объем тушения задействованными средствами подачи ОТВ;  $Q_{\text{туш.}}^{\text{факт.}}$  – фактическая подача ОТВ для тушения пожара.

$P_{\text{в}}^{\text{ПД}}$  определяется с учетом создания ПТ:

$$P_{\text{в}}^{\text{ПД}} = \frac{\sum_{k=1}^K N_{\text{ПД}k}}{(N_{\text{отд.}}^{\text{общ.}} - N_{\text{отд.}}^{\text{ПТ}})}, \quad (3)$$



где  $N_{\text{ПД}}$  – позиция ПД;  $K$  – число созданных позиций ПД;  $N_{\text{отд.}}^{\text{общ.}}$  – общее число отделений ПП, сосредоточенных на месте пожара;  $N_{\text{отд.}}^{\text{ПТ}}$  – число отделений, задействованных для создания ПТ.

$\Pi_{\text{р}}^{\text{ПД}}$  определяется возможностью обеспечения ПТ требуемыми ресурсами:

$$\Pi_{\text{р}}^{\text{ПД}} = \frac{N_{\text{ПТВ факт.}}}{N_{\text{ПТВ треб.}}} = \frac{Q_{\text{общ.факт.}}}{Q_{\text{общ.треб.}}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{ПТВ факт.}}$  – фактическое количество ПТВ (по видам), имеющееся на ПД;  $N_{\text{ПТВ треб.}}$  – требуемое для ПТ количество ПТВ (по видам);  $Q_{\text{общ.факт.}}$  – фактическая подача ОТВ, обеспечиваемая ПД;  $Q_{\text{общ.треб.}}$  – общий требуемый расход ОТВ для тушения и защиты.

Расчеты параметров пожара, параметров пожаротушения и требуемого состава сил и средств пожарно-спасательных подразделений производятся последовательно, по общеизвестному математическому аппарату [11-13].

Завершающим этапом выступает расчет количественного и качественного критериев тактического потенциала, по результату которого формируются заключения о способности системы управления пожарно-спасательными подразделениями обеспечить локализацию пожара в заданных параметрах (рис.4).

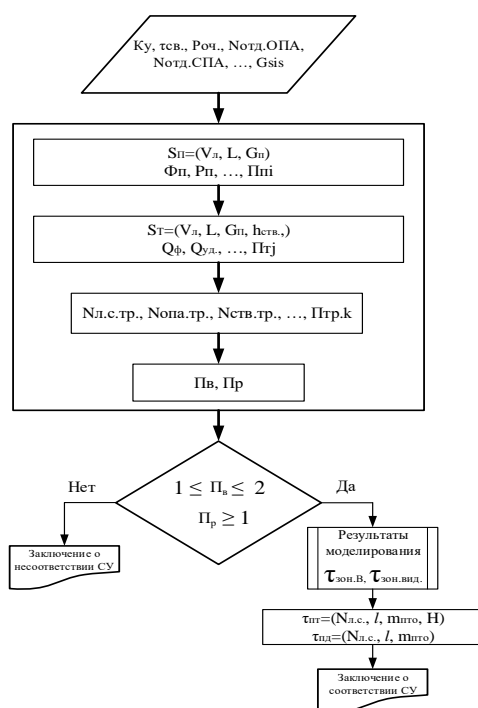


Рис. 4. Алгоритм расчетного модуля модели системы информационно-аналитического обеспечения

Fig. 4. The algorithm of the calculation module of the model of the information-analytical system providing

где  $R_{\text{оч}}$  – уровень нахождения очага пожара,  $K_u$  – коэффициент укомплектованности оперативных расчетов,  $N_{\text{отд.ОПА}}$  – количество оперативных отделений на ОПА,  $N_{\text{отд.СПА}}$  – количество оперативных отделений на СПА,  $G_{\text{sis}}$  – параметры сил и средств,  $G_n$  – геометрические параметры помещений объекта пожара,  $H$  – уровень нахождения ПТ,  $\Pi_{\text{пи}}$  – параметр пожара,  $\Pi_{\text{тj}}$  – параметр пожаротушения,  $\Pi_{\text{трк}}$  – расчетный параметр требуемых сил и средств,  $N_{\text{л.с.}}$  – численность личного состава,  $l$  – расстояние, преодолеваемое личным составом при создании позиций,  $m_{\text{пто}}$  – масса пожарно-технического оборудования

Where  $R_{\text{och}}$  is the level of location of the fire source,  $K_u$  is the staffing factor of operational calculations,  $N_{\text{ot.ОПА}}$  is the number of operational departments at the fire department,  $N_{\text{ot.СПА}}$  is the number of operational departments at the SPA,  $G_{\text{sis}}$  are the parameters of forces and means,  $G_n$  are the geometric parameters of the premises of the fire facility,  $H$  – the location level of the PT,  $\Pi_{\text{pi}}$  – fire parameter,  $\Pi_{\text{tj}}$  – fire extinguishing parameter,  $\Pi_{\text{trk}}$  – design parameter of the required forces and means,  $N_{\text{l.s.}}$  – the number of personnel,  $l$  – the distance traveled by personnel when creating positions,  $m_{\text{pto}}$  – the mass of fire-fighting equipment

В программных продуктах, системах поддержки принятия решений (СППР), результаты расчетов и обработки данных представляются в диалоговых окнах (рис. 5).

Факт выбора решающего направления действий руководителем инициирует порядок расстановки заданного состава сил и средств пожарно-спасательных подразделений.

**Входные данные при адресном вводе**

Адрес объекта пожара: Березовская 86

Решающее направление действий: Принцип 1

Месторасположение очага пожара: 2 этаж

Коэффициент укомплектованности оперативных отделений: 0.6

Вид средства подачи ОВ: РС-70, РСКЗ-70, РСН-70

Время с момента сообщения, мин: 5

Время следования ПП, мин: 5

Назад Далее

а)

**Вывод данных для принятия решения по адресному запросу**

Тип объекта: Не установлено / В эксплуатации

Состояние эксплуатации: В эксплуатации

Наличие баллонного газа: +

Степень огнестойкости: 5

Наличие источников наружного водоснабжения:

Номер	Расстояние, м	Водоотдача, л/с
ПГ: ПГ 165-60	130	40
ПВ:		

Ближайший ИППВ: Исправен

Заклучение о достаточности сил и средств: Достаточно

Количество основных ПА достаточно для обеспечения бесперебойной подачи огнетушащего вещества, задействование АПП для подачи огнетушащих веществ не целесообразно.

Количество личного состава достаточно для обеспечения работы позиций по тушению

Пути дальнейшего распространения горения: лестничной клетки и прогара (5-7 минут пожара). Наиболее интенсивное распространение пожар получает в чердаке (до 10 минут пожара). Переход на 1 этаж происходит, в основном, через лестничную клетку (8-9 минут пожара), позже (10-15 минут пожара) через прогары и распространение по пустотам. Интенсивное распространение на 1 этаже происходит после 10 минут пожара.

Расчетная площадь пожара: 127,17

Расчетная площадь тушения: 127,17

Схема объекта на местности

Сохранить результат обработки

Схемы развертывания

Отправить форму

Перейти к новому запросу

Вывести окно запроса

Лог расчета

Печать

Выход

б)

**Рис. 5. Окно ввода данных (а) и результата расчетов (б) в СППР**

**Fig. 5. The window for entering data (a) and calculation result (b) in DSS**

Заклучение представляется набором рекомендаций РТП, предлагаемыми схемами развертывания сил и средств подразделений и сведениями об объекте пожара [14].

Также приводится прогноз проявления опасных явлений на пожаре, формируемый на основе исследований произошедших пожаров и научных достижений в области прогнозирования развития ОФП на объектах пожара [15-19].

**Вывод.** Применение предложенного алгоритма, помимо ранее предлагаемых методик определения эффективности функционирования пожарно-спасательных подразделений [2, 14, 20], позволяет аналитически объективно оценивать эффективность деятельности пожарно-спасательных подразделений в ходе пожаротушения, выраженную временем достижения локализации пожара.

Применение моделей систем информационно-аналитического обеспечения в деятельности пожарно-спасательных подразделений целесообразно на базе мобильных устройств, так как позволит РТП обрабатывать информацию с места пожара в оперативном режиме без использования промежуточных звеньев и создания (использования) сетей передачи данных, а также на ЭВМ диспетчеров пожарно-спасательных подразделений [1, 2-5, 21].

#### **Библиографический список:**

1. Денисов А.Н., Степанов О.И. Структура системы управления пожарно-спасательными подразделениями на начальном этапе пожаротушения // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 3 (73). С. 3-7.
2. Тараканов Д.В. Система информационного обеспечения действий по ликвидации пожаров в зданиях // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XI МНПК. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2016. – С. 321–324.
3. Денисов А.Н. Моделирование сосредоточения и введения сил и средств для планирования боевых действий пожарных подразделений // Пожары и окружающая среда: материалы XVII Международной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2002. – 477 с.
4. Тараканов Д.В., Варламов Е.С., Илеменов М.В. Компьютерное моделирование процессов развития и тушения пожаров в зданиях // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2014. – Вып. № 5 (57).
5. Власов К.С., Данилов М.М. Применение информационных технологий для управления пожарно-спасательными подразделениями // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, 26 апреля 2019 года, г. Железнодорожск – Изд-во: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – 852 с.
6. Приказ МЧС России от 25.10.2017 №467 «Об утверждении Положения о пожарно-спасательных гарнизонах».
7. Денисов А.Н. Методы, модели и алгоритмы поддержки управления пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров: дисс. док. тех. наук: 05.13.10 – М., 2018.
8. Методические рекомендации по составлению планов тушения пожаров и карточек тушения пожаров, утвержденные МЧС России 27.02.2013 (№2-4-87-1-18).
9. Григорьев А.Н. Поддержка принятия управленческих решений при тушении крупных пожаров в общественных зданиях: автореферат диссертации канд. тех. наук. М., 2012. 26 с.
10. Степанов О.И., Стахеев М.В., Джабаев М.Д., Осипенко С.И. Применение тактического потенциала при оценке оперативно-тактических действий пожарных подразделений при тушении пожаров // Техносферная безопасность. 2015. №3 (8). С. 3-7.
11. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М., 1987. 288 с.
12. Теребнев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. – М.: Пожкнига, 2004. 248 с.
13. Богданов М.И., Архипов Г.Ф., Мясенков Е.И. Справочник по пожарной технике и тактике: учебное пособие. Управление государственной противопожарной службы Санкт-Петербурга и Ленинградской области МЧС России. – СПб., 2002. 120 с.
14. Степанов О.И., Денисов А.Н., Степанова Я.В., Осипенко С.И. Применение систем информационно-аналитической поддержки управленческих решений при пожаротушении // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: материалы Дней науки (6-9 декабря 2016 г.) в 2-х частях. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2017. С. 49-50.
15. Kunkelmann J. Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise / J. Kunkelmann, D. Brein. – 2010. 103 p.
16. Joerger S. Modern wood-frame construction: firefighting problems and tactics // Fire Engineering. – 2014. – Vol. 167, Issue 1.
17. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВПИТШ МВД СССР, 1987. – 444 с.
18. Кабелев Н.А. Пожарная разведка: тактика, стратегия и культура. – Екатеринбург: ООО «Издательство «Калан», 2016. – 348 с.
19. Трчка М. Специальные проявления пожара и меры пожаротушения. Текст для курсов, подготавливаемых в рамках сотрудничества Чешская республика – Молдавия. ВШБ - Технический Университет Острава. 2014/15, 66 с.
20. Бужин О.А., Дендаренко Ю.Ю., Сенчихин Ю.М. Методика оцінки організаційно-функціональної ефективності пожежнорятувальних підрозділів при гасінні пожеж // журнал «Проблеми пожежної безпеки». Випуск 40, 2016.
21. Королев П.С., Еремин М.П., Данилов М.М. К вопросу выбора решений при тушении пожара на основе этапов развития системы поддержки принятия решений // Материалы «Школы молодых ученых и специалистов МЧС РОССИИ - 2018». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – с. 28-33

### References:

1. Denisov A.N., Stepanov O.I. Struktura sistemy upravleniya pozharo-spasatel'nymi podrazdeleniyami na nachalnom etape pozharotusheniya // Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. 2017. № 3 (73). S. 3-7. [Denisov A.N., Stepanov O.I. The structure of the fire and rescue divisions management system at the initial stage of fire suppression // Technosphere safety technologies. 2017. № 3 (73). pp. 3-7. (In Russ)]
2. Tarakanov D.V. Sistema informacionnogo obespecheniya dejstvij po likvidacii pozharov v zdaniyah // Pozharnaya i avariynaya bezopasnost': sbornik materialov XI MNPK. – Ivanovo: IPSA GPS MCHS Rossii, 2016. – S. 321–324. [Tarakanov D.V. The system of information support of actions to eliminate fires in buildings // Fire and emergency safety: a collection of materials XI MNPK. - Ivanovo: IPSA GPS of the Emergencies Ministry of Russia, 2016. pp. 321–324. (In Russ)]
3. Denisov A.N. Modelirovanie sosredotocheniya i vvedeniya sil i sredstv dlya planirovaniya boevykh dejstvij pozhar'nykh podrazdelenij // Pozhary i okruzhayushchaya sreda: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. – M.: VNIPO, 2002. – 477 s. [Denisov A.N. Simulation of concentration and introduction of forces and means for planning combat operations of fire departments // Fires and the environment: materials of the 17th International Scientific Practical Center. conf. - M.: VNIPO, 2002. 477 p. (In Russ)]
4. Tarakanov D.V., Varlamov E.S., Ilemenov M.V. Komp'yuternoe modelirovanie processov razvitiya i tusheniya pozharov v zdaniyah // Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti: internet-zhurnal. – 2014. – Vyp. № 5 (57). [Tarakanov D.V., Varlamov E.S., Ilemenov M.V. Computer modeling of the processes of development and extinguishing fires in buildings // Technologies of technospheric safety: Internet magazine. 2014. Vol. No. 5 (57). (In Russ)]
5. Vlasov K.S., Danilov M.M. Primenenie informacionnykh tekhnologij dlya upravleniya pozharo-spasatel'nymi podrazdeleniyami // Aktual'nye problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti i zashchity ot chrezvychajnykh situacij: Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 26 aprelya 2019 goda, g. Zheleznogorsk – Izd-vo: FGBOU VO Sibirskaya pozharo-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2019. – 852 s. [Vlasov K.S., Danilov M.M. The use of information technology for the management of fire and rescue units // Actual problems of fire safety and emergency protection: A collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, April 26, 2019, Zheleznogorsk - Publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education and Science Emergency Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. 852 p. (In Russ)]
6. Prikaz MCHS RF ot 31.03.2011g. №156 «Ob utverzhdenii Poryadka tusheniya pozharov podrazdeleniyami pozhar'noy okhrany». [Order of the EMERCOM of Russia No. 467 of 25.10.2017 «On Approval of the Regulations on Fire and Rescue Garrisons». (In Russ)]
7. Denisov A.N. Metody, modeli i algoritmy podderzhki upravleniya pozharo-spasatel'nymi podrazdeleniyami pri tushenii pozharov: diss. doktor tekhnicheskikh nauk: 05.13.10 – M., 2018. [Denisov A.N. Methods, models and algorithms to support the management of fire and rescue units in extinguishing fires: Diss. Doctor of Technical Sciences: 05.13.10 M., 2018. (In Russ)]
8. Metodicheskiye rekomendatsii po sostavleniyu planov tusheniya pozharov i kartochek tusheniya pozharov, utverzhdennyye MCHS Rossii 27.02.2013 (№2-4-87-1-18). [Methodical recommendations on compilation up plans for extinguishing fires and fire extinguishing cards approved by the EMERCOM of Russia 27.02.2013 (№2-4-87-1-18). (In Russ)]
9. Grigorev A.N. Podderzhka prinyatiya upravlencheskikh resheniy pri tushenii krupnykh pozharov v obschestvennykh zdaniyakh: avtoreferat dissertatsii kand. tekhn. nauk. M., 2012. 26 s. [Grigoriev A.N. Management decision-making support in extinguishing large fires in public buildings: dissertation abstract of the candidate. those. sciences. M., 2012. 26 p. (In Russ)]
10. Stepanov O.I., Stakheev M.V., Dzhabaev M.D., Osipenko S.I. Primenenie takticheskogo potentsiala pri otsenke operativno-takticheskikh deystviy pozhar'nykh podrazdeleniy pri tushenii pozharov // Tekhnosfernaya bezopasnost. 2015. №3 (8). S. 3-7. [Stepanov O.I., Stakheev M.V., Dzhabaev M.D., Osipenko S.I. The use of tactical potential in assessing the operational and tactical actions of fire departments in extinguishing fires // Technosphere safety. 2015. № 3 (8). pp. 3-7. (In Russ)]
11. Ivannikov V.P., Klyus P.P. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. M., 1987. 288 s. [Ivannikov V.P., Klyus P.P. Directory of fire extinguishing. M., 1987. 288 p. (In Russ)]
12. Terebnev V.V. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. Takticheskie vozmozhno-sti pozhar'nykh podrazdelenij. M.: Pozhkniga, 2004. 248 s. [Terebnev V.V. Directory of fire extinguishing. Tactical capabilities of fire departments. - M.: Pozhkniga, 2004. 248 p. (In Russ)]
13. Bogdanov M.I., Arhipov G.F., Myastenkov E.I. Spravochnik po pozhar'noy tekhnike i taktike: uchebnoe posobie. Upravlenie gosudarstvennoj protivopozhar'noy sluzhby Sankt-Peterburga i Leningradskoj oblasti MCHS Rossii. – SPb., 2002. – 120 s. [Bogdanov M.I., Arhipov G.F., Miastenkov E.I. Handbook of fire engineering and tactics: a tutorial. Management of the State Fire Service of St. Petersburg and the Leningrad Region of the Emergencies Ministry of Russia. SPb., 2002. 120 p. (In Russ)]
14. Stepanov O.I., Denisov A.N., Stepanova YA.V., Osipenko S.I. Primenenie sistem informacionno-analiticheskoy podderzhki upravlencheskikh reshenij pri pozharotushenii // Aktual'nye problemy i innovacii v obespechenii be-

- zopasnosti: materialy Dnej nauki (6-9 dekabrya 2016 g.) v 2-h chastyah. – Ekaterinburg: Ural'skij institut GPS MCHS Rossii, 2017. S. 49-50. [Stepanov O.I., Denisov A.N., Stepanova Ya.V., Osipenko S.I. The use of information and analytical support systems for management decisions during fire extinguishing // Actual problems and innovations in ensuring security: materials of the Days of Science (December 6-9, 2016) in 2 parts. - Yekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Emergencies Ministry of Russia, 2017. pp. 49-50. (In Russ)]
15. Kunkelmann J. Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise / J. Kunkelmann, D. Brein. 2010. 103 p.
16. Joerger S. Modern wood-frame construction: firefighting problems and tactics // Fire Engineering. 2014. Vol. 167, Issue 1.
17. Koshmarov YU.A., Bashkirtsev M.P. Termodinamika i teploperedacha v pozharom dele. M. : VIPTSH MVD SSSR, 1987. 444 s. [Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. Thermodynamics and heat transfer in the fire de lé. - M.: VIPTSH USSR Ministry of Internal Affairs, 1987. 444 p. (In Russ)]
18. Kabelev N.A. Pozharnaya razvedka: taktika, strategiya i kul'tura. – Yekaterinburg : OOO «Kalan», 2016. – 348 s. [Kabelev N.A. Fire Intelligence: Tactics, Strategy and Culture. Ekaterinburg: «Publishing «Kalan», 2016. 348 p. (In Russ)]
19. Trchka M. Special manifestations of fire and fire fighting measures. Text for courses prepared in the framework of cooperation Czech Republic - Moldova. VSB - Technical University of Ostrava. 2014/15, 66 p.
20. Buzhyn O.A., Dendarenko Yu. Yu., Senchykhin J.N. Methodology of estimation of organizationally-functional efficiency of fire rescue subdivisions is at extinguishing of fires // "Problems of fire safety". Issue 40, 2016.
21. Korolev P.S., Eremin M.P., Danilov M.M. K voprosu vybora reshenij pri tushenii pozhara na osnove etapov razvitiya sistemy podderzhki prinyatiya reshenij // Materialy «SHkoly molodyh uchenyh i specialistov MCHS ROSSII - 2018». M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2018. s. 28-33. [Korolev P.S., Eremin M.P., Danilov M.M. On the issue of decision making in extinguishing a fire based on the stages of development of a decision support system // Materials of the School of Young Scientists and Specialists of the EMERCOM of Russia . 2018. M. : Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2018. pp. 28-33. (In Russ)]

#### **Сведения об авторах:**

**Степанов Олег Игоревич** – начальник отдела подготовки пожарно-спасательных и аварийно-спасательных формирований.

**Худякова Светлана Александровна** – кандидат педагогических наук, начальник кафедры математики и информатики.

#### **Information about authors:**

**Oleg I. Stepanov** - Head of the Department for the preparation of fire rescue and emergency rescue units.

**Svetlana A. Khudyakova** - Cand. Sc. (Pedagogical), Head of the department of mathematics and computer science.

#### **Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 12.04.2019.

**Принята в печать** 27.05.2019.

#### **Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 12.04.2019.

**Accepted for publication** 27.05.2019.

**Для цитирования:** Абакаров А.Д., Гасанов Р.Г. Оценка надежности и живучести систем с учетом взаимосвязи элементов при сейсмическом воздействии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 118-125. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-118-125

**For citation:** Abakarov A. J., Gasanov R. G. Assessment of reliability and vitality of systems taking into account the interrelation of elements with seismic exposure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 118-125. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-118-125

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699.841

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-118-125

### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Абакаров А.Д.<sup>1</sup>, Гасанов Р.Г.<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: a.abakarov@bk.ru, <sup>2</sup> e-mail: ruslan.gasanovich@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели оценки надежности рамных систем с учетом перераспределения усилий между вертикальными конструкциями при образовании в них пластических шарниров от горизонтального сейсмического воздействия.

**Метод.** Метод исследования основан на анализе схем механизмов перехода рамных систем в предельные состояния, а также теории вероятностей, случайных процессов и надежности систем.

**Результат.** На основе анализа путей перехода статически неопределимых рамных систем в отказовые состояния из-за образования пластических шарниров в узлах соединения стоек с ригелями разработана структурная схема соединения элементов системы, представленная в виде схемы раздельного резервирования. Представлены выражения для оценки вероятностей выключения условных элементов в расчетной модели и переходов системы, как в резервные, так и в отказовые состояния. Предложены выражения по оценке живучести рамных систем при снижении статической неопределимости в связи с образованием в конструкциях пластических шарниров. Приведен пример расчета. **Вывод.** Предлагаемая модель оценки надежности позволяет, в отличие от параметрической модели, оценить надежность сооружений с учетом перераспределения усилий в конструкциях при накоплении повреждений в стойках в виде пластических шарниров, и выявить резервы надежности, заложенные в статически неопределимых системах при сильных сейсмических воздействиях.

**Ключевые слова:** сейсмическое воздействие, рамные системы, статическая неопределимость, пластические шарниры, перераспределение усилий, резервные и предельные состояния, вероятности состояний, надежность систем, чувствительность систем

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### ASSESSMENT OF RELIABILITY AND VITALITY OF SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE INTERRELATION OF ELEMENTS WITH SEISMIC EXPOSURE

**Abakar J. Abakarov<sup>1</sup>, Ruslan G. Gasanov<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: [a.abakarov@bk.ru](mailto:a.abakarov@bk.ru), <sup>2</sup>e-mail: [ruslan.gasanovich@mail.ru](mailto:ruslan.gasanovich@mail.ru)

**Abstract. Objectives** The aim of the study is to develop a model for assessing the reliability of frame systems, taking into account the redistribution of forces between vertical structures when plastic hinges are formed in them from horizontal seismic effects. **Method** The research method is based on the analysis of the schemes of mechanisms for the transition of frame systems to limit states, as well as probability theory, random processes and system reliability. **Results** Based on the analysis of the paths of transition of statically indefinable frame systems to failure states due to the formation of plastic hinges at the junction points of the posts with crossbars, a block diagram of the system elements connection has been developed, presented as a separate redundancy scheme. The expressions for estimating the probabilities of switching off the conditional elements in the computational model and transitions of the system, both to the backup and to the failure states are presented. Expressions are proposed for assessing the survivability of frame systems with a decrease in static indeterminacy due to the formation of plastic hinges in structures. The calculation example is given. **Conclusion** The proposed model for assessing reliability allows, in contrast to the parametric model, to evaluate the reliability of structures with regard to the redistribution of effort in structures with damage accumulated in racks in the form of plastic hinges, and to identify reliability reserves embedded in statically indeterminate systems under strong seismic effects.

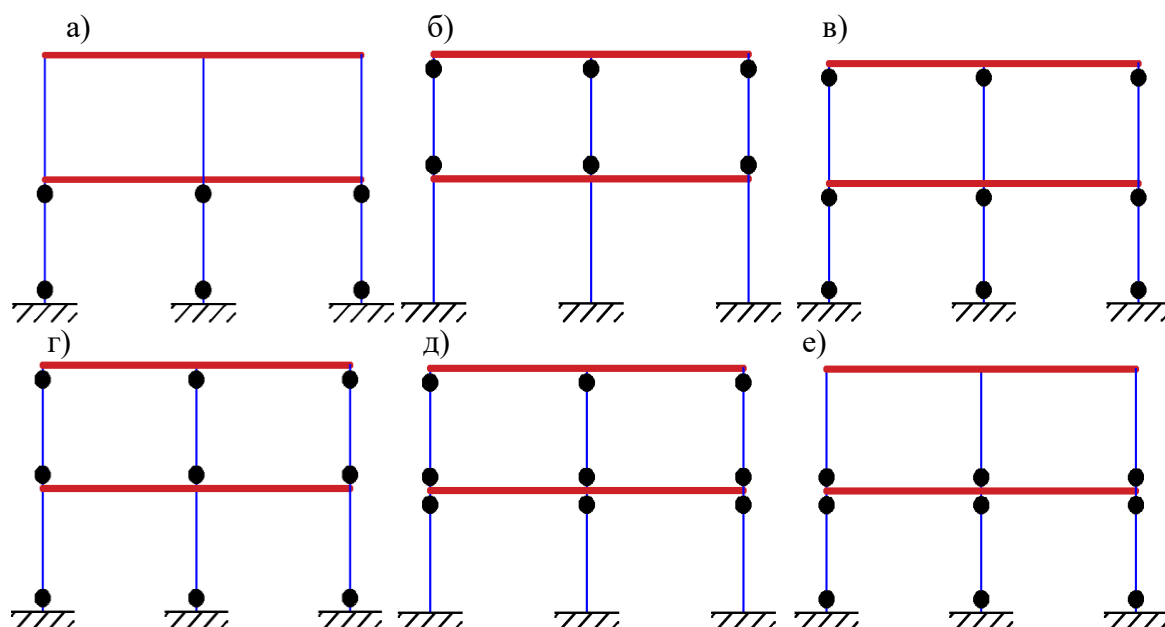
**Keywords:** seismic impact, frame systems, static indeterminacy, plastic hinges, redistribution of forces, reserve and limit states, state probabilities, system reliability, system sensitivity.

**Введение.** В отличие от некоторых технических систем в строительных конструктивных системах повреждение или разрушение, какой либо конструкции приводит, если не к отказу, то к перераспределению действующих нагрузок (усилий) между оставшимися [1-11]. При оценке вероятности безотказности зданий и сооружений эта взаимосвязь между элементами должна быть учтена, так как позволяет получить более точные оценки безотказности статически неопределимых систем.

**Постановка задачи.** В настоящей работе рассматривается задача расчета надежности и живучести рамных систем при сейсмическом воздействии с учетом возможных форм повреждения или разрушения (отказа), т.е. создания механизма за счет образования пластических шарниров в стойках рамы. Анализ форм разрушения многоэтажных рамных систем является сложной задачей, так как могут быть десятки вариантов перехода в механизм в зависимости от степени их статической неопределимости [12].

Например, мы посчитали, что двухпролетная двухэтажная рама, даже при условии абсолютно жестких дисков перекрытий, только при горизонтальных узловых нагрузках имеет 34 варианта возможных состояний при 6 разных вариантах образования механизма разрушения (рис. 1). Задачу можно несколько упростить, если рассмотреть наиболее вероятные формы разрушения, например а и б на рис. 1.

Действительно, если образуются пластические шарниры в уровне верха колонн этажа, то изгибающие моменты в уровне низа этих колонн увеличиваются в связи с перераспределением усилий, что повышает вероятность образования там пластических шарниров и наоборот.

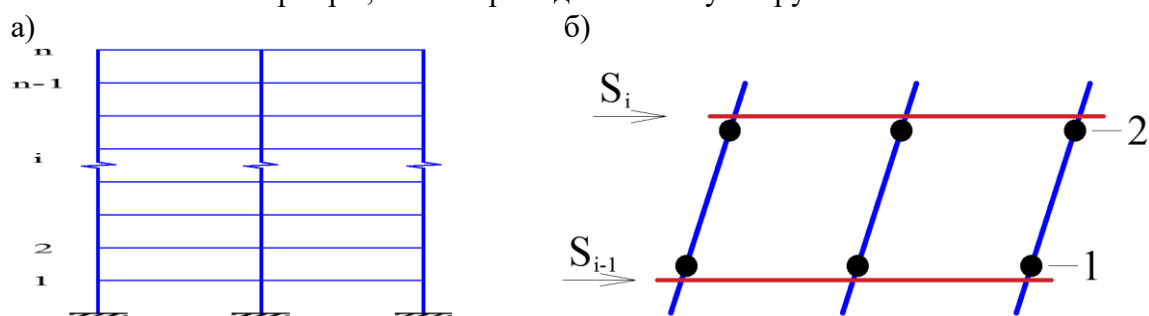


**Рис. 1. Схемы механизмов перехода рамы в предельное (отказовое) состояние в результате образования пластических шарниров в узлах стоек при горизонтальных нагрузках**

**Fig. 1. Schemes of the frame transition to the ultimate (reject) state as a result of the formation of plastic hinges in the rack nodes under horizontal loads**

На рис. 2 показана рама с  $n$ -м числом этажей, на каждом этаже по 2 сечения, образование пластических шарниров, в колоннах которых приводит к отказу системы.

Здесь если хотя бы на одном этаже в колоннах, попадающих в эти два сечения, образуются пластические шарниры, то это приводит к отказу сооружения.



**Рис. 2. Рама с  $n$  количеством этажей  
а – схема рамы; б – схема перехода  $i$ -го этажа в предельное состояние при горизонтальных нагрузках, где 1 и 2 – номера сечений.**

**Fig. 2. Frame with  $n$  number of floors  
and - the frame scheme; b - scheme of transition of the  $i$ -th floor to the limit state at horizontal loads, where 1 and 2 are section numbers.**

**Методы исследования.** Из рис. 2.б следует, что для перехода рамы в состояние отказа пластические шарниры должны быть образованы и по сечению 1 и по сечению 2. Так как перекрытия жестко охватывают колонны, усилия в колоннах по каждому сечению будут одинаковыми и поэтому можно считать, что пластические шарниры в колоннах по каждому сечению образуются одновременно.

Образование пластических шарниров или по сечению 1 или по сечению 2 не приводит к образованию механизма разрушения, что позволяет представить модель оценки надежности системы, в виде состоящей из двух параллельно соединенных элементов в каждом блоке, моделирующем этаж, как это показано на рис. 3. Исходя из того, что образование механизма разрушения хотя бы на одном этаже приводит к отказу всей системы, сами блоки в схеме соединены друг с другом последовательно.



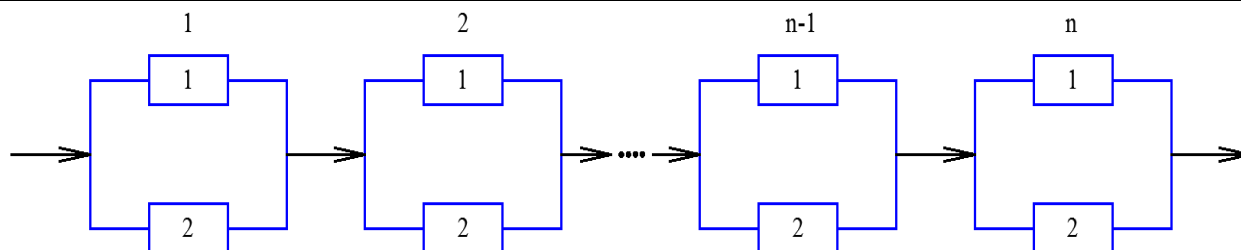


Рис. 3. Схема соединения элементов и этажей рамы  
 Fig. 3. Wiring diagram of the elements and frame floors

Тогда надежность системы в целом можно оценить в виде

$$R(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказности  $i$ -го этажа (блока).

Безотказная работа  $i$ -го этажа системы, т.е.  $i$ -го блока схемы раздельного резервирования, показанной на рис. 3, в течение времени  $t$  может быть результатом любого из следующих 3 несовместных событий:

а) оба элемента – 1 и 2 не отказывают в течение времени  $t$ .

Вероятность этого события:

$$P_i^a(t) = P_{i1}(t) \cdot P_{i2}(t), \quad (2)$$

где  $P_{i1}(t)$  и  $P_{i2}(t)$  – вероятности безотказной работы элементов в состояниях совместно-го использования в течение времени  $t$ .

б) 2 элемент не отказывает до момента  $t$ , а 1 элемент отказывает в момент  $\tau < t$ . Вероятность этого события:

$$P_i^b(t) = \int_0^t P_{i1}(\tau) P_{i2}(\tau) q_2(t - \tau) \lambda_1(\tau) d\tau. \quad (3)$$

здесь:  $q_2(t - \tau)$  – вероятность безотказной работы 2 элемента в интервале времени  $t - \tau$  в режиме одиночного использования, определенная при условии, что до момента  $\tau$  этот элемент находился в режиме совместного использования;

$\lambda_1(\tau)$  – интенсивность отказа 1 элемента в момент  $\tau$  при условии совместного использования.

в) 1 элемент не отказывает до момента  $t$ , а 2 элемент отказывает в момент  $\tau < t$ . Вероятность этого события:

$$P_i^c(t) = \int_0^t P_{i1}(\tau) P_{i2}(\tau) q_1(t - \tau) \lambda_2(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $q_1(t - \tau)$  и  $\lambda_2(\tau)$  аналогичны величинам  $q_2(t - \tau)$  и  $\lambda_1(\tau)$ .

Тогда вероятность безотказности  $i$ -го блока системы:

$$P_i(t) = P_i^a(t) + P_i^b(t) + P_i^c(t). \quad (5)$$

Исходя из того, что  $P_i(t)$  является вероятностью неперехода  $i$ -го этажа в состояние механизма, то с учетом всех этажей вероятность отказа здания оцениваем в виде:

$$Q(t) = 1 - R(t). \quad (6)$$

Немаловажное значение для принятия решения имеет и показатели живучести зданий и сооружений при экстремальных воздействиях. Под живучестью мы понимаем безотказность системы при отказе одного, двух или нескольких элементов [6,13].

В нашем случае это значит вероятности безотказности одного из 2 условных элементов на этаже за период воздействия  $t$ , если другой элемент отказал до этого момента. Значит, вероятности  $P_i^b(t)$  и  $P_i^c(t)$  можно считать количественными показателями живучести системы.

Для  $i$ -го этажа этот показатель находим так:

$$P_i^*(t) = P_i^{\bar{o}}(t) \cdot P_i^e(t). \quad (7)$$

В целом для здания:

$$R^*(t) = \prod_{i=1}^n P_i^*(t). \quad (8)$$

Если  $P_i^{\bar{o}}(t) = P_i^e(t)$ , т.е. вероятности необразования пластических шарниров в сечениях 1 и 2 равны друг к другу в режимах совместного и одиночного использования, то

$$P_i^{\bar{o}}(t) = P_i^e(t) = \bar{P}(t). \quad (9)$$

Тогда выражения (5) и (7) можно будет записать в виде:

$$P_i(t) = P_i^a(t) + 2\bar{P}_i(t); \quad (10)$$

$$P_i^*(t) = \bar{P}_i^2(t). \quad (11)$$

Переходы вышеприведенной системы в состояния, вызываемые образованием пластических шарниров в стойках, можно описать марковским случайным процессом с непрерывным временем и дискретными состояниями [14,15], так как при стационарных случайных колебаниях процесс будет ординарным и отсутствующим последствия. То есть вероятности переходов системы в последующие состояния будут зависеть только от того, в каком состоянии система находится в данный момент времени. При этом интенсивности переходов будут постоянными во времени.

Тогда выражение для оценки вероятности безотказности системы в  $i$ -том уровне  $P_i(t)$  будет иметь вид [16]:

$$P_i(t) = e^{-2\lambda_i t} + \frac{2\lambda_i}{\bar{\lambda}_i - 2\lambda_i} (e^{-2\lambda_i t} - e^{-\bar{\lambda}_i t}). \quad (12)$$

Здесь:  $\lambda_i$  интенсивность образования пластических шарниров, т.е. выключения 1 или 2 условного элемента в режиме совместного их использования;

$\bar{\lambda}_i$  – интенсивность выключения условного элемента в режиме, когда другой элемент уже выключен.

Вероятностную оценку живучести системы в  $i$ -том уровне находим так:

$$P_i^*(t) = e^{-2\bar{\lambda}_i t}. \quad (13)$$

**Обсуждение результатов.** Возможность реализации данного подхода покажем на примере простейшей системы. На рис.4 показана последовательность образования пластических шарниров в однопролетной одноэтажной раме с жестким ригелем от преобладающей горизонтальной сейсмической нагрузки.

Состояние  $H_0$  – это начальное,  $H_1$  – соответствует образованию пластических шарниров в уровне верха стоек (сечение 1-1), состояние  $H_2$  – соответствует в уровне низа стоек (сечение 2-2). Состояние  $H_3$  соответствует механизму разрушения рамы (отказу системы). Учитывая, что до перехода рамы в отказовое состояние возможны два безотказовых состояния, раму можно представить как систему с двумя параллельно соединенными элементами. Так как стойки рамы являются одинаковыми и равномерно нагруженными как в начальном, так и промежуточных состояниях, оба элемента в расчетной модели также можно принять одинаковыми. Это позволяет надежность системы оценить по выражению (12). В табл. 1 приведены количественные оценки надежности рамы, полученные при представлении её как системы с одним элементом и как системы с двумя параллельно соединенными элементами. Принято, что отказ рамы наступает при превышении расчетного уровня ускорения для системы, определенного в виде [17]:

$$[W] = Ag\beta \quad (14)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\beta$  – коэффициент динамичности,  $A$  – коэффициент сейсмичности.

Рассмотрены варианты расчета рамы на 8 и 9 баллов при первой категории грунта по сейсмическим свойствам. Сейсмическое воздействие представлено в виде «белого шума» со спектральной плотностью  $S_0 = 50 \text{ см}^2/\text{рад} \cdot \text{с}^3$ , что соответствует спектральной плотности акселерограммы землетрясения Эль-Центро 1940г.

Продолжительность воздействия принята равной  $t=10\text{с}$ . Интенсивность образования пластических шарниров в условном элементе определена в виде:

$$\lambda = \frac{\omega}{\pi} \exp[-[W]^2/2(\sigma_y \omega^2)^2], \quad (15)$$

где  $\omega$  - частота собственных колебаний системы в рассматриваемом состоянии;

$\sigma_y$  - среднеквадратичная величина перемещения системы в рассматриваемом состоянии.

Дисперсия перемещения верха стоек рамы определена по формуле [18]:

$$\sigma_y^2 = \frac{\pi}{2} \frac{S_0}{\xi \omega^3}, \quad (16)$$

где  $\xi$  – коэффициент затухания системы.

Принятые и полученные данные для расчета надежности рамы приведены в табл. 2.

Здесь в графе НС приведены данные, полученные для рамы в начальном состоянии (рис.4 а), а в графе ПС – для рамы с шарнирами пластичности в верхних или нижних узлах (рис.4 б, в).

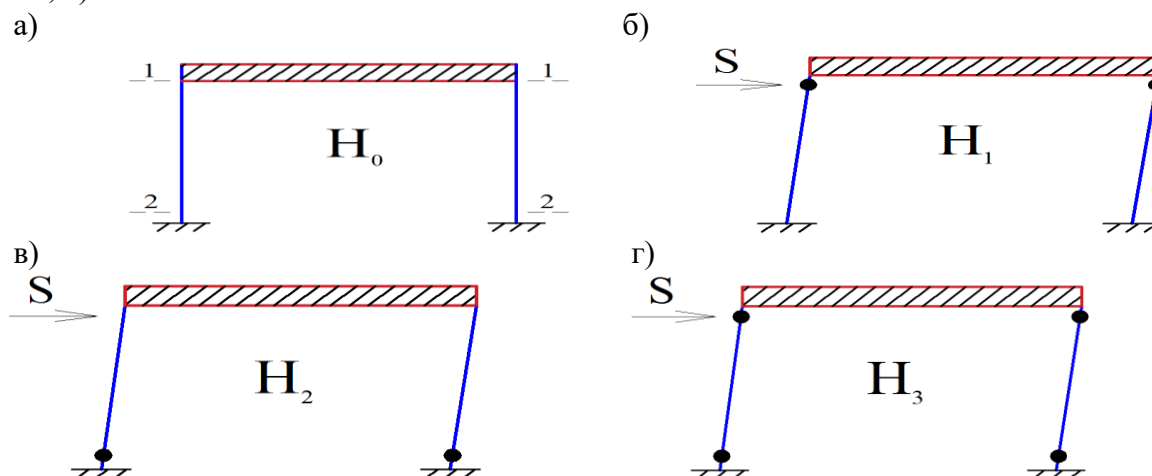


Рис. 4. Последовательность образования пластических шарниров в раме

Fig. 4. The sequence of formation of plastic hinges in the frame

Из табл. 1, 2 следует, что учет возможных промежуточных безотказовых состояний статически неопределимых рам, по вышеприведенной методике расчета, позволяет выявить существенные резервы надежности, заложенные в этих системах.

Таблица 1. Надежность рамы

Table 1. Frame reliability

Расчетная балльность рамы Estimated Frame Rating	Показатель вероятности безотказности рамы Frame Reliability Probability Index	
	при одноэлементной расчетной модели with a singleton calculation model	при двухэлементной расчетной модели with two-element calculation model
J=8 баллов points	0,3230	0,8474
J=9 баллов points	0,999958	0,999999

**Таблица 2. Исходные данные для расчета надежности рамы**  
**Table 2. Baseline data for calculating the reliability of the frame**

Период собственных колебаний $t$ , с Period of natural oscillations $t$ , s		Коэффициент затухания, $\xi$ Attenuation coefficient, $\xi$		$\sigma_y$ , см		Предельное ускорение $[W]$ , см/с <sup>2</sup> Acceleration limit	
нс	пс	нс	пс	нс	пс	нс	пс
0,6	1,2	0,05	0,1	1,17	2,34	J=8 баллов points	
						333	166
						J=9 баллов points	
						666	332

**Вывод.** Разработана модель оценки надежности рамных систем с жесткими дисками перекрытий учитывающая перераспределение усилий в стойках при образовании пластических шарниров в процессе сейсмических колебаний. Приведены выражения по оценке живучести при сейсмическом воздействии рамных систем с повреждениями в виде пластических шарниров в узлах. Установлено, что учет перераспределения усилий между элементами статически неопределимых строительных систем при повреждениях отдельных из них позволяет выявить дополнительные резервы их надежности.

#### Библиографический список:

1. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность/ А.Р. Ржаницын. М.: Стройиздат. 1978. 239с.
2. Болотин, В.В. Методы теорий вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений/ В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1982. 351с.
3. Капур, К. Надежность и проектирование систем/ К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. 604с.
4. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. – М.: Стройиздат, 1988. -584с.
5. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании/ В.Д. Райзер. – М.: Изд-во АСВ, 1998. 302с.
6. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций/ А.В. Перельмутер. – М.: Изд-во АСВ, 2007. 256с.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций/ А.С. Лычев// Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2008. 184с.
8. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений/ А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Аль-Насер Мохамед Самих Амин. – С. ПБ.: Изд. ВНИИГ, 1993. -175с.
9. Абакаров, А.Д. Надежность конструкций с параллельным резервированием элементов при случайных воздействиях /А.Д. Абакаров // Строительная механика и расчет сооружений. 1987. 1. с. 6-10.
10. Gasparini, D.A. Response of MDOF Sustems to Nonstationary Random Excitation/ D.A. Gasparini// J. Eng. Mech..Div, 1979. Vol .105, EN1, pp 13-26.
11. Der Kiureghian, A. A Response Spectrum Method for random vibration analusis of MDF Sustems/ A. Der Kiureghian // Jornal of Earth. Eng. And StructDunamics, 1981. Vol 9, pp. 419-435.
12. Тихий М. Расчет железобетонных рамных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий/ М. Тихий, Й. Ракосник.- Пер. с чешск. М.: Стройиздат., 1976. 198 с.
13. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.:Знание, 1987. 56 с.
14. Пугачев, В.С. Теория случайных функций/ В.С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1960. 383с.
15. Тихонов, В.И. Марковские случайные процессы/ В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Совет. радио, 1977. 485с.
16. Напетваридзе, Ш.Г. Вероятностные оценки сейсмических нагрузок/ Ш.Г. Напетваридзе, Б.А. Кириков, А.Д. Абакаров. М.: Наука, 1987. 120с.
17. Свод правил СП 14.13330. 2014 «Строительство в сейсмических районах». СНиП -7-81.М.: Минстрой России, 2014. 124с.
18. Болотин, В.В. К расчету строительных конструкций на сейсмические воздействия / В.В. Болотин // Строительная механика и расчет сооружений. 1980. №1. с. 9-14.

#### References:

1. Rzhnitsyn, A.R. Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktсий na nadezhnost'/ A.R. Rzhnitsyn. M.: Stroyizdat. 1978. 239s. [Rzhnitsyn, A.R. Theory of calculation of building structures for reliability / A.P. Rzhnitsyn. M.: Stroyizdat, 1978. 239s. (In Russ)]

2. Bolotin V.V. Metody teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy/ V.V. Bolotin. – M.: Stroyizdat, 1982. 351s. [Bolotin, V.V. Methods of the theories of probability and the theory of reliability in the calculations of structures / V.V. Bolotin. – M.: Stroyizdat, 1982. 351s. (In Russ)]
3. Kapur K. Nadezhnost' i proyektirovaniye sistem/ K. Kapur, L. Lamberson.–M.: Mir, 1980. 604s. [Kapur, K. Reliability and system design / K. Kapur, L. Lamberson. M.: World -1980. 604c. (In Russ)]
4. Augusti G. Veroyatnostnyye metody v stroitel'nom proyektirovanii/ G. Augusti, A. Baratta, F. Kashiati.–M.: Stroyizdat, 1988. - 584s. [Augusti, G. Probabilistic methods in building design / G. Augusti, A. Baratta, F. Kashiati. – M.: Stroyizdat, 1988. 584c. (In Russ)]
5. Rayzer V.D. Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proyektirovanii/ V.D. Rayzer.–M.: Izd-vo ASV, 1998. 302s. [Raiser V.D. Theory of reliability in building design / V.D. Raiser. –M.: Publishing house DIA, 1998. -302c. (In Russ)]
6. Perel'muter, A.V. Izbrannyye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstruksiy/ A.V. Perel'muter.– M.: Izd-vo ASV, 2007. 256s. [Perel'muter A.V. Selected problems of reliability and safety of building structures / A.V. Perel'muter. – M.: Publishing House DIA, 2007. -256c. (In Russ)]
7. Lychev A.S. Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy/ A.S. Lychev// Uchebnoye posobiye. –M.: Izd-vo ASV, 2008. 184s. [Lychev A.S. Reliability of building structures / A.S. Lychev // Study Guide. –M.: Publishing house DIA, 2008. 184c. (In Russ)]
8. Uzdin A.M. Osnovy teorii seymstoykosti i seymstoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy/ A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Al'-Naser Mokhamed Samikh Amin. S. PB.: Izd. VNIIG, 1993. 175s. [Uzdin A.M. Fundamentals of the theory of seismic resistance and seismic resistant construction of buildings and structures / A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Al'-Nasser Mohamed Samih Amin. S. PB.: Ed.VNIIG, 1993. 175s. (In Russ)]
9. Abakarov, A.D. Nadezhnost' konstruksiy s parallel'nym rezervirovaniyem elementov pri sluchaynykh vozdeystviyakh /A.D. Abakarov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 1987. 1. s. 6-10. [Abakarov A.D. Reliability of structures with parallel redundancy of elements under random effects / A.D. Abakarov // Construction mechanics and calculation of structures. - 1987. -№1. -with. 6-10. (In Russ)]
10. Gasparini, D.A. Response of MDOF Sustems to Nonstationary Random Excitation / D.A. Gasparini // J. Eng. Mech..Div, 1979. Vol 105, EN1, pp. 13-26.
11. Der Kiureghian A. A Sustems / A. Der Response Spectrum Method for random vibration // Jornal of Earth. Eng. And StructDunamics, 1981. Vol 9, pp. 419-435.
12. Tikhiiy M. Raschet zhelezobetonnykh ramnykh konstruksiy v plasticheskoy stadii. Pereraspredeleniye usiliy/ M. Tikhiiy, Y. Rakosnik.- Per. s cheshsk. M.: Stroyizdat., 1976. 198 s. [Tikhiiy, M. Calculation of reinforced concrete frame structures in the plastic stage. Redistribution of efforts / M. Tikhiiy, Y. Rakosnik. - Per. with Czech M.: Stroyizdat., 1976. 198 p. (In Russ)]
13. Cherkosov G.N. Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem. M.: Znaniye, 1987. 56 s. [Cherkosov G.N. Methods and models for assessing the survivability of complex systems. M.: Knowledge, 1987. 56 p. (In Russ)]
14. Pugachev V.S. Teoriya sluchaynykh funktsiy/ V.S. Pugachev. – M.: Fizmatgiz, 1960. 383s. [Pugachev V.S. Theory of random functions / V.S. Pugachev. M.: Fizmatgiz, 1960. 383p. (In Russ)]
15. Tikhonov, V.I. Markovskie sluchaynyye protsessy/ V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. M.: Sovet. radio, 1977. 485s. [Tikhonov V.I. Markov random processes / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. M.: Sovet.radio, 1977. 485p. (In Russ)]
16. Napetvaridze, SH.G. Veroyatnostnyye otsenki seymicheskikh nagruzok/ SH.G. Napetvaridze, B.A. Kiri-kov, A.D. Abakarov. M.: Nauka, 1987. 120s. [Napetvaridze Sh.G. Probabilistic estimates of seismic loads / Sh.G. Napetvaridze, B.A. Kirikov, A.D. Abakarov. M.: Science, 1987. 120s. (In Russ)]
17. Svod pravil SP 14.13330. 2014 «Stroitel'stvo v seymicheskikh rayonakh». SNiP -7-81.M.: Minstroy Rossii, 2014. 124c. [The code of rules of the joint venture 14. 13330. 2014 "Construction in seismic areas". SNiP -7-81. M.: Minstroy of Russia, 2014. 124c. (In Russ)]
18. Bolotin, V.V. K raschetu stroitel'nykh konstruksiy na seymicheskiye vozdeystviya / V.V. Bolotin // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 1980. №1. s. 9-14. [Bolotin V.V. To the calculation of building structures for seismic effects / V.V. Bolotin // Construction mechanics and calculation of structures. 1980. №1. pp. 9-14. (In Russ)]

#### Сведения об авторах.

**Абакаров Абакар Джансулаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура».

**Гасанов Руслан Гасанович** – ассистент, кафедра «Архитектура».

#### Information about the authors.

**Abakar J. Abakarov** – Dr. Sc. (Technical), Prof., Department of «Architecture».

**Ruslan G. Gasanov** – Assistant of the Department «Architecture».

#### Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 18.02.2019.

**Принята в печать** 07.04.2019.

#### Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 18.02.2019.

**Accepted for publication** 07.04.2019.

**Для цитирования:** Абакаров М.С., Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчет напряженно-деформированного состояния трёхслойных труб симметричной и несимметричной структуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (2):126-135. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-126-135

**For citation:** Abakarov M.S., Vishtalov R.I., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Calculation of stressed-deformed state of three-layer pipes of symmetric and asymmetric structure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(2):126-135. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-126-135

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-126-135

### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЁХСЛОЙНЫХ ТРУБ СИММЕТРИЧНОЙ И НЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Абакаров М.С.<sup>4</sup>, Вишталов Р.И.,<sup>3</sup> Муселемов Х.М.<sup>2</sup>, Устарханов О.М.<sup>1</sup>

<sup>1-4</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1-4</sup> 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, <sup>2</sup> e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,

<sup>3</sup> e-mail: [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru), <sup>4</sup> e-mail: 05\_upr@rosreestr.ru

**Резюме. Цель.** Трубопроводные конструкции на сегодняшний день занимают важные позиции в инфраструктурах многих стран. Магистральные сооружения влияют на экономику, промышленность. С каждым годом к показателям надёжности этих конструкций добавляются новые требования безопасности. В данной статье рассматривается оценка эффективности трёхслойных труб симметричной и несимметричной структуры. Для этого исследуется напряженно-деформированное состояние трехслойных труб из разных материалов при действии внутреннего давления. **Метод** Расчет проводится численными методами, а именно с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в ПК «ЛИРА». **Результат** Расчет труб выполнен, на нагрузку от транспортируемой среды, приложенный к внутреннему контуру трубы. При этом для трехслойной труб всех вариантов, определялись  $N_x$  растягивающие напряжения вдоль образующей,  $N_y$  кольцевые растягивающие напряжения и  $T_{xy}$  сдвигающие напряжения в плоскости  $xy$ . Приведены изополя растягивающих и касательных напряжений. **Вывод** Полученные численные результаты, показали, что применение в качестве материала для изготовления несущих несимметричных слоёв менее деформативного материала приводит к перераспределению напряжений в несущих слоях и заполнителе и это необходимо учитывать при проектировании трёхслойных труб

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, трехслойные конструкции, заполнитель, несущие слои, симметричной и несимметричной структуры

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### CALCULATION OF STRESSED-DEFORMED STATE OF THREE-LAYER PIPES OF SYMMETRIC AND ASYMMETRIC STRUCTURE

Marat S. Abakarov<sup>4</sup>, Rajab I. Vishtalov<sup>3</sup>, Hayrulla M. Muselemov<sup>4</sup>, Osman M. Ustarkhanov<sup>1</sup>

<sup>1-4</sup> Daghestan State Technical University,

<sup>1-4</sup> 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>1</sup> e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, <sup>2</sup> e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,

<sup>3</sup> e-mail: [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru), <sup>4</sup> e-mail: 05\_upr@rosreestr.ru

**Abstract Objectives** This article discusses the evaluation of the effectiveness of three-layer pipes of a symmetric and asymmetric structure. For this, the stress-strain state of three-layer pipes of different materials under the influence of internal pressure is investigated. Pipeline structures today occupy important positions in the infrastructures of many countries. Trunk structures affect the economy, industry. Every year, new safety requirements are added to the reliability indicators of these structures. **Method** The calculation is carried out by numerical methods, namely using the finite element method (FEM), implemented in the LIRA PC. **Result** The calculation of the pipes is performed, on the load from the transported medium, applied to the inner contour of the pipe. Moreover, for three-layer pipes of all variants,  $N_x$  tensile stresses along the generatrix,  $N_y$  ring tensile stresses and  $T_{xy}$  shear stresses in the  $xy$  plane were determined. Isopoles of tensile and shear stresses are given. **Conclusion** The numerical results showed that the use of less deforming material as a material for the manufacture of asymmetric bearing layers leads to a redistribution of stresses in the bearing layers and aggregate, and this must be taken into account when designing three-layer pipes

**Acknowledgment** This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (MK-6112.2018.8).

**Keywords:** finite element method, three-layer structures, aggregate, load-bearing layers, symmetric and asymmetric structure

**Введение.** Как известно, трехслойные конструкции могут быть симметричной и несимметричной структуры, т.е. они могут быть изготовлены из наружного и внутреннего слоев имеющие различные толщины или изготовлены из разных материалов. В журнале [3] была опубликована статья о возможности применения трехслойных труб при транспортировке различных сред, отличительной особенностью которых является наличие трех конструктивных элементов - наружного слоя, заполнителя и внутреннего слоя (рис.1). Такая компоновка конструкции труб позволяет повысить её жесткость, уменьшит вес и кроме этого по ней можно будет транспортировать две различные среды.

Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Заполнитель воспринимает поперечные силы при изгибе и обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Элементы каркаса обеспечивают местную жесткость конструкции при действии сосредоточенных усилий и в местах крепления повышают сопротивление усталости [4,5,16].

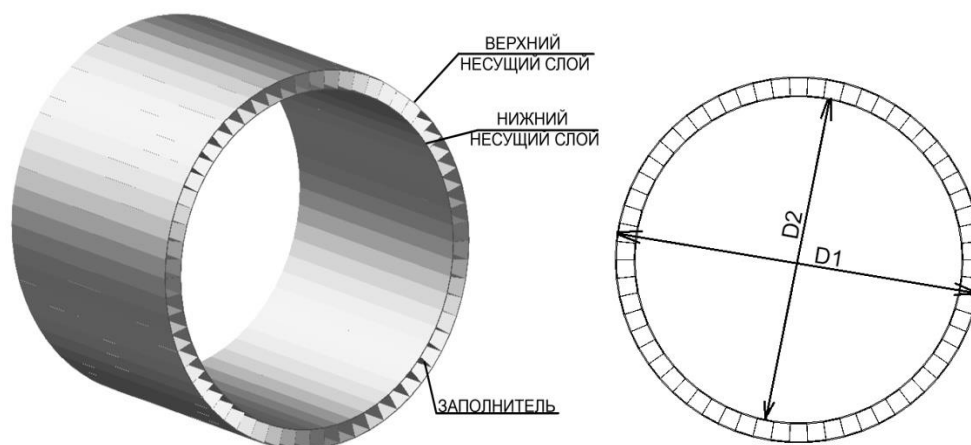
Заполнитель в трехслойной конструкции играет важную роль, обеспечивая совместность работы несущих слоев и, это зависит от его формы и жесткости. В данной статье заполнитель принят, как в предыдущей статье [3].

**Постановка задачи.** При проектировании трехслойных труб возникает необходимость повысить его несущую способность или предать ей определенные свойства [15,17] (например, уменьшить теплопроводность), в этом случае их можно проектировать несимметричной структурой, т.е., при этом, менять толщину слоев или их физико-механические свойства (например, материал) [9,11].

Для правильного проектирования трехслойных труб необходимо знать влияние этих изменений на работу конструкции.

Исходя из выше сказанного, в статье рассматривается задача по оценке влияния на несущую способность трехслойной трубы изменение материала слоев.

В статье для расчета трехслойных труб в качестве основного внешнего воздействия принято внутреннее давление транспортируемой среды [1, 2, 12-14].



**Рис. 1. Общий вид трехслойной трубы**  
**Fig. 1. General view of a three-layer pipe**

**Методы исследования.** Как известно настоящую революцию в строительной механике и теории упругости произвело появление метода конечных элементов (МКЭ).

В настоящее время у инженеров и научных работников востребованы программные комплексы, ориентированные на строительную область, в основу которых заложен МКЭ [6-8]. Так, в России и странах ближнего зарубежья наибольшей популярностью пользуются программные комплексы STARK, SCAD и LIRA, основанные на нормах и стандартах данного региона.

В работе сделан выбор в пользу программного комплекса LIRA (ПК ЛИРА) в котором реализованы основные положения МКЭ. Выбор расчетной схемы для МКЭ в перемещениях легко поддается алгоритмизации, что делает этот метод привлекательным с точки зрения применения современных компьютерных технологий [6-10].

Приняты для расчета четыре варианта трехслойных труб:

1- симметричная трехслойная труба в котором несущие слои приняты из сплава алюминия АМГ2-Н с толщиной  $t_{bc} = t_{nc} = 1$  мм, заполнитель из сплава алюминия Д16-АТ толщиной  $t_{зап} = 0.24$  мм;

2- симметричная трехслойная труба в котором несущие слои приняты из стали толщиной  $t_{bc} = t_{nc} = 1$  мм, заполнитель из сплава алюминия Д16-АТ толщиной  $t_{зап} = 0.24$  мм;

3- несимметричная трехслойная труба в котором верхний слой изготовлен из АМГ2-Н толщиной  $t_{bc} = 1$  мм, нижний слой из стали толщиной  $t_{nc} = 1$  мм, заполнитель из Д16-АТ толщиной  $t_{зап} = 0.24$  мм;

4 - несимметричная трехслойная труба в котором верхний слой изготовлен из стали толщиной  $t_{bc} = 1$  мм, нижний слой из АМГ2-Н толщиной  $t_{nc} = 1$  мм, заполнитель из Д16-АТ толщиной  $t_{зап} = 0.24$  мм.

Несущий слой – толщина 1 мм, материал: алюминий АМГ2-Н ( $E=69000$  МПа,  $\nu=0,35$ ,  $\rho=26,8$  кН/м<sup>3</sup>);

Несущий слой – толщина 1 мм, материал: сталь ( $E=2,1 \cdot 10^6$  МПа,  $\nu=0,3$ ,  $\rho=78,5$  кН/м<sup>3</sup>);

Дискретный заполнитель – толщина 0,24 мм, материал: алюминий Д16-АТ ( $E=69000$  МПа,  $\nu=0,35$ ,  $\rho=26,8$  кН/м<sup>3</sup>). Рассчитывались трубы, имеющие следующие размеры - наружный диаметр  $D1=100$  см, внутренний диаметр  $D2=90$  см (рис.1);



Расчет производим для среднего участка бесконечной трубы, как это было отмечено в статье [5]. При этом, напряженно-деформированное состояние трубы на участках, примыкающих к связям в расчет не берем.

Расчет производился на равномерно распределенную нагрузку приложенную к внутреннему несущему слою трубы.

**Обсуждение результатов.** Как было отмечено выше, расчет труб выполнен на нагрузку от транспортируемой среды, приложенный ко внутреннему слою трубы.

При этом для всех вариантов труб определялись кольцевые, растягивающие и сдвигающие напряжения  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$ .

Результаты расчета трёхслойной трубы для одного из вариантов, показаны на рис. 2–10 и в табл.1.

**Таблица 1. Напряжения в элементах трёхслойной трубы**  
**Table 1. Stresses in the elements of a three-layer pipe**

№ /п N o	Варианты труб Piping options	Первый вариант (симметричный) First option (symmetrical)			Второй вариант (симметричный) Second option (symmetrical)			Третий вариант (несимметричный) Third option (asymmetric)			Четвёртый вариант (несимметричный) Fourth option (unbalanced)		
		в.н.с.	н.н.с.	зап.	в.н.с.	н.н.с.	зап.	в.н.с.	н.н.с.	зап.	в.н.с.	н.н.с.	зап.
1	слой layer												
2	металл metal	АМГ 2-Н	АМГ 2-Н	Д16- АТ	стал ь steel l	сталь steel	Д1 6- АТ	АМГ 2-Н	Стал ь steel	Д16 -АТ	сталь steel	АМГ 2-Н	Д16- АТ
3	$N_x$ , растягивающие напряжения вдоль образующей, т/м <sup>2</sup> $N_x$ , tensile stresses along the generatrix, t / m <sup>2</sup>	105	127	127	101	133	133	52,9	206	206	163	52,9	163
4	$N_y$ , кольцевые растягивающие напряжения, т/м <sup>2</sup> $N_y$ , ring tensile stresses, t / m <sup>2</sup>	24,4	31,4	31,4	12,4	19,7	19,7	17	36,9	36,9	22,1	14,1	22,1
5	$T_{xy}$ , сдвигающие напряжения в плоскости xy, т/м <sup>2</sup> $T_{xy}$ , shear stresses in the xy plane, t / m <sup>2</sup>	0518	0,525	0,525	0,875	0,853	0,875	3,06	2,98	3,06	2,15	2,1	2,15

Несимметричная труба вариант 3 (нижний несущий слой из АМГ2-Н, верхний несущий слой из стали, заполнитель Д16-АТ) Asymmetric pipe option 3 (lower bearing layer from АМГ2-N, upper bearing layer from steel, aggregate D16-AT).

На рис. 2-4 показаны максимальные напряжения  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$  в верхнем несущем слое несимметричной трёхслойной трубе от действия равномерно-распределённой нагрузки на нижний несущий слой.

Эти напряжения сравнивались с напряжениями в верхнем несущем слое  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$  симметричной трёхслойной трубы (вариант 1).

Результаты сравнений приведены в выводах пункта 2.

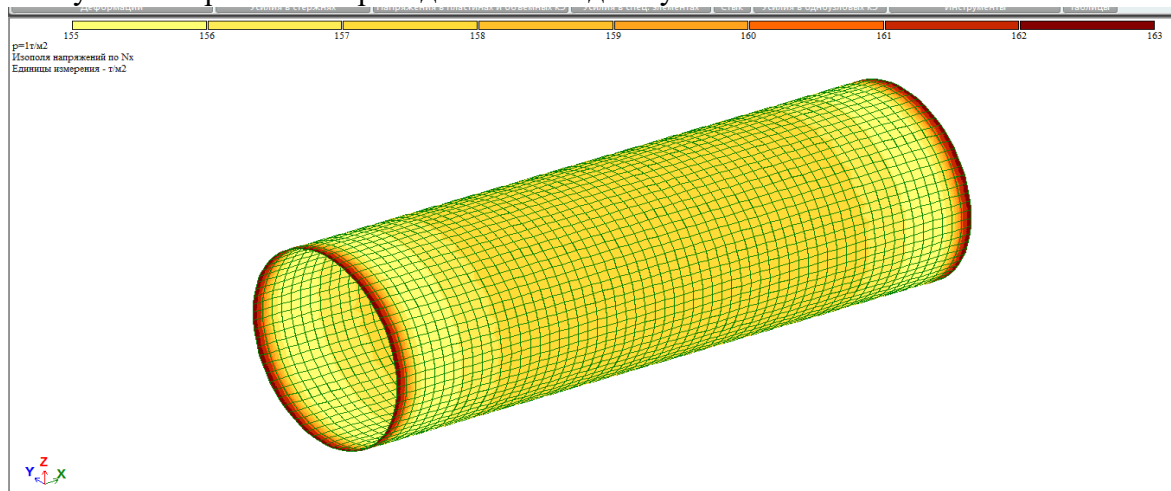


Рис. 2. Напряжения  $N_x$  на наружном слое  
Fig. 2.  $N_x$  stresses on the outer layer

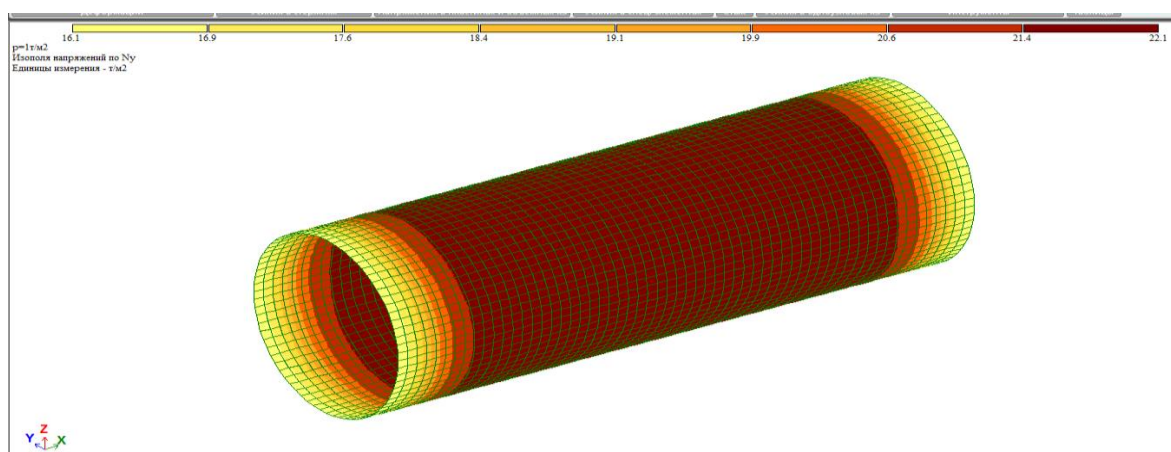


Рис. 3. Напряжения  $N_y$  на наружном слое  
Fig. 3.  $N_y$  stresses on the outer layer

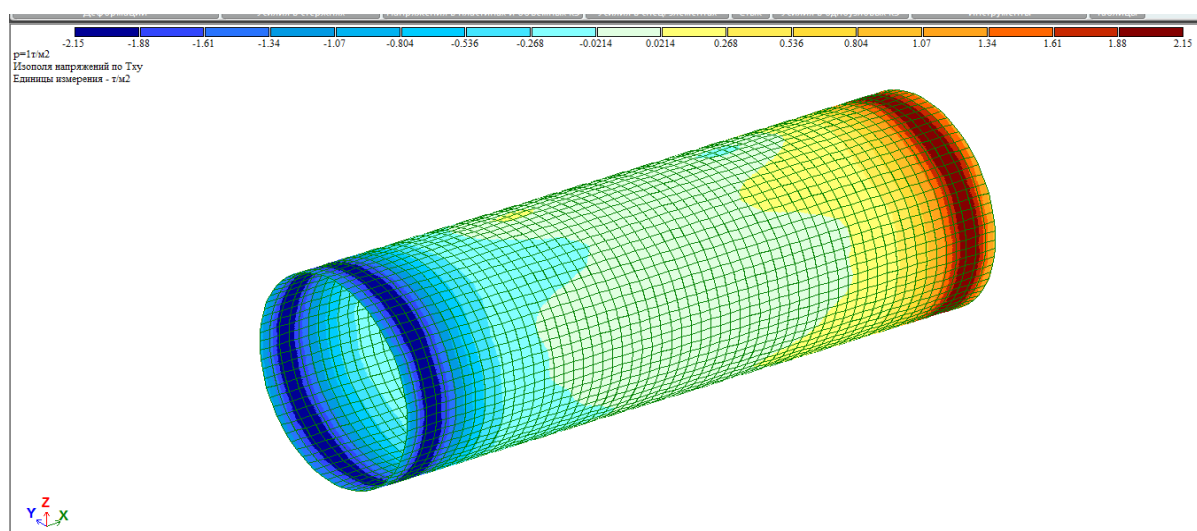


Рис. 4. Напряжения  $T_{xy}$  на наружном слое  
Fig. 4. Stresses  $T_{xy}$  on the outer layer

На рис. 5-7 показаны максимальные напряжения  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$  в нижнем несущем слое несимметричной трёхслойной трубе от действия равномерно-распределённой нагрузки на нижний несущий слой.

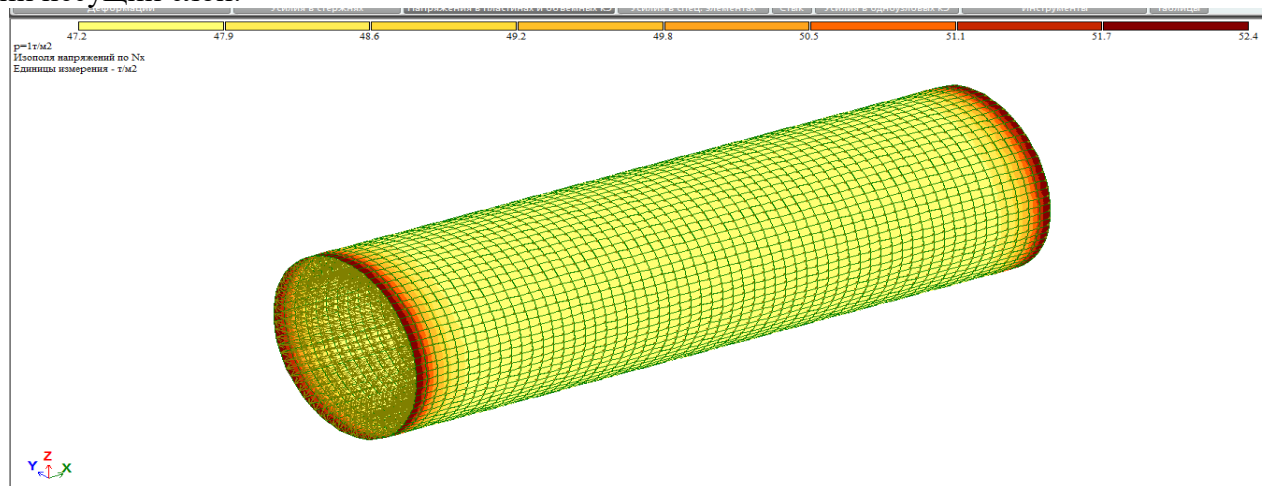


Рис.5. Напряжения  $N_x$  на внутреннем слое  
Fig. 5. Stresses  $N_x$  Inner Layer

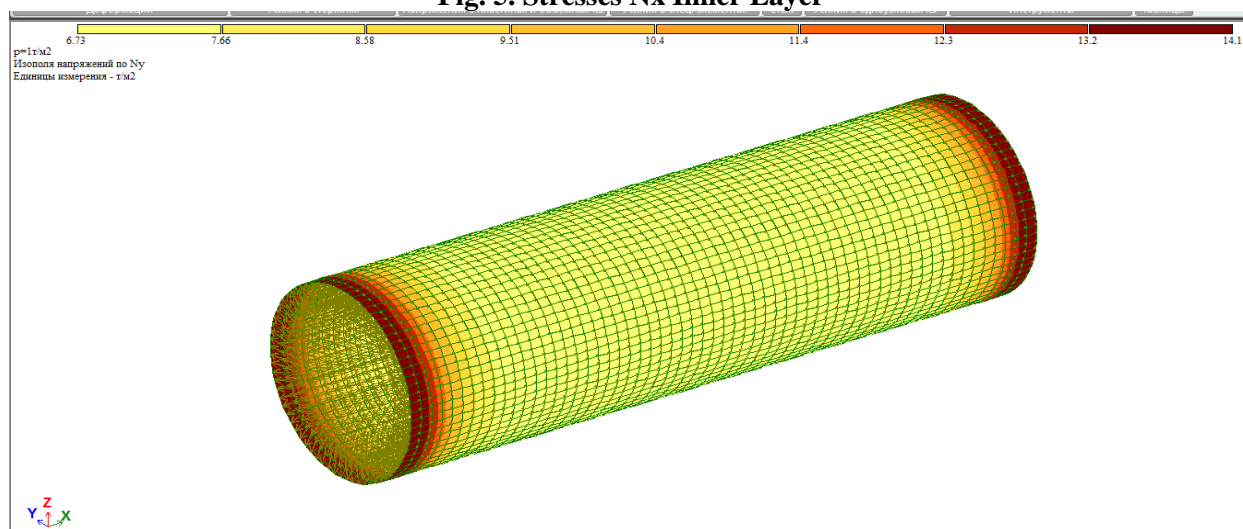


Рис.6. Напряжения  $N_y$  на внутреннем слое  
Fig. 6.  $N_y$  stresses on the inner layer

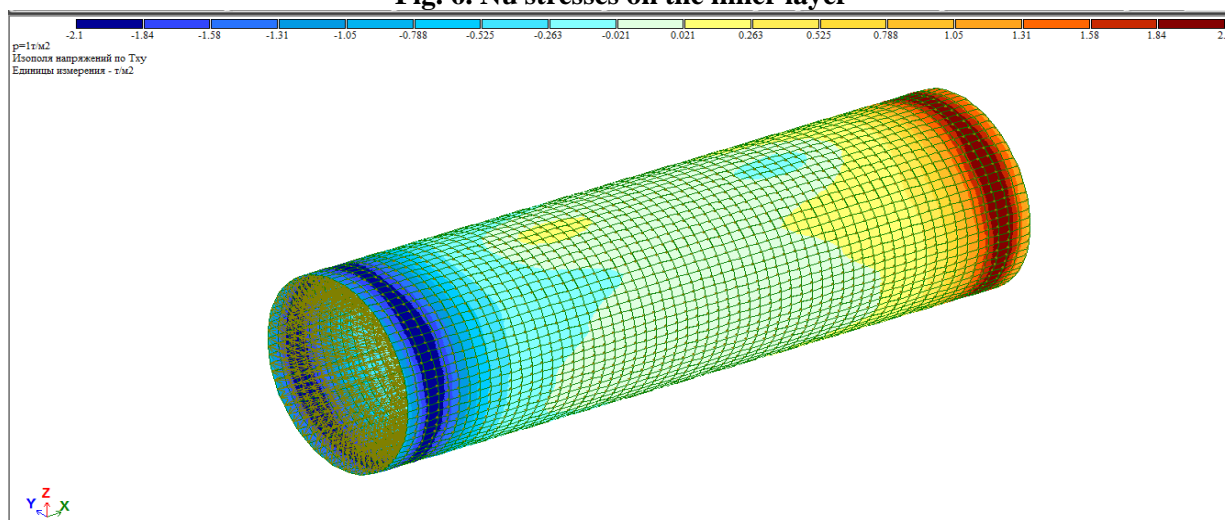


Рис. 7. Напряжения  $T_{xy}$  на внутреннем слое  
7. Stresses  $T_{xy}$  inner layer

На рис. 8-10 показаны максимальные напряжения  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$  в заполнителе несимметричной трёхслойной трубе от действия равномерно-распределённой нагрузки на нижний несущий слой. Эти напряжения сравнивались с напряжениями в заполнителе  $N_x$ ,  $N_y$  и  $T_{xy}$  симметричной трёхслойной трубы (вариант 1). Результаты сравнений приведены в выводах пункта 2.

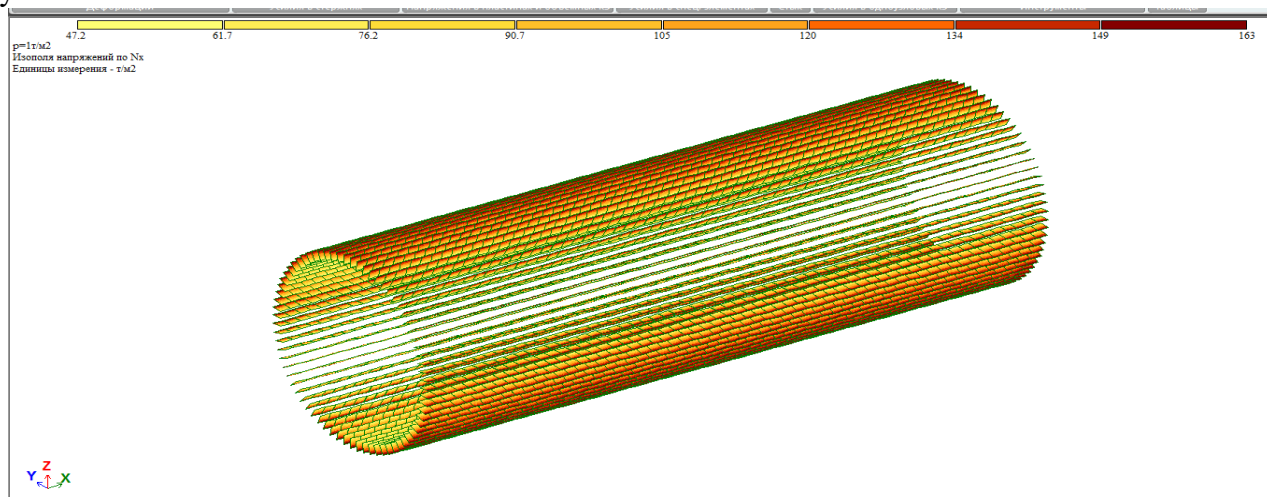


Рис. 8. Напряжения  $N_x$  на среднем слое  
 Fig. 8. Voltages  $N_x$  middle layer

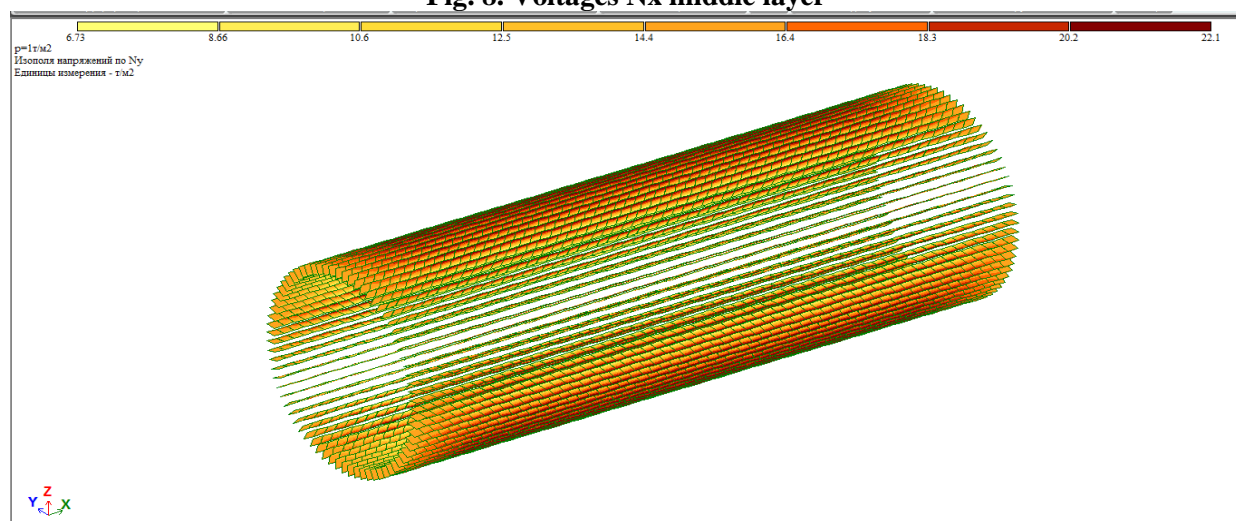


Рис. 9. Напряжения  $N_y$  на среднем слое  
 Fig. 9. Stresses in the middle layer

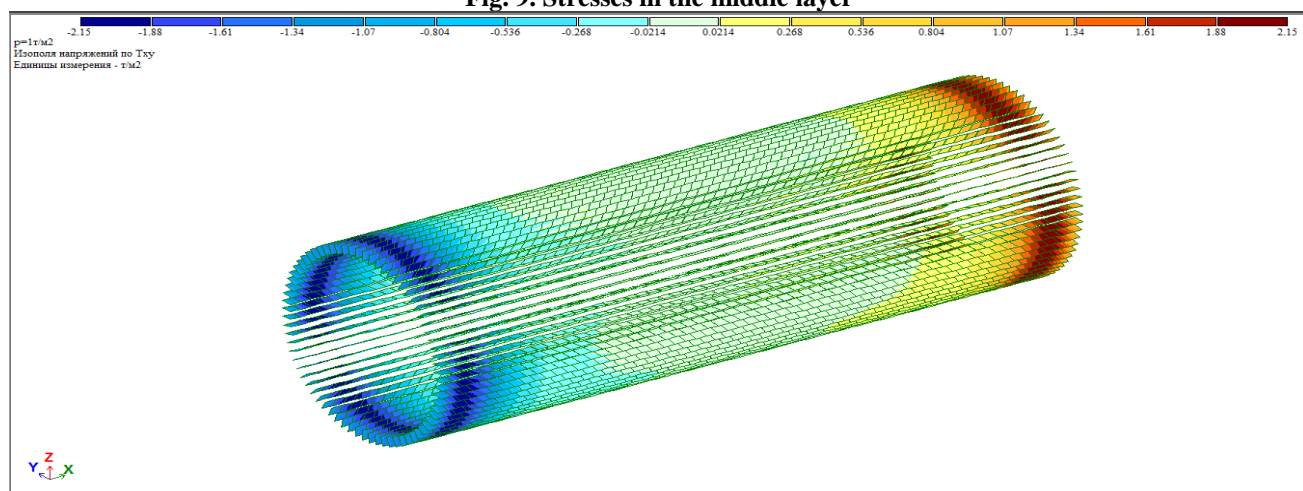


Рис.10. Напряжения  $T_{xy}$  на среднем слое  
 Fig. 10.  $T_{xy}$  stress middle layer

**Вывод.** Анализ результатов расчёта трёхслойных труб показал:

Применение в качестве несущих слоёв в трёхслойной трубе менее деформативного материала (например, стали см. вар.1 и 2) привёл к тому, что напряжение  $N_x$  незначительно изменились (до 0,7%), напряжения  $N_y$  уменьшились значительно (до 50%), сдвигающие напряжения  $T_{xy}$  увеличились (до 68,8%).

Замена в нижнем несущем слое материала АМГ2-Н (вариант 1) на сталь (вариант 3), привело к тому, что:

А) напряжение  $N_x$  в верхнем несущем слое уменьшилась на 49,6%, в нижнем несущем слое и в заполнителе увеличились на 62,2%;

Б) напряжение  $N_y$  в верхнем несущем слое уменьшилась на 30,3%, в нижнем несущем слое и в заполнителе увеличилась на 17,5%;

В) напряжение  $T_{xy}$  в верхнем несущем слое увеличилась на 490,7%, в нижнем несущем слое увеличилась на 467,61%, в заполнителе увеличилась на 482,9%.

Замена в верхнем несущем слое материала АМГ2-Н (вариант 1) на сталь (вариант 4), привело к тому, что:

А) напряжение  $N_x$  в верхнем несущем слое увеличилась на 55,2%, в нижнем несущем слое уменьшилась на 49,6%, в заполнителе увеличилась на 28,4%;

Б) напряжение  $N_y$  в верхнем несущем слое уменьшилась на 9,43%, в нижнем несущем слое уменьшилась на 55,1%, в заполнителе уменьшилась на 29,62%;

В) касательные напряжения  $T_{xy}$  в верхнем несущем слое увеличилась на 315,06%, в нижнем несущем слое увеличилась на 300%, в заполнителе увеличилась на 309,5%.

В целом проведённые исследования показали, что применение в качестве материала для изготовления несущих несимметричных несущих слоёв менее деформативного материала приводит к перераспределению напряжений в несущих слоях и заполнителе и, это необходимо учитывать при проектировании трёхслойных труб.

Проведённые расчёты проводились в упругой зоне работы материалов трёхслойных труб при действии внутреннего давления на нижний несущий слой.

Исследования трёхслойной трубы при других вариантах загрузки будут продолжены.

**Библиографический список:**

1. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1982. - 341 с.
2. Бородавкин П.П., Синоков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984. - 245 с.
3. Булгаков А.И., Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчёт трёхслойных труб большого диаметра на ПК «ЛИРА». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т45. №2. С.191-200.
4. Александров А. Я. Куршин Л. М. Трёхслойные пластинки и оболочки. – В– кн.: Прочность, устойчивость, колебания. М.: Машиностроение, 1968, т.2.
5. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: 1984г, 424с.
7. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009г, 360стр.
8. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988, 284с.
9. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984 г. 528 с.
10. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Гаджиев М.Д. Совершенствование моделей расчета трехслойных конструкций// Тезисы докладов XXII научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Махачкала, 1999. С.52-54.
11. Пелех Б.Л., Лазыко В.А. Слоистые анизотропные пластины и оболочки с концентраторами напряжений. Киев: Наук. Думка, 1982, 295 с.
12. Михлин С.Г. Вариационные методы математической физики. М.: Наука. 1990, 512с.
13. Паймушин В.Н., Муштари А.И. Уточненная теория устойчивости трехслойных оболочек с трансверсально-жестким заполнителем. 3. Простейшие одномерные задачи. Механика композитных материалов. -Рига: Зинатне. 1998, т.34, №1. с.57-65.
14. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 271с.
15. Полетаев В.В., Попугаев В.И., Король Б.А. Применение теплозащитных легких бетонов в многослойных ограждающих конструкциях // Науч. тр. М.: МГУЛ, 1988. Вып. 204. С. 102 - 107.



16. Устарханов О.М. «Вопросы прочности трехслойных конструкций с регулярным дискретным заполнителем»: Дисс. д-ра техн наук. Ростов-на-Дону. 2000.
17. Запруднов В.И. Деревянные трехслойные панели с теплоизоляционными материалами на основе древесных отходов. Развитие деревянного домостроения в России: Материалы международной конференции. Санкт-Петербург, 5-6 марта 2000 г. СПб., СПбГЛТА, 2001. С. 79.

#### References:

1. Aynbinder A.B., Kamershteyn A.G. Raschet magistral'nykh truboprovodov na prochnost' i ustoychivost'. Spravochnoye posobiye. M.: Nedra, 1982. - 341 s. [Ainbinder A.B., Kamerstein A.G. Calculation of trunk pipelines for strength and stability. Reference manual. M.: Nedra, 1982. 341 p. (In Russ)]
2. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. Prochnost' magistral'nykh truboprovodov. M.: Nedra, 1984. 245 s. [Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. Durability of trunk pipelines. M.: Nedra, 1984 245 p. (In Russ)]
3. Bulgakov A.I., Vishtalov R.I., Muselemov K.H.M., Ustarkhanov O.M. Raschet trokhsloynnykh trub bol'shogo diametra na PK «LIRA». Vestnik DGTU. Tekhnicheskiye nauki.-2018.-T45.-№2.-S.191-200. [Bulgakov A.I., Vishtalov R.I., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Calculation of three-layer pipes of large diameter on the PC "LIRA". Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences.. 2018. Vol.45. №2. pp.191-200. (In Russ)]
4. Aleksandrov A. YA. Kurshin L. M. Trekhsloynnyye plastinki i obolochki. – V– kn.: Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. M.: Mashinostroyeniye, 1968, t.2. [Aleksandrov A. Ya. Kurshin L. M. Three-layer plates and shells. - B– book.: Strength, stability, fluctuations. M.: Mechanical Engineering, 1968, Vol.2. (In Russ)]
5. Kobelev V.N., Kovarskiy L.M., Timofeyev S.I. Raschet trekhsloynnykh konstruksiy. M.: Mashinostroyeniye, 1984. [Kobelev V.N., Kovarsky L.M., Timofeev S.I. Calculation of three-layer structures. M.: Engineering, 1984. (In Russ)]
6. Gallager R. Metod konechnykh elementov. M.: 1984g, 424s. [Gallager R. The finite element method. M.: 1984, 424p. (In Russ)]
7. Gorodetskiy A.S., Yevzerov I.D. Komp'yuternyye modeli konstruksiy. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroi-tel'nykh vuzov. 2009g, 360str. [Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures. M.: Publishing house of the Association of construction universities. 2009, 360 p. (In Russ)]
8. Rickards R.B. The finite element method in the theory of shells and plates. Riga: Zinatne, 1988, 284c.
9. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy. M.: Metallurgiya, 1984 g. 528 s. [Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Industrial aluminum alloys. M.: Metallurgy, 1984. 528 p. (In Russ)]
10. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Gadzhiyev M.D. Sovershenstvovaniye modeley rascheta trekhsloynnykh konstruksiy// Tezisy dokladov XXII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU. Makhachkala, 1999. S.52-54. [Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Gadzhiev M.D. Improving the models for calculating three-layer structures // Abstracts of the XXII scientific and technical conference of teachers, employees, graduate students and students of DSTU. Makhachkala, 1999.S. 52-54. (In Russ)]
11. Pelekh B.L., Laz'ko V.A. Sloistyye anizotropnyye plastiny i obolochki s kontsentratsiyami napryazheniy. Kiyev: Nauk. Dumka, 1982, 295 s. [Pelekh B.L., Lazko V.A. Layered anisotropic plates and shells with stress concentrates. Kiev: Science. Dumka, 1982. 295 p. (In Russ)]
12. Mikhlin S.G. Variatsionnyye metody matematicheskoy fiziki. M.: Nauka. 1990, 512s. [Mikhlin S.G. Variational methods of mathematical physics. M.: Science. 1990, 512p. (In Russ)]
13. . Paimushin V.N., Mushtari A.I. Utochnennaya teoriya ustoychivosti trekhsloynnykh obolochek s transversal'no-zhestkim zapolnitelem. 3. Prosteyshiye odnomernyye zadachi. Mekhanika kompozitnykh materialov. -Riga: Zinatne. - 1998, t.34, №1. - s.57-65. [Paimushin V.N., Mushtari A.I. A refined theory of the stability of three-layer shells with a transversely rigid aggregate. 3. The simplest one-dimensional problems. The mechanics of composite materials. -Riga: Zinatne. 1998, Vol. 34, No.1. pp. 57-65. (In Russ)]
14. Panin V.F., Gladkov YU.A. Konstruktsii s zapolnitelem: Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye, 1991. 271s. [Panin V.F., Gladkov Yu.A. Constructions with a placeholder: Reference. M.: Engineering, 1991. 271p. (In Russ)]
15. Poletayev V.V., Popugayev V.I., Korol' B.A. Primeneniye teplozashchitnykh legkikh betonov v mnogosloynnykh ograzhdayushchikh konstruksiyakh // Nauch. tr. M.: MGUL, 1988. Vol. 204. pp. 102 - 107. [Poletaev V.V., Popugaev V.I., King B.A. The use of heat-protective lightweight concrete in multilayer walling // Scientific. tr M.: MGUL, 1988. Issue. 204. pp. 102 - 107. (In Russ)]
16. Ustarkhanov O.M. «Voprosy prochnosti trekhsloynnykh konstruksiy s regul'yarnym diskretnym zapolnite-lem»: Diss. d–ra tekhn nauk. Rostov-na-Donu. 2000. [Ustarkhanov O.M. “Strength Issues of Three-Layer Structures with Regular Discrete Fill”: Diss. Doctor of Technical Sciences. Rostov-on-Don. 2000. (In Russ)]

17. Zaprudnov V.I. Derevyannyye trekhslonnyye paneli s teploizolyatsionnymi materialami na osnove dre-vesnykh ot-khodov. Razvitiye derevyannogo domostroyeniya v Rossii: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii. Sankt-Peterburg, 5-6 marta 2000 g. SPb., SPbGLTA, 2001. - S. 79. [Zaprudnov V.I. Wooden three-layer panels with heat-insulating materials based on wood waste. The development of wooden housing in Russia: Materials of the International Conference. St. Petersburg, March 5-6, 2000. St. Petersburg., St. Petersburg State Technical Academy, 2001. p.79. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Абакаров Марат Саидович** - заместитель руководителя Управления Росреестра по Республике Дагестан.

**Вишталов Раджаб Исабекович** - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

**Муселемов Хайрулла Магомедмурадович** - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

**Устарханов Осман Магомедович** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

**Information about the authors.**

**Marat S. Abakarov** - Deputy Head of the Office of the Federal Register for the Republic of Dagestan.

**Rajab I. Vishtalov** – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

**Hayrulla M. Muselemov** –Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

**Osman M. Ustarkhanov** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Поступила в редакцию** 15.03.2019.

**Принята в печать** 10.05.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 15.03.2019.

**Accepted for publication** 10.05.2019.

**Для цитирования:** Аласханов А.Х., Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Хубаев М.С.-М. Бетонные композиты с использованием гравийно-песчаных смесей месторождений Чеченской Республики. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (2):136-147. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-136-147

**For citation:** Alaskhanov A.Kh.I, Murtazaev S.-A.Yu., Saidumov M.S., Khubaev M. S-M. Concrete composites using grand-sandy mixtures of deposits of the Chechen Republic. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(2):136-147. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-136-147

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-136-147

### БЕТОННЫЕ КОМПОЗИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Аласханов А.Х.<sup>2</sup>, Муртазаев С.-А.Ю.<sup>1</sup>, Сайдумов М.С.<sup>3</sup>, Хубаев М.С.-М.<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова,

<sup>1-4</sup>364051, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

<sup>1</sup>Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук,

<sup>1</sup>364021, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21 а, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: s.murtazaev@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: uspekha@ro.ru,

<sup>3</sup>e-mail: saidumov\_m@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail: mokhmad.ggntu@gmail.com

**Резюме. Цель.** Разработка оптимальных рецептур бетонных смесей с использованием местного природного сырья в виде гравийно-песчаных смесей месторождений Чеченской Республики. **Метод.** Методы исследования, принятые в работе, основываются на теоретических принципах и закономерностях проектирования и оптимизации полидисперсных многокомпонентных систем, фазо- и структурообразовании клинкерных минералов, логике математических расчетов, технологических особенностях структурообразования композиционных масс, теоретических принципах управления реологическими процессами строительных смесей. Все экспериментальные данные, представленные в работе, получены согласно методикам действующих нормативных документов (ГОСТ, рекомендаций и др.). **Результат.** В работе представлены результаты исследования составов и свойств песчано-гравийных смесей (ПГС) месторождений Чеченской Республики и бетонов на их основе. В частности, изучены гранулометрический и химический составы и физико-механические свойства ПГС. Произведен анализ научной литературы и опыта применения песчано-гравийных смесей в строительстве. Представлены ведущие научные школы страны и зарубежья в области бетоноведения. Изучены реологические показатели бетонных смесей и получена динамика набора прочности бетонов разных классов на основе необогащенных песчано-гравийных смесей в присутствии химической добавки – суперпластификатора «Полипласт СП-1». **Вывод.** Предлагается в бетонах для неответственных конструкций использовать песчано-гравийные смеси в естественном их виде без дополнительных затрат на обогащение состава. Установлена целесообразность получения бетонов невысоких классов с использованием ПГС без ее обогащения и фракционирования. Работа выполнена в рамках исследований по реализации научного проекта № 18-48-200001 «Высококачественные бетоны с повышенными эксплуатационными свойствами на основе местного природного и техногенного сырья» получившего поддержку Российского фонда фундаментальных исследований» (РФФИ).

**Ключевые слова:** местное сырье, песчано-гравийная смесь, бетонные смеси, бетоны, заполнитель из песчано-гравийных смесей, суперпластификатор «Полипласт СП-1», реологические и физико-механические свойства, динамика набора прочности бетона



## BUILDING AND ARCHITECTURE

### CONCRETE COMPOSITES USING GRAND-SANDY MIXTURES OF DEPOSITS OF THE CHECHEN REPUBLIC

*Alaskhanov A.Kh.<sup>2</sup>, Murtazaev S.-A.Yu.<sup>1</sup>, Saidumov M.S.<sup>3</sup>, Khubaev M. S-M.<sup>4</sup>*

*<sup>1-4</sup> Academician M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,*

*<sup>1-4</sup> 100 Isaev Ave., Grozny 364051 Russia,*

*Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,*

*21a Stropromyslovsky Hig., Grozny 364021, Russia,*

*<sup>1</sup>e-mail: s.murtazaev@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: uspek@ro.ru,*

*<sup>3</sup>e-mail: saidumov\_m@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail: mokhmad.ggntu@gmail.com*

**Abstract Objectives** Development of optimal recipes of concrete mixtures using local natural raw materials in the form of gravel-sand mixtures from deposits of the Chechen Republic. **Method** The research methods adopted in the work are based on the theoretical principles and laws of designing and optimizing polydisperse multicomponent systems, the phase and structure formation of clinker minerals, the logic of mathematical calculations, the technological features of the structure formation of composite masses, the theoretical principles of controlling the rheological processes of mixes. All experimental data presented in the work were obtained according to the methods of current regulatory documents (GOST, recommendations, etc.). **Result** The paper presents the results of a study of the composition and properties of sand and gravel mixtures of deposits of the Chechen Republic and concretes based on them. In particular, the granulometric and chemical compositions and the physico-mechanical properties of sand and gravel mixtures have been studied. An analysis of the scientific literature and experience in the use of sand and gravel in construction. The leading scientific schools of the country and abroad in the field of concrete science are presented. The rheological indices of concrete mixes were studied and the dynamics of the curing of concrete of different classes were obtained on the basis of unfortified sand and gravel mixtures in the presence of a chemical additive, the superplasticizer Polyplast SP-1. **Conclusion** It is proposed to use sand-gravel in its natural form in concrete for non-critical structures in its natural form without additional costs for enriching its composition. The feasibility of obtaining low-grade concrete with the use of sand and gravel mixtures without its enrichment and fractionation is established.

**Acknowledgment** The work was performed as part of research on the implementation of the research project № 18-48-200001 "High-quality concretes with enhanced performance properties based on local natural and technogenic raw materials" received support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR).

**Key words:** Local raw materials, sand-gravel mix, concrete mixes, concrete, aggregate from sand-gravel mixes, Polyplast SP-1 superplasticizer, rheological and physico-mechanical properties, dynamics of concrete strength

**Введение.** Из большого многообразия строительных материалов, применяемых в промышленном, гражданском и индивидуальном строительстве, песчано-гравийные смеси (ПГС) считаются одним из самых популярных, доступных и применяемых строительных материалов, добываемых при помощи специальной разработанной техники со дна рек или в обычных карьерах [1-3].

Главные технические характеристики ПГС – определённое сбалансированное процентное содержание песка и гравия в исходном материале. Процентное содержание этих важных компонентов в исходном составе песчано-гравийной смеси определяет ее цену и область, в которой она будет использоваться. В зависимости от того сколько процентного содержания гравия ПГС делится на группы: от 15 до 25 процентов, от 25 до 35 процентов, от 35 до 50 процен-

тов, от 50 до 65 процентов и от 65 до 75 процентов. Сортирование ПГС на группы (фракции) делается сразу на месте добычи с помощью специального метода грохочения [4-6].

Таким образом, сырьевая база для строительного производства, в том числе бетона и железобетона, может быть существенно расширена за счет рационального использования местных песчано-гравийных смесей, имеющих в Чеченской Республике (ЧР).

**Постановка задачи.** Анализ научной литературы и опыта применения ПГС в строительстве свидетельствует о недостаточной изученности составов и свойств бетонов на основе валунно-песчано-гравийных смесей (ВПГС) месторождений ЧР [7,8].

Исследования таких мировых ученых в области бетоноведения как Ю.М. Баженов [4], С.-А.Ю. Муртазаев [2], В.С. Демьянова, В.С. Лесовик [6], В.И. Калашников, В.Г. Батраков, Д.К.-С. Батаев [5], Ш.Т. Бабаев, Н.Н. Долгополов, И.Н. Ахвердов, W. Berg, F. Sybertz, R. Hardtl, U. Wiens и др., показывают актуальность направления разработки и внедрения составов тяжелых бетонов на основе ПГС в современном строительстве, в том числе и монолитном. Однако, отсутствие полноценных практических рекомендаций по приготовлению и использованию таких бетонов, малоизученности свойств и составов валунно - песчано - гравийных смесей, а также отсутствие экспериментальных данных по срокам службы и долговечности таких бетонов – ограничивают широкое применение таких бетонов для монолитного строительства [9-14].

Таким образом, повышение эффективности получения бетонных смесей и бетона на заполнителях из ВПГС месторождений ЧР, в частности, с русла реки Ахк Веденского района ЧР, является актуальной и своевременной задачей развития современного научно-технического прогресса.

Как известно, ПГС бывает естественного происхождения. Такую смесь добывают со дна рек с использованием земснаряда или же открытым способом с применением экскаваторов там, где имеются пересохшие речные русла (рис. 1).



**Рис.1. Добыча песчано-гравийной смеси с русла реки Ахк Веденского района ЧР**  
**Fig.1. Production of sand and gravel from the bed of the river Akhk Veden district of the Czech Republic**

Существует также и обогащенная песчано-гравийная смесь (ОПГС), в изначальный природный состав которой добавляется гравий.

Сегодня наибольшее распространение получила именно ОПГС, которая имеет в своем составе 70% гравия и 30% песка. Такое соотношение позволяет этой смеси не давать сильной усадки при больших нагрузках. Они используются для устройства первичного слоя перед заливкой бетоном площадки, дороги или улицы.

Песчано-гравийная смесь, так же, как и песок строительный имеет весьма широкую сферу применения. Природные ПГС, как правило, используются при устройстве дорожных покрытий, верхнего слоя основания для покрытия и для других целей дорожного строительства в соответствии с существующими требованиями и правилами строительства автомобильных дорог.

ПГС используется для выравнивания строительных площадок, применяется в дорожном строительстве, для обратной засыпки траншей и котлованов в промышленном и жилищном строительстве, при прокладке коммуникаций. Обогащенная песчано-гравийная смесь может быть использована при производстве бетонов и на фундаментных работах.

Общие физические свойства ПГС зависят от физических свойств компонентов, которые входят в ее состав, а также от процентного соотношения песка и гравия.

Природная песчано-гравийная смесь должна содержать зерна гравия размером более 5 мм не менее 10% и не более 95%. Обычно содержание гравия в среднем колеблется в пределах 10-20%, но в некоторых карьерах могут добываться ПГС с содержанием гравия до 35%.

Обогащенная природно-гравийная смесь в зависимости от процентного содержания зерен гравия подразделяется на пять групп. От этого зависит и цена на каждую из групп этого материала.

**Методы исследования.** В настоящее время ВПГС в республике применяется после его обогащения с получением щебня из гравия, который используется в качестве крупного заполнителя для бетонов низких и средних классов по прочности. Естественно такая технологическая цепочка по дроблению и рассеву продукта дробления ПГС связана с энерго- и трудозатратами.

Предлагается в бетонах для неответственных конструкций использовать ПГС в естественном его виде без дополнительных затрат на обогащение ее состава. Для этого нами проведены экспериментальные исследования составов и свойств ПГС Чеченского месторождения в Научно-техническом центре коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии» и Научно-исследовательском центре коллективного пользования «Нанотехнологии и наноматериалы» Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова.

**Обсуждение результатов.** По результатам рассева ВПГС с русла реки Ахк Веденского района ЧР на наборе сит с размерами ячеек от 5 мм до 40 мм установлено следующее соотношение крупной и мелкой фракций (табл. 1).

Полные и частные остатки на ситах песчаной и гравийной фракций представлены ниже в табл. 4 и 6.

**Таблица 1. Результаты рассева ВПГС на ситах 5-40 мм**  
**Table 1. The results of the sieving of HSV on sieves 5-40 mm**

Наименование сырья Name of Raw materials	Содержание зерен фракций в ВПГС, % по массе The content of grains of fractions in HSA, % by weight				
	0-5 мм	5-10 мм	10-20 мм	20-40 мм	> 40 мм
Валунно-песчано-гравийная смесь (ВПГС) с русла реки Ахк ЧР Boulder-sand-gravel mixture (VPGS) from the river bed of the Akhk CR	35	10	23	27	5

В качестве вяжущего в экспериментальных исследованиях применялся портландцемент (ПЦ) марки М500 Д0 Чири-Юртовского цементного завода, широко применяемый в Чеченской Республике.

В качестве химической добавки в соответствии с ГОСТ 24211 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» был использован суперпластификатор «Полипласт СП-1», соответствующий ТУ 5870-005-58042865-05 (табл. 2).

Полезная толща месторождения состоит из валунов, галечно-гравийной и песчаной фракций. Гравийная фракция преобладает над валунной и песчаной.

Содержание слабых и выветренных зерен 2,75 %. Песчаная фракция представлена среднезернистым песком с модулем крупности от 2,5 до 3,0 и полным остатком на сите 0,63 мм – 47,4 %.

Минералогическая песчаная фракция представлена в основном зернами кварца 30 %, карбонатов 5 %, полевого шпата 33 %, обломков пород 25 %. В толще песчано-гравийной смеси встречаются линзы и прослой конгломератов, сцементированных карбонатным цементом мощностью 10-40 см.

**Таблица 2. Качественные показатели добавки «Полипласт СП-1»**  
**Table 2. Qualitative indicators of additives "Polyplast SP-1"**

№ п/п	Наименование показателя Name of indicator	Значение показателя Value of indicator
1	Агрегатное состояние Physical state	Водорастворимый порошок Water-soluble powder
2	Цвет Colour	Коричневый Brown
3	РН-показатель, ед., не менее РН- indicator, units, not less than	7-9
4	Содержание $Cl^-$ , % не более $Cl^-$ content, % no more	0,1
5	Массовая доля сухих веществ, % не менее Mass fraction of solids, %, not less	98
6	Дозировка, % от массы цемента Dos- age, % by weight of cement	0,4-0,8

Веденское месторождение ПГС характеризуется следующими физико-механическим свойствами (табл. 3).

**Таблица 3. Физико-механические характеристики ВПГС Веденского месторождения**  
**Table 3. Physico-mechanical characteristics of VPGS Vedeno field**

№ п/п	Показатели Indicators	Значения Values
1.	Средняя плотность в целике, кг/м <sup>3</sup> The average density in pillar, kg / m <sup>3</sup>	2623
2.	Коэффициент разрыхления Loosening coefficient	1,33
3.	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> Bulk density, kg / m <sup>3</sup>	1971
4.	Категория пород трудности разработки экскаваторами Excavator development breeds category rocks	III

По результатам отсева ВПГС с русла реки Ахк Веденского района ЧР на наборе сит с размерами ячеек от 5 мм до 40 мм установлено следующее соотношение крупной и мелкой фракций (см. табл. 1) – песок – 35 %, гравий – 60 %, валуны – 5 %.

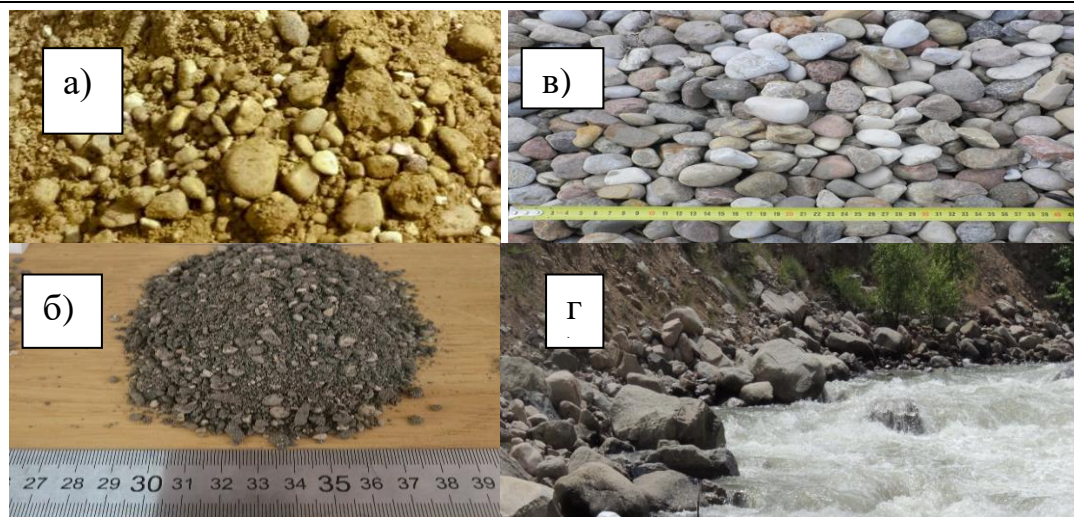
Гравийная фракция преобладает над валунной и песчаной, составляя более половины ВПГС.

Максимальные размеры единичных валунов – 20-30 см; однако они встречаются крайне редко (рис. 2).

Об этом свидетельствуют результаты полевого отсева материала. Содержание фракции крупнее 150 мм составляет в среднем 2,8 %, крупнее 200 мм – до 0,5 %. Валунные и гравийные хорошо окатаны, чаще всего они имеют округлые, шарообразные и близкие к ним, а реже лепешко-видные формы.

Гравий мелких фракций отчасти сохраняет первоначальные очертания обломков (сглажены углы) в соответствии с обломками осадочных пород.

Содержание зерен пластинчатой и игольчатой форм составляет не более 20 % по массе. Поверхность гравия и валунов, сложенных эффузивами, кварцитами и кварцем, как правило, гладкая, а состоящих из других пород гораздо более шероховатая.



**Рис. 2. Валунно-песчано-гравийной смеси (ВПГС) Веденского месторождения: а – ВПГС в естественном виде; б – песчаная фракция из ВПГС, полученная путем ее просеивания; в – гравий из ВПГС; г – валуны в русле р. Ахк**

**Fig. 2. Boulder-sand-gravel mixture (VPGS) of the Veden deposit: a - VPGS in its natural form; b - sand fraction from HSV obtained by sieving it; in - gravel from HSGS; g - vuluny in the riverbed. Ahk**

Гранулометрический состав гравийной фракции из ПГС Веденского месторождения представлен в табл. 4.

**Таблица 4. Гранулометрический состав гравийной фракции ПГС Веденского месторождения**  
**Table 4. Granulometric composition of the gravel fraction of PGS Veden field**

Наименование показателя Name of indicator		Значение показателя Value of indicator	
Фракции гравия, мм Fractions gravel, mm	Размер сит, мм Size of sieves, mm	Остатки на ситах, % по массе Sieve residues,% by weight	
		Частные Private	Полные Full
20-40	70	0,0	0,0
	40	14,5	14,5
	30	8,3	22,8
	22,5	11,2	34,0
	20	9,8	43,8
10-20	17,5	6,2	50,0
	15	9,5	59,5
	12,5	7,9	67,4
	10	8,6	76,0
5-10	7,5	14,2	90,2
	5	9,8	100

Прочностные показатели гравия в сухом и водонасыщенном состояниях представлены в табл. 5.

**Таблица 5. Прочностные показатели гравия ВПГС Веденского месторождения**  
**Table 5. Strength indicators of gravel VPGS Vedenovo deposits**

Показатели Indicators	Фракции гравия, мм Gravel fractions, mm		
	5-20	10-20	5-10
Потеря при испытании, % по массе Test loss,% by weight			
а) в водонасыщенном состоянии колебания in a water-saturated state fluctuations	8,15-10,01	7,66-9,93	8,15-10,60
средние значения average value	9,22	8,95	9,54
б) в воздушно-сухом состоянии (средние значения) % in the air-dry state (average values)%	6,66	7,08	6,22
Увеличение потерь, % The increase in losses,%	28	21	35
Марка дробимости Crushability mark	800		
Марка по истираемости Abrasion Grade	ИЗ		
Марка по морозостойкости Brand for frost resistance	F100		

Гранулометрический состав и основные характеристики песчаной фракции из ПГС Веденского месторождения приведена в таблице 6, химический состав – в табл.7.

**Таблица 6. Характеристика песчаной фракции ПГС Веденского месторождения**  
**Table 6. Characteristics of the sand fraction of the ASG of the Vedenovo deposit**

№ п/п	Наименование показателя Name of indicator		Значение показателя Value of indicator	
1.	Зерновой состав: Grain composition:	Размер сит, мм Size of sieves, mm	Остатки на ситах, % по массе Sieve residues,% by weight	
			Частные Private	Полные Full
		5,0	0,0	0,0
		2,5	22,7	22,7
		1,25	9,2	31,9
		0,63	15,5	47,4
		0,314	18,7	66,1
		0,16	21,4	87,5
		< 0,16	12,5	100,0
2.	Модуль крупности $M_K$ $M_K$ Size module		2,6	
3.	Группа песка по крупности зерен Group of sand by grain size		Крупный песок	
4.	Класс песка Sand class		Песок II класса	
5.	Форма зерен Grain shape		Окатанная	
6.	Содержание пылевидный, глинистых и илистых (ПГИ), % The content of dust, clay and mud (PIP),%		5,4	
7.	Содержание глины в комках, % The clay content in the lumps,%		1,3	
8.	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup> True density, kg / m <sup>3</sup>		2733	
9.	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> Bulk density, kg / m <sup>3</sup>		1383	
10.	Пустотность, % Voidness,%		49,2	
11.	Содержание органических примесей (окраска) The content of organic impurities (color)		Бесцветная Colorless	
12.	Класс по радиоактивности Radioactivity Class		1	

**Таблица 7. Химический состав песчаной фракции из ПГС Веденского месторождения**  
**Table 7. The chemical composition of the sand fraction from ASG Veden deposits**

№ п/п	Наименование оксидов и металлов Name of oxides and metals	Содержание компонентов, масс. % Content of components, mass. %
1.	SiO <sub>2</sub>	74,22 – 82,18
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26 - 0,58
3.	TiO <sub>2</sub>	0,06-0,11
4.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20-0,38
5.	CaO	0,15-0,45
6.	MgO	0,08-0,09
7.	K <sub>2</sub> O	0,11
8.	Na <sub>2</sub> O	0,08
9.	Mn(10-6)	14,1
10.	Cu (10-6)	5,5
11.	Zn (10-6)	3,4
12.	Sr (10-6)	0,8
13.	Pb(10-6)	2,6
14.	Cr (10-6)	5,7
15.	Co (10-6)	1,1
16.	Zr (10-6)	11,1
17.	Ni(10-6)	6,1
18.	п.п.п. при 1000 °С	0,28
19.	Прочие неорганические вещества Other inorganic substances	0,23
20.	Сумма Amount	100

Для исследования реотехнологических, физико-механических и эксплуатационных свойств были приготовлены опытно-расчетным путем составы бетонов с использованием ПГС Веденского месторождения (табл. 8).

Сырье в виде ВПГС на первом этапе просеивалось через сито с размерами ячеек 40 мм, т.е. в бетонных смесях применялась ПГС фракций от 0 до 40 мм.

Помимо расчетных составов на основе ПГС в таблице также приведены для сравнения контрольные составы на основе местного сырья (щебня и песка Белгатоевского и Червленного месторождений соответственно).

В составах в качестве добавки используется суперпластификатор «Полипласт СП-1», дозируемый в количестве 1,0 % от массы цемента.

Для удобства получения сравнительной оценки с контрольными составами исследуемые рецептуры были получены равноподвижные с маркой по удобоукладываемости ПЗ.

Плотность бетонной смеси на заполнителе из ПГС колебалась в диапазоне 2322-2394 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует плотности тяжелых бетонов. При этом введение в бетонную смесь химической добавки «Полипласт СП-1» способствует значительному улучшению плотности смеси, способствуя более плотному сближению частиц заполнителя и получение плотной упаковки их зерен.

Добавка «Полипласт СП-1» также влияет на водоцементное соотношение (В/Ц) бетонных смесей, уменьшая его до 15-20 %.

Как видно из табл. 8, получение на небогатенных ПГС бетонов классов до В20 включительно, экономически целесообразно в случае применения химической добавки «Полипласт СП-1». Однако бетоны более высоких классов характеризуются перерасходом вяжущего в сравнении с контрольными составами на щебне, при этом тем больше перерасход цемента, чем выше класс бетона. Коэффициент перерасхода вяжущего в составах на небогатенных ПГС высоких классов больше единицы даже в тех составах, где применяется химическая добавка «Полипласт СП-1».



**Таблица 8. Составы и свойства бетонов на основе местного сырья из необогащенного ПГС Ведынского месторождения**  
**Table 8. Compositions and properties of concrete based on local raw materials from unenriched ASG Vedenovo deposits**

№ п/п	Наименование состава Name composition	Проектный класс (марка) бетона Design class (brand) of concrete	Требуемая прочность бетона, МПа The required strength of concrete, MPa	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг Consumption of materials per 1 m <sup>3</sup> of concrete mixture, kg						Свойства бетонной смеси Concrete Mix Properties			Свойства бетона Concrete properties		
				Ц	ПГС	Щ	П	Д	В	В/Ц	ОК бет. смеси, см	Марка бет. смеси по ОК	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup> Density of concrete, kg / m <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа Strength at compression, MPa	
1.	Контрольный 1	B7,5 (M100)	9,8	210	-	1190	750	-	230	1,09	14	ПЗ	2310	8,0	12,8
2.	Расчетный 1.1			235	1965	-	-	-	240	1,07	13		2322	8,2	13,0
3.	Расчетный 1.2			195	2080	-	-	2,0	180	0,92	11		2332	9,2	10,2
4.	Контрольный 2	B12,5 (M150)	16,4	250	-	1200	730	-	235	0,94	13	ПЗ	2345	13,3	17,6
5.	Расчетный 2.1			287	1960	-	-	-	245	0,85	13		2342	12,3	17,1
6.	Расчетный 2.2			243	2030	-	-	2,5	183	0,75	12		2348	14,8	18,2
7.	Контрольный 3	B15 (M200)	19,7	300	-	1200	625	-	235	0,78	14	ПЗ	2355	16,0	23,6
8.	Расчетный 3.1			355	1910	-	-	-	238	0,67	12		2350	15,2	22,5
9.	Расчетный 3.2			295	1980	-	-	3,0	185	0,63	10		2358	17,1	21,3
10.	Контрольный 4	B20 (M250)	26,2	340	-	1250	530	-	230	0,68	13	ПЗ	2366	18,5	28,7
11.	Расчетный 4.1			414	1865	-	-	-	236	0,57	13		2365	18,0	27,5
12.	Расчетный 4.2			350	1945	-	-	3,5	182	0,52	14		2372	20,8	26,8
13.	Контрольный 5	B22,5 (M300)	29,5	375	-	1250	500	-	240	0,64	10	ПЗ	2370	22,1	30,8
14.	Расчетный 5.1			465	1825	-	-	-	243	0,52	14		2372	23,0	31,2
15.	Расчетный 5.2			390	1915	-	-	4,0	183	0,47	13		2377	25,3	31,5
16.	Контрольный 6	B25 (M350)	32,7	420	-	1250	450	-	243	0,58	14	ПЗ	2380	23,4	33,9
17.	Расчетный 6.1			550	1750	-	-	-	248	0,47	11		2375	24,2	34,9
18.	Расчетный 6.2			465	1840	-	-	4,6	187	0,42	11		2378	27,4	34,5
19.	Контрольный 7	B30 (M400)	39,3	460	-	1300	400	-	245	0,53	12	ПЗ	2392	28,6	43,3
20.	Расчетный 7.1			650	1660	-	-	-	252	0,41	13		2390	28,1	42,0
21.	Расчетный 7.2			515	1805	-	-	5,2	192	0,39	11		2394	32,5	40,0

Примечание: Ц – цемент марки М500 Д0 производства «Чеченцемент»; ПГС – необогащенная песчано-гравийная смесь Ведынского месторождения фракции 0-40 мм; Щ – щебень Белгатоевского месторождения фракции 5-20 мм; П – песок Червленского месторождения с модулем крупности Mk = 1,7; Д – добавка химическая «Полипласт СП-1»; В – вода; В/Ц – водоцементное соотношение; ОК – осадка конуса.  
Note: C - cement grade M500 D0 produced by Chechencement; ПГС - unenriched sand-gravel mixture of Vedenovo deposit of fraction 0-40 mm; Щ - crushed stone of the Belgatovsky deposit of fraction 5-20 mm; P - sand of Chervlenskoye field with particle size modulus Mk = 1.7; D - chemical additive "Polyplast SP-1"; In - water; W / C - water-cement ratio; OK - sediment cone.

Это объясняется тем, что по содержанию пылевидных, глинистых частиц (которые должны быть не более 3 %) и глины в комках (должны быть не более 0,5 %) песок из ВПГС Ведынского месторождения не отвечает требованиям ГОСТ 8736.

Для использования ПГС в более высоких классах требуется их обогащение и фракционирование, в первую очередь, промывка.

Динамика набора прочности бетона различных классов, полученных на основе ПГС Ведынского месторождения, представлена на рис. 3.



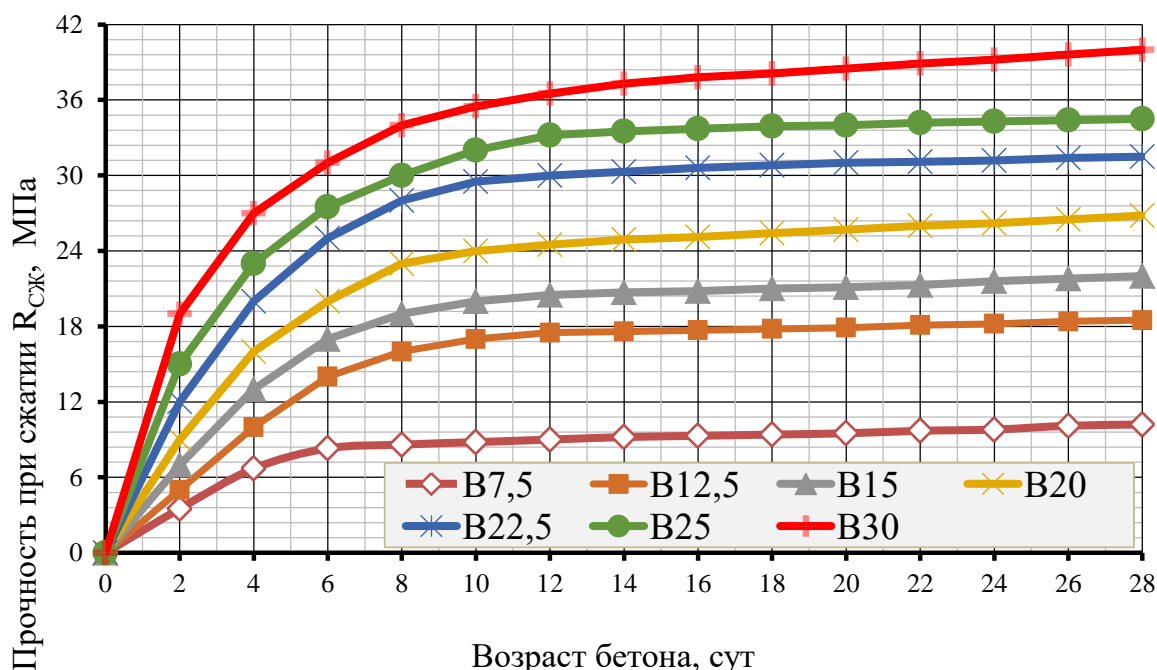


Рис.3. Динамика набора прочности бетона различных классов, полученных на основе ПГС Веденского месторождения

Fig. 3. The dynamics of the set of concrete strengths of various classes, obtained on the basis of ASG Vedenno deposits

Анализ рис. 3 свидетельствует, что динамика набора прочности бетона различных классов, полученных на основе ПГС Веденского месторождения, в сравнении с контрольными составами бетонов соответствует известным законам набора прочности бетона, набирая в возрасте 7 суток около 70-80 % от проектной (28-суточной) прочности.

**Вывод.** Таким образом, разработаны и исследованы составы и свойства бетонов на основе местного сырья из необогащенного ПГС Веденского месторождения. Доказано возможность использования ПГС в качестве заполнителей в бетонах (для неответственных конструкций) невысоких классов по прочности на сжатие.

Изучена динамика набора прочности бетона различных классов, полученных на основе ПГС Веденского месторождения и дана их сравнительная оценка

Установлено, что применение химической добавки «Полипласт СП-1» способствует улучшению реологических и физико-механических свойств бетонных смесей и бетонов на основе заполнителей из ПГС месторождения Чеченской Республики.

#### Библиографический список:

1. Стратегия развития строительного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года. — М.: Госстрой РФ, 2013. — 145 с.
2. Муртазаев С-А.Ю. Мелкозернистые бетоны из техногенного сырья для ремонта и восстановления поврежденных зданий и сооружений /Ю.М. Баженов, С-А.Ю. Муртазаев, Д.К-С. Батаев [и др.]. Грозный: 2011. 342 с.
3. Зозуля П.В. Оптимизация гранулометрического состава и свойств заполнителей и наполнителей для сухих строительных смесей: сб. тезис, докл. III междунар. конф. BaltiMix Санкт-Петербург. 2003. С. 12-13.
4. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций [Текст] / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин [и др.]. -М.: Изд-во АСВ, 2008. - 350 с.
5. Батаев Д.К-С. Рецептуры высокопрочных бетонов на техногенном и природном сырье / Д.К-С. Батаев, М.С. Сайдумов, Т.С-А. Муртазаева [и др.] // Актуальные проблемы современной строительной науки и образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию строительного факультета ФГБОУ ВО «ГГТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», 12-13 октября 2017 г. Грозный: Бисултанова П.Ш., 2017. — С.109-117.
6. Kuprina, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnyk, L.H., Elistratkin, M.Y. Anisotropy of materials properties of natural and man-triggered origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. Issue 11. PP. 816-819.
7. Сайдумов, М.С. "Зеленые бетоны" повышенной долговечности для монолитного строительства [Текст] / А.Х. Аласханов, С.А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов, С.А. Алиев // В сборнике: Теоретические основы создания

эффективных композитов Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. 2018. С.37-44.

8. Лермит Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит. –М.: Издательство ЛКИ, 2007. 296 с.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона [Текст] / Ю.М. Баженов. –М.: АСВ, 2011. 500 с.
10. Удодов С.А. Повторное введение пластификатора как инструмент управления подвижностью бетонной смеси // Сборник научных трудов Кубанского государственного технологического университета. 2015. №9. С. 175-185.
11. Стельмах, С.А. Влияние некоторых характеристик применяемого крупного заполнителя на свойства тяжелого бетона, предназначенного для изготовления центрифугированных изделий и конструкций [Текст] / С.А. Стельмах, Е.М. Щербань, К.В. Сердюков [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. -№ 10. С. 15-20.
12. Корянова Ю.И., Резанцев, Н.Е., Шумилова, А.С. Материалы и конструкции, используемые при строительстве высотных зданий - от традиций к новшествам // Аллея науки. 2018. Т.6.-№ 4 (20). С.95-99.
13. Salamanova M.Sh. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components / Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh. // В сборнике: ibausil conference proceedings. 2018. С. 707-714.
14. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии [Текст] / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Строй-Инфо. 2007. № 1-2. С. 289-290.

### References:

1. Strategiya razvitiya stroitel'nogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda. — M.: Gosstroy RF, 2013. – 145 s. [The development strategy of the construction complex of the Russian Federation for the period until 2020. - M.: Gosstroy of the Russian Federation, 2013 . 145 p. (In Russ)]
2. Murtazayev S-A.YU. Melkozernistyye betony iz tekhnogenogo syr'ya dlya remonta i vosstanovleniya povrezhdennykh zdaniy i sooruzheniy /YU.M. Bazhenov, S-A.YU. Murtazayev, D.K-S. Batayev [i dr.].Groznyy: 2011. 342 s. [Murtazaev S-A.YU. Fine-grained concrete from technogenic raw materials for the repair and restoration of damaged buildings and structures / Yu.M. Bazhenov, St. A.Yu. Murtazaev, D.K.-S. Bataev [et al.]. Grozny: 2011.342 s. (In Russ)]
3. Zozulya, P.V. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava i svoystv zapolniteley i napolniteley dlya sukhikh stroitel'nykh smesey: sb. tezis, dokl. III mezhdun. konf. BaltiMix Sankt-Peterburg. 2003. S. 12-13. [Zozulya, P.V. Optimization of particle size distribution and properties of aggregates and fillers for dry building mixtures: Sat. thesis, dokl. III int. conf. BaltiMix St. Petersburg. 2003.S. 12-13. (In Russ)]
4. Bazhenov, YU.M. Tekhnologiya betona, stroitel'nykh izdeliy i konstruktсий [Tekst] / YU.M. Bazhenov, L.A. Alimov, V.V. Voronin [i dr.]. -M.: Izd-vo ASV, 2008. - 350 s. [Bazhenov, Yu.M. Technology of concrete, building products and structures [Text] / Yu.M. Bazhenov, L.A. Alimov, V.V. Voronin [et al.]. -M.: DIA Publishing House, 2008 . 350 p. (In Russ)]
5. . Batayev D.K-S. Retseptury vysokoprochnykh betonov na tekhnogenom i prirodnom syr'ye / D.K-S. Batayev, M.S. Saydumov, T.S-A. Murtazayeva [i dr.] // Aktual'nyye problemy sovremennoy stroitel'noy nauki i obrazovaniya: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu stroitel'nogo fakul'teta FGBOU VO «GGNTU im. akad. M.D. Millionshchikova», 12-13 oktyabrya 2017 g. Groznyy: Bisultanova P.SH., 2017. – S.109-117. [Bataev D.K.-S. Recipes of high-strength concrete based on technogenic and natural raw materials / D.K-S. Bataev, M.S. Saydumov, T.S.-A. Murtazaeva [et al.] // Actual problems of modern building science and education: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the building faculty of FSBEI HE “GSTU named after Acad. M.D. Millionschikova”, October 12-13, 2017, Grozny: P. Bisultanova, 2017. - P.109-117. (In Russ)]
6. Kuprina, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnyk, L.H., Elistratkin, M.Y. Anisotropy of materials properties of natural and man-triggered origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. Issue 11.P. 816-819.
7. Saydumov, M.S. "Zelenyye betony" povyshennoy dolgovechnosti dlya monolitnogo stroitel'stva [Tekst] / A.Kh. Alaskhanov, S.A.YU. Murtazayev, M.S. Saydumov, S.A. Aliyev // V sbornike: Teoreticheskiye osnovy sozdaniya effektivnykh kompozitov Sbornik materialov Rossiyskoy onlayn-konferentsii, posvyashchennoy Dnyu nauki. 2018. S.37-44. [Saydumov, M.S. "Green Concrete" of increased durability for monolithic construction [Text] / A.Kh. Alaskhanov, S.A.Yu. Murtazaev, M.S. Saidumov, S.A. Aliev // In the collection: Theoretical foundations of creating effective composites. A collection of materials of the Russian online conference dedicated to the Day of Science. 2018.pp.37-44. (In Russ)]
8. Lermi R. Problemy tekhnologii betona [Tekst] / R. Lermi. –М.: Izdatel'stvo LKI, 2007. 296 s. [Lermi R. Problems of concrete technology [Text] / R. Lermi. –М.: Publishing House of LCI, 2007.296 s. (In Russ)]
9. Bazhenov YU.M. Tekhnologiya betona [Tekst] / YU.M. Bazhenov. –М.: ASV, 2011. 500 c. [Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Text] / Yu.M. Bazhenov. –М.: DIA, 2011.500 p. (In Russ)]
10. Udodov S.A. Povtornoye vvedeniye plastifikatora kak instrument upravleniya podvizhnost'yu betonnoy smesi // Sbornik nauchnykh trudov Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. №9. S. 175-185. [Udodov S.A. Re-introduction of a plasticizer as a tool for controlling the mobility of concrete mix // Collection of scientific papers of the Kuban State Technological University. 2015. No9. S. 175-185. (In Russ)]

11. Stel'makh, S.A. Vliyaniye nekotorykh kharakteristik primenyayemogo krupnogo zapolnitelya na svoystva tyazhelogo betona, prednaznachennogo dlya izgotovleniya tsentrifugirovannykh izdeliy i konstruktsiy [Tekst] / S.A. Stel'makh, Ye.M. Shcherban', K.V. Serdyukov [i dr.] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2017. -№ 10. S. 15-20. [Stelmakh, S.A. The influence of some characteristics of the used large aggregate on the properties of heavy concrete intended for the manufacture of centrifuged products and structures [Text] / S.A. Stelmakh, E.M. Shcherban, K.V. Serdyukov [et al.] // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. 2017.- No. 10. P. 15-20. (In Russ)]
12. Koryanova YU.I., Rezantsev, N.Ye., Shumilova, A.S. Materialy i konstruksii, ispol'zuyemye pri stroi-tel'stve vysotnykh zdaniy - ot traditsiy k novshestvam // Alleya nauki. 2018. T.6.-№ 4 (20). S.95-99. [Koryanova Yu.I., Rezantsev, N.E., Shumilova, A.S. Materials and structures used in the construction of high-rise buildings - from tradition to innovation // Alley of Science. 2018.V.6.-No 4 (20). S.95-99. (In Russ)]
13. Salamanova, M.Sh. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components / Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh. // V sbornike: ibausil conference proceedings. 2018. S. 707-714. [Salamanova, M.Sh. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components / Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh. // Collected: ibausil conference proceedings. 2018.S. 707-714. (In Russ)]
14. Bazhenov, YU.M. Novyy vek: novyye effektivnyye betony i tekhnologii [Tekst] / YU.M. Bazhenov, V.R. Fa-likman // Stroy-Info. 2007. № 1-2. S. 289-290. [Bazhenov, Yu.M. New century: new effective concrete and technology [Text] / Yu.M. Bazhenov, V.R. Fa-lykman // Build-Info. 2007. No. 1-2. S. 289-290. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Аласханов Арби Хамидович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

**Муртазаев Сайд-Альви Юсупович** – доктор технических наук, профессор, кафедра технологии строительного производства.

**Сайдумов Магомед Саламувич** – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

**Хубаев Магомед Сайд-Магомедович** – аспирант, кафедра технологии строительного производства.

**Information about the authors:**

**Arbi K. Alaskhanov** – Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof. Department of Construction Technology.

**Said-Alvi Yu. Murtazaev** – Doctor Sci. (Technical). Prof. Department of Construction Technology

**Magomed S. Saidumov** – Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof. Department of Construction Technology.

**Magomed S.-M. Khubaev** – Graduate student. Department of Construction Technology.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 25.04.2019.

**Принята в печать** 01.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 25.04.2019.

**Accepted for publication** 01.06.2019.

**Для цитирования:** Алиев С.А., Муртазаева Р.С.-А., Саламанова М.Ш. Структура и свойства вяжущих щелочной активации с использованием цементной пыли. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (2):148-157. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-148-157

**For citation:** Aliev S.A., Murtazayeva R.S.-A., Salamanova M.Sh. Structure and properties of connecting alkaline activation using cement dust. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(2):148-157. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-148-157

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.33

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-148-157

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЯЖУЩИХ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕМЕНТНОЙ ПЫЛИ

Алиев С.А.<sup>2</sup>, Муртазаева Р.С.-А.<sup>3</sup>, Саламанова М.Ш.<sup>1</sup>

<sup>1-3</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова,

<sup>1-3</sup>364051, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [madina\\_salamanova@mail.ru](mailto:madina_salamanova@mail.ru), <sup>2</sup>e-mail: [asa-fenix@mail.ru](mailto:asa-fenix@mail.ru),

<sup>3</sup>e-mail: [razet.murtazaeva@gmail.com](mailto:razet.murtazaeva@gmail.com)

**Резюме. Цель.** В процессе обжига портландцементного клинкера в электрофильтрах вращающихся печей скапливается большое количество пыли, как клинкерной, так и аспирационной, поэтому рациональное использование этих продуктов, содержащих определенную долю полноценного сырьевого ресурса, является актуальной задачей индустрии цемента. Необходимо отметить, что повторное использование пыли электрофильтров, возвратом в печь невозможно, из-за присутствия в ней высокого количества щелочесодержащих примесей, а это негативно скажется на качестве клинкера. **Методы.** В основу получения прочных и более ресурсоэффективных композитов положены современные технологические приемы, способствующие улучшению технических и физико-механических свойств, при комплексном применении техногенного сырья и жидкостекольного натриевого связующего. **Результаты.** В данной работе представлены результаты исследований цементной пыли, проведен энергодисперсионный и сравнительный анализ исследуемых порошков, а также приводится возможный способ утилизации цементной пыли для получения бесклинкерных цементов щелочной активации и бетонов на их основе. **Вывод.** Разработанные рецептуры бесклинкерных вяжущих с применением отходов цементной промышленности и натриевого жидкостекольного затворителя позволят получать менее затратные, прочные и долговечные композиты, которые позволят частично заменять традиционный бетон на дорогом портландцементе.

Работа выполнена в рамках исследований по реализации научного проекта № 18-48-200001 "Высококачественные бетоны с повышенными эксплуатационными свойствами на основе местного природного и техногенного сырья" получившего поддержку Российского фонда фундаментальных исследований» (РФФИ).

**Ключевые слова:** техногенное сырье, портландцементный клинкер, аспирационная пыль, пыль электрофильтров, щелочные металлы, дисперсность, вращающаяся печь, пылеунос

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### STRUCTURE AND PROPERTIES OF CONNECTING ALKALINE ACTIVATION USING CEMENT DUST

***Salambek A. Aliev<sup>2</sup>, Razeta S-A.Murtazayeva<sup>3</sup>, Madina Sh. Salamanova<sup>1</sup>***

*<sup>1-3</sup>Academician M.D. Millionshtchikov Grozny State Oil Technical University,*

*<sup>1-3</sup>100 Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,*

*<sup>1</sup>e-mail: [madina\\_salamanova@mail.ru](mailto:madina_salamanova@mail.ru), <sup>2</sup>e-mail: [asa-fenix@mail.ru](mailto:asa-fenix@mail.ru),*

*<sup>3</sup>e-mail: [razet.murtazaeva@gmail.com](mailto:razet.murtazaeva@gmail.com)*

**Abstract.** *Objectives* In the process of firing Portland cement clinker in electrostatic precipitators, in rotary kilns, a large amount of harmful substances, both clinker and aspiration, accumulates, therefore rational use of these products leads to certain shares of a full-fledged river resource, which are derived from industrial cement. It should be noted that the reuse of dust electrostatic precipitators is impossible. **Method** The basis for obtaining durable and more resource-efficient composites is based on modern technological methods that contribute to the improvement of technical and physico-mechanical properties, with the integrated application of technogenic raw materials and liquid sodium binder. **Result** The basis for obtaining durable and more resource-efficient composites is based on modern technological methods that contribute to the improvement of technical and physico-mechanical properties, with the integrated application of technogenic raw materials and liquid sodium binder. **Conclusion** The developed clinker-free binder formulations using the cement industry wastes and sodium-based sludge glass will make it possible to produce less expensive, durable, and durable composites that will partially replace traditional concrete with expensive portland cement.

**Acknowledgment** The work was performed as part of research on the implementation of the research project № 18-48-200001 "High-quality concretes with enhanced performance properties based on local natural and technogenic raw materials" received support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR).

**Keywords.** Technogenic raw materials, Portland cement clinker, aspiration dust, electrostatic precipitator dust, alkali metals, dispersion, rotary kiln, pileunus

**Введение.** Портландцемент на протяжении многих лет считается наиболее востребованным материалом в строительной индустрии. Производство его и промышленное потребление стремительно растет из года в год, и является немаловажным показателем экономического развития страны. Но согласно данным CPCB (CentralPollutionControlBoard) [1, 2-7] производство портландцемента можно отнести к категории вредных производств по количеству выбросов в окружающую среду. Выбросы различного характера присутствуют практически на всех технологических переделах производства цемента. Среди вредных веществ, содержащихся в газоздушных выбросах, можно заметить аспирационную и клинкерную пыль вращающихся печей, известь, большие объемы углекислоты и сернистых соединений, диоксины и др.

Клинкeroобжигательные вращающиеся печи являются основным источником пылевых деления (30 % пылевыхыноса), связано это с тем, что процесс обжига клинкера происходит по принципу противотока, отработанные дымовые газы увлекают в свой поток тонкодисперсные частицы обжигаемой сырьевой смеси. Установлено, что на производство каждого килограмма клинкера приходится до 7,5 м<sup>3</sup> отработанных газов с запыленностью до 70 г/м<sup>3</sup> [4,8-14]. А в соответствии с санитарными нормами проектирования промышленных предприятий концентрация пыли в воздухе помещений не должна превышать 0,04 мг/м<sup>3</sup>, содержание в воздухе окиси углерода не допускается более 0,03 мг/м<sup>3</sup>, сероводорода — более 0,02 мг/м<sup>3</sup>. В воздухе, выбрасываемом в атмосферу, концентрация пыли не должна быть более 0,06 г/м<sup>3</sup> с тем, чтобы при рассеивании пыли в атмосфере за пределами санитарно-защитной зоны среднесуточная запыленность была не более 0,15 мг/м<sup>3</sup> [3, 4,15-24]. Таким образом, чтобы предотвратить вредные

выбросы в атмосферу и не навредить природной среде и человечеству, печные газы должны тщательно обеспыливаться, проходя через систему очистки. Эффективным пылеуловителем можно считать – электрофильтр, степень очистки которого составляет 98–99 %, при запыленности на входе 25–30 %, и допустимой концентрации пыли в выбросах 0,1–0,5 г/м<sup>3</sup>.

**Постановка задачи.** В процессе обжига портландцементного клинкера в электрофильтрах, вращающихся печей, скапливается большое количество пыли, как клинкерной, так и аспирационной, поэтому рациональное использование этих продуктов, содержащих определенную долю полноценного сырьевого ресурса, является актуальной задачей индустрии цемента. Необходимо отметить, что повторное использование пыли электрофильтров, возвратом в печь невозможно, так как в ней находится определенное количество щелочесодержащих примесей, а это негативно скажется на качестве клинкера.

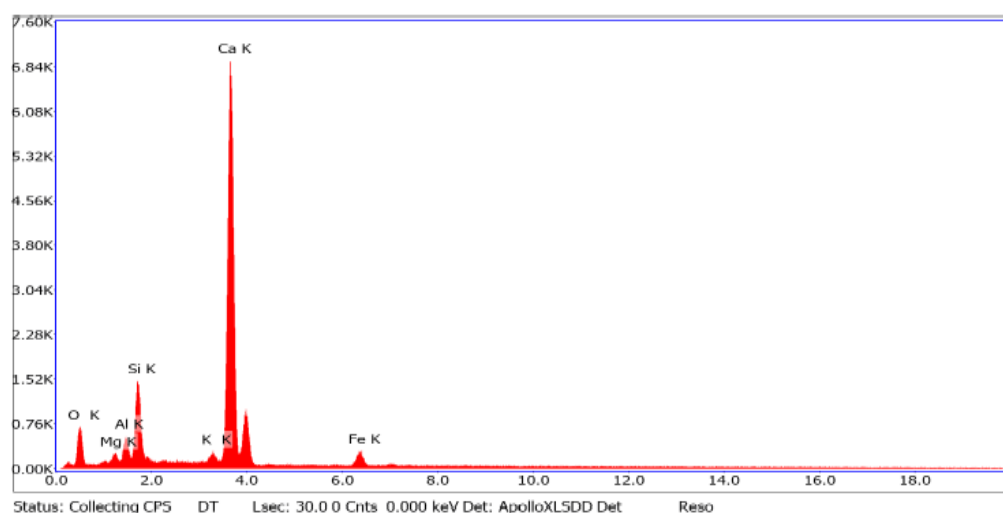
**Методы исследования.** В данной работе представлен возможный способ утилизации цементной пыли для получения бесклинкерных цементов щелочной активации и бетонов на их основе. Возможность проведения данных разработок была оправдана тем, что в Чеченской Республике функционирует с 1974 года цементный завод, и обжиг портландцементного клинкера производят в двух вращающихся печах, с производительностью по клинкеру 1200 тонн в сутки [3,19]. Нами была исследована цементная пыль, собранная из электрофильтров, расположенных в двух разных частях печи. В холодном конце печи выделяется пыль, называемая аспирационной, по своему составу она схожа с составом исходной сырьевой смеси. В последней горячей зоне печи, на участках охлаждения и галереи клинкерных конвейеров образуется клинкерная пыль. Клинкерная пыль представляет собой порошок темно-серого цвета, довольно абразивный. Тонкость помола, определяемая просеиванием на сите №008, показала остаток 23%. Аспирационная пыль – это порошок светло-бежевого цвета, значительно дисперснее клинкерной пыли, тонкость помола составила 18 %. Удельную поверхность исследуемых порошков исследовали на приборе ПСХ-12 по методу воздухопроницаемости, в табл. 1 приводятся свойства отобранных проб.

**Таблица 1. Свойства пыли электрофильтров**  
**Table 1. Properties of dust electrostatic precipitators**

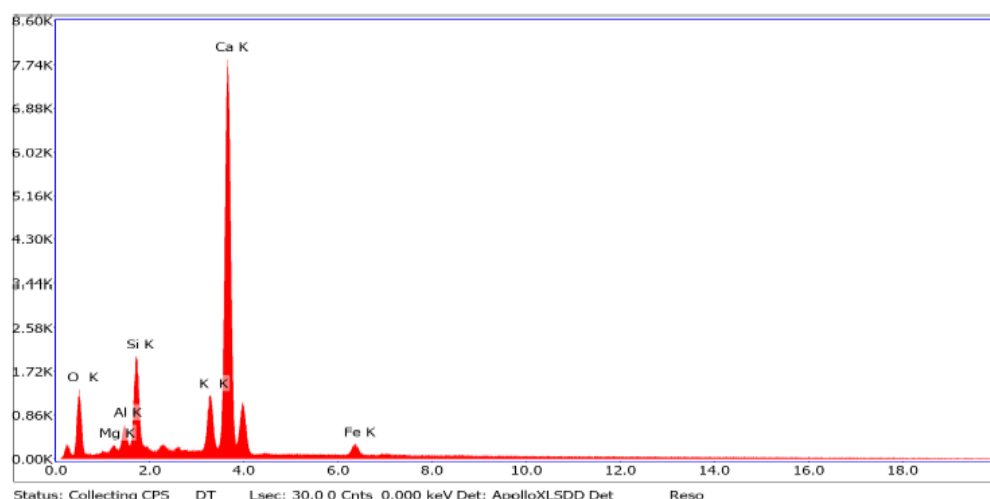
№	Пыль электрофильтров Dust of electrostatic precipitators	Истинная плотность г/см <sup>3</sup> True density g / cm <sup>3</sup>	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup> Bulk density, g / cm <sup>3</sup>	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг Specific surface, m <sup>2</sup> / kg
1	Аспирационная пыль Suction dust	2,59	1,13	210
2	Клинкерная пыль Clinker dust	3,12	1,24	280

**Обсуждение результатов.** Энергодисперсионный микроанализ исследуемых порошков пыли электрофильтров, выполненный с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200 i с интегрированной системой микроанализа Genesis Apex 2 EDS от EDAX (рис. 1) показал схожесть химических составов клинкерной (а) и аспирационной пыли (б) соответственно с портландцементным клинкером и исходной сырьевой смеси. Но необходимо отметить, что оксид щелочного металла К<sub>2</sub>О в пробе аспирационной пыли составляет 6,43 %, тогда как в клинкерной он снижается до 1,57 % (табл. 2).

Объяснению этому служит, то, что клинкерная пыль образовалась в горячей зоне твердофазового синтеза вращающейся печи при температурах 1300 °С и выше, здесь и происходит выгорание и разложение оксидов щелочных металлов [5-8].



а)



б)

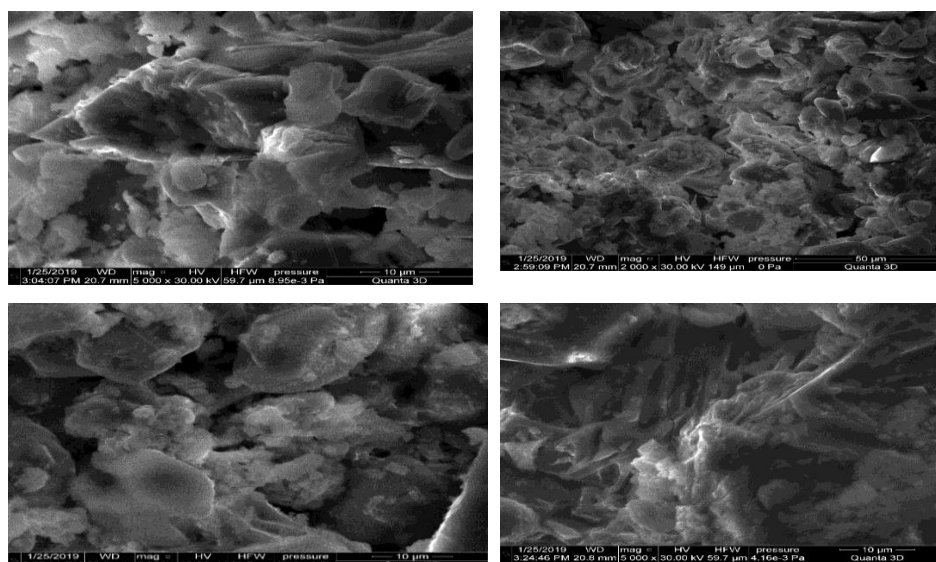
**Рис. 1. Энергодисперсионный анализ пыли электрофильтров:**  
 а) клинкерной; б) аспирационной

**Fig. 1. Energy dispersive analysis of electrostatic dust:**  
 а) clinker; б) aspiration

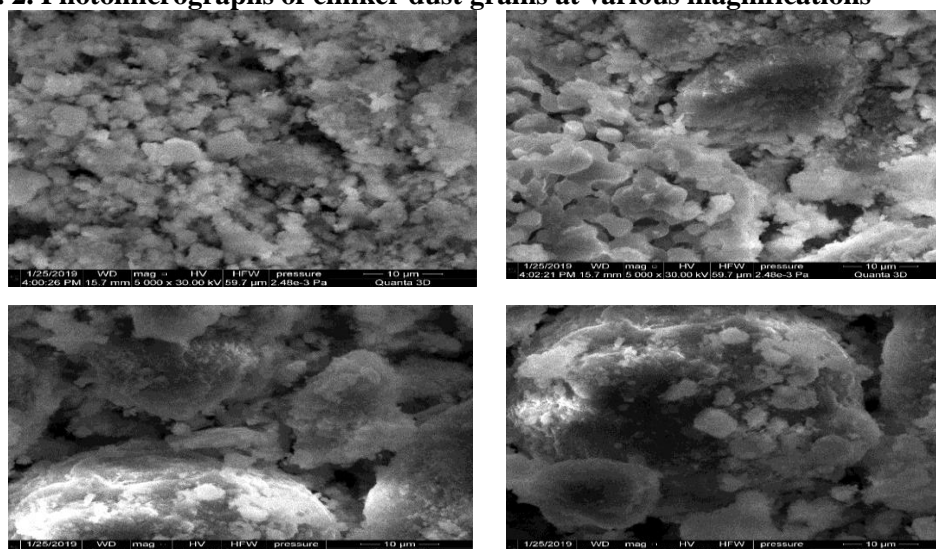
**Таблица 2. Химический состав пыли электрофильтров**  
**Table 2. The chemical composition of dust electrostatic precipitators**

Оксидный состав Oxide composition	Клинкерная пыль Clinker dust	Аспирационная пыль Aspiration dust
MgO	1,49	0,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,11	4,68
SiO <sub>2</sub>	16,89	20,31
K <sub>2</sub> O	1,57	6,43
CaO	71,64	64,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	3,47

Микрофотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, дают нам сравнительный анализ структуры пыли электрофильтров, зерна клинкерной пыли, при увеличении в 5000 раз, представлены крупными объемными частичками с явно выраженной спайностью, мелкими листочками, наблюдается явное присутствие минералов (рис. 2). Осмотр микрофотографий аспирационной пыли показал, что зерна обладают более рыхлой, пористой структурой, можно наблюдать начальную стадию минералообразования (рис. 3).



**Рис. 2. Микрофотографии зерен клинкерной пыли, при различных увеличениях**  
**Fig. 2. Photomicrographs of clinker dust grains at various magnifications**



**Рис. 3. Микрофотографии зерен аспирационной пыли, при различных увеличениях**  
**Fig. 3. Micrographs of aspiration dust grains at various magnifications**

Как отмечалось ранее [4], повторный возврат пыли электрофильтров в технологический цикл не целесообразен, так как химический анализ подтверждает присутствие щелочных металлов, содержание которых по ГОСТ строго ограничено, не более 0,67 %, к тому же установлено, добавление аспирационной пыли в сырьевую смесь, приводит к загустеванию шлама, что затруднит транспортировку последнего в питатели вращающихся печей. Для проведения сравнительного анализа и активности цементной пыли, по результатам химического анализа были определены соотношения между оксидами в виде соответствующих модулей и коэффициент насыщения (табл.3), в качестве контрольной пробы взят клинкер Чири-Юртовского завода.

Полученные модульные характеристики исследуемых порошков, показали, что существенно отличаются от показателей клинкера. Повышенный коэффициент насыщения. Установлено, что у промышленных клинкеров  $KH$  находится в пределах 0,85 – 0,95, более высокие показатели свидетельствуют о повышении трехкальциевого силиката, изменении сроков схватывания и тепловыделения при гидратации.



**Таблица 3. Модульные характеристики исследуемых порошков**  
**Table 3. Modular characteristics of the studied powders**

Материал Material	Модули Modules		
	коэффициент насыщения <i>KH</i>	кремнеземный модуль <i>n</i>	глиноземный модуль <i>p</i>
Аспирационная пыль Suction dust	1,30	1,8	1,08
Клинкерная пыль Clinker dust	0,98	2,6	1,18
Клинкер Clinker	0,92	2,2	1,30

Силикатный модуль, характеризующий наличие минералов силикатов и плавней, для обычного клинкера портландцемента составляет 1,7 – 3,5. Глиноземный модуль, отражающий отношение минералов плавней в клинкере, находится в пределе 1 – 2,5. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что модули цементной пыли явно характеризуют источник их образования, в конкретной зоне обжига, что и подтверждалось энергодисперсионным микроанализом. В работе предлагается возможный способ использования цементной пыли – получение бесклинкерных цементов щелочной активации. С использованием клинкерной и аспирационной пыли были приготовлены образцы–балочки размером 40х40х160 мм из смеси: цементная пыль – 480 кг, кварцевый песок Червленского месторождения (добавлялся в соотношении 1:3) – 1440 кг, вулканический пепел – 50 кг, жидкое стекло натриевое с силикатным модулем 2,8 и плотностью 1,24 г/см<sup>3</sup> – 120 л. Приготовленные образцы, через сутки распалубливались и помещались в сушильный шкаф при температуре 40 °С на пару дней.

Далее образцы до 28 суточного дозревания находились в воде, необходимо отметить, что первые трое суток, в сосуде вода менялась на чистую, так как происходило выщелачивание. Рецептуры и свойства полученных вяжущих приведены в таблице 4, а на рисунках 4, 5 можно рассмотреть формирование микроструктуры цементного камня в возрасте 7 и 28 суток на образцах-балочках из аспирационной и клинкерной пыли, затворенных жидкостекольным вяжущим.

**Таблица 4. Рецептуры и свойства вяжущих материалов щелочной активации**  
**Table 4. Formulations and properties of binders alkaline activation**

Свойства вяжущих Binder Properties	Цементная пыль Cement dust	
	Клинкерная пыль Clinker dust	Аспирационная пыль Suction dust
Водотвердое отношение	0,25	0,25
Начало схватывания, мин	34	26
Конец схватывания, мин	45	42
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2090	2080
Водопоглощение, %	5,6	4,2
Активность, МПа:		
7 сут	32,5	24,1
28 сут	68,7	49,6

Анализируя полученные результаты использования отходов цементной промышленности, в виде клинкерной и аспирационной пыли, нужно подчеркнуть, что ежедневно выделяются пылевывбросы в атмосферу, загрязняя атмосферу и окружающую среду, а те объемы пыли, которые уловили электрофилтры, необходимо, где-то складировать, занимая территории земельных угодий, а это опять же будет наносить вред работникам отрасли и близлежащим населенным пунктам. Поэтому рационально использовать отходы в виде цементной пыли в производстве вяжущих щелочной активации, к тому же полученные результаты прочности цементного камня подтверждают эффективность данных разработок [9-11,19-20].

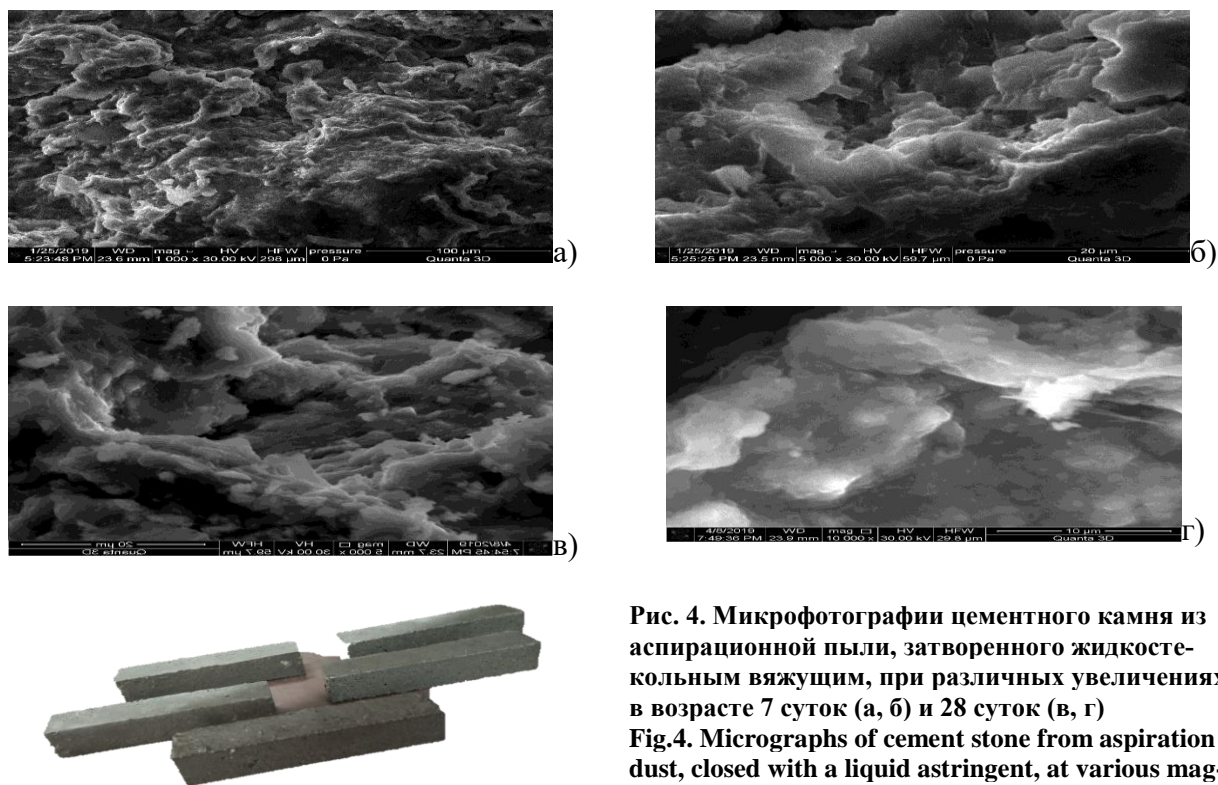


Рис. 4. Микрофотографии цементного камня из аспирационной пыли, затворенного жидкостекольным вяжущим, при различных увеличениях, в возрасте 7 суток (а, б) и 28 суток (в, г)  
Fig.4. Micrographs of cement stone from aspiration dust, closed with a liquid astringent, at various magnifications, at the age of 7 days (a, b) and 28 days (c, d)

Микрофотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, дают возможность наблюдать изменения структуры цементного камня, 7 суточные образцы 4 и 5 а, б характеризуются более мелкими, пористыми и несформировавшимися новообразованиями, особенно это видно на снимках при увеличении 5000 раз.

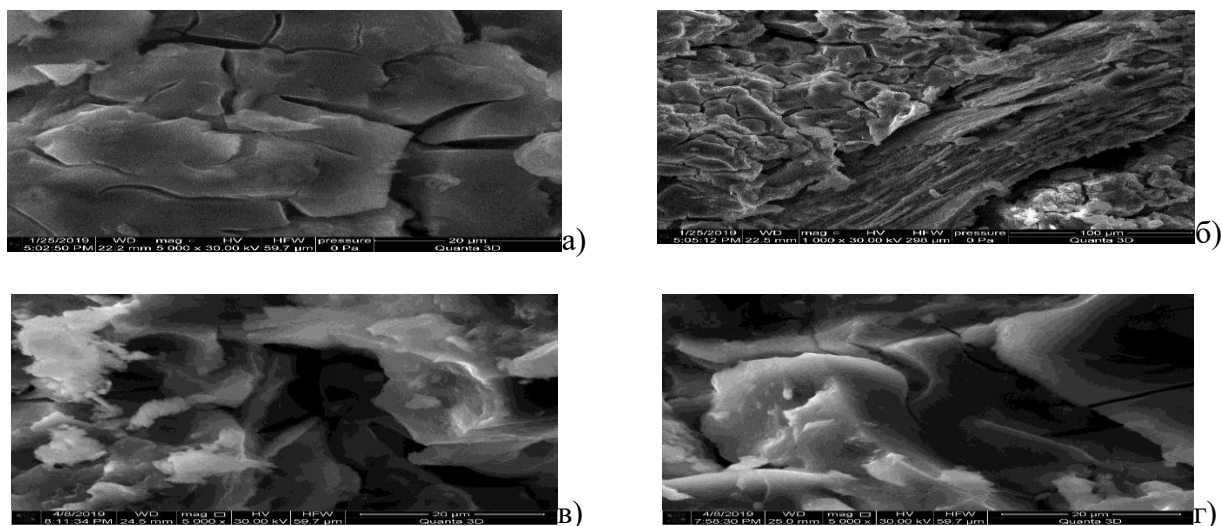


Рис. 5. Микрофотографии цементного камня из клинкерной пыли, затворенного жидкостекольным вяжущим, при различных увеличениях, в возрасте 7 суток (а, б) и 28 суток (в, г)  
Fig.5. Photomicrographs of cement stone from clinker dust, shuttered by a liquid-astringent binder, at various magnifications, at the age of 7 days (a, b) and 28 days (c, d)

Образцы 28 суточного возраста можно охарактеризовать явно выраженной плотной структурой, заметно присутствие сформированных кристаллов твердых растворов, увеличение в 10000 раз это подтверждает. К тому же, необходимо отметить существенное различие микро-структур цементного камня из аспирационного и клинкерного порошков, затворенных жидким натриевым стеклом.

**Вывод.** Таким образом, обобщая проведенные исследования можно отметить, что используя предлагаемый способ утилизации цементной пыли возможно получение бетонных композитов, структура и свойства которых позволяют утверждать о получении эффективных вяжущих щелочной активации на менее затратном вяжущем.

Предлагаемые рецептуры вяжущих, составляющими в которых будут отходы электро-фильтров клинкерных печей, активированные жидкостекольным натриевым затворителем, позволят расширить базу используемых разновидностей вяжущих веществ и частично заменить дорогой и энергоемкий портландцемент в строительстве.

#### Библиографический список

1. Dietz A, Ramroth H, Urban T, Ahrens W, Becher H (2004) Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. *Int J Cancer*, 108.
2. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL (2001) Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country. *Occup Med (Lond)*, 51, 367-73.
3. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Ватаев У.В. Цементная промышленность Чеченской республики / Вестник Академии Наук Чеченской республики № 1 (22), Грозный 2014, С. 109-114.
4. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х., Муртазаева Т. С.-А. Современные цементные технологии с применением передовых способов пылегазоочистки // Коллективная монография по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного материаловедения». Посвященной 80-летию Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора Х.И. Ибрагимова, состоявшейся в г. Грозном 18-19 декабря 2015 г. 2 т. С 99-107.
5. Удодов С.А., Черных В.Ф., Черный Д.В. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого бетона // Сухие строительные смеси. – 2008. – № 3. – С.70.
6. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete // В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. С. 04018.
7. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. С. 337.
8. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME 2017" 2017. С. 05011.
9. Солдатов А.А., Сариев И.В., Жаров М.А., Абдураимова М.А. Строительные материалы на основе жидкого стекла // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности Материалы IV-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Н.И. Стоянов (ответственный редактор). 2016. – С. – 192-195.
10. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Аласханов А.Х. Исследование свойств бетонов на бесклинкерных вяжущих // Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России, посвященная 105-летию М. Д. Миллионщикова: материалы Всероссийской научно – практической конференции 11-12 июня 2018 г. – Грозный: ФГБОУ ВО «ГТНТУ», 2018. – С.392 – 399.
11. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.
12. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. -SS.707-714.
13. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnjuk, L.H., Volodchenko, A.N. Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 19. Pages 40617-40622.
14. Lesovik, V.S., Zagorodnyuk, L.K., Mestnikov, A.E., Kudinova, A.I., Sumskoi, D.A. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 5. Pages 12383-12390.
15. M.Sh. Mintsae, D. K.-S. Bataev, K. Kh. Mazhiev, Adam Kh. Mazhiev. Prospects for Using 3D-Printing Technologies in Construction of Buildings in Seismic Areas. *Advances in Engineering Research*, volume 177, International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018), pp. 311-315.
16. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Volodchenko, A.N., Zagorodnjuk, L.H., Pukharens, Y.V. Composite performance improvement based on non-conventional natural and technogenic raw materials // 2016. International Journal of Pharmacy and Technology 2016. 8(3), c. 18856-18867
17. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008/– 592 pp.
18. Geopolymer technology: The current state of the art// P.Duxson, A. Fernandez, J. Provis / J. Mater. Sci. 2007.–V. 42. P.2917-2933.

19. Муртазаев С-А.Ю. Влияние активных центров поверхности на реакционную способность минеральных добавок / С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова, М.С. Сайдумов, З.Х. Исмаилова // Научный журнал «Современная наука и инновации» (Ставрополь – Пятигорск). – 2017. - №2 (18). - С.168-175.
20. С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. – 2018. – №2 (Т.46).– С. 65 –70.
21. Е.А. Никифоров, В.И. Логанина, Е.Е. Симонов Влияние щелочной активации на структуру и свойства диатомита / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. – № 2. – С.30-32.
22. Martschuk V. Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand von Mochleistungsbetonen / V. Martschuk, T. Stark //Thesis: Wiss. Z.Bauhaus -Univ. Weimar. - 1998. V.44. - №1-2. - S.92-103.
23. Larbi, J.A. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen //Cem. and Concr. Res. - 1990. Vol. 20. - № 5. - pp. 783-794.
24. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S.,Strokov V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymers binders // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. Vol. 9. Issue 22. pp. 16945–16955.

#### References:

1. Dietz A, Ramroth H, Urban T, Ahrens W, Becher H (2004) Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. *Int J Cancer*, 108.
2. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL (2001)Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country. *Occup Med (Lond)*, 51, 367-73.
3. Murtazayev S-A.YU., Salamanova M.SH., Vataev U.V. Tsementnaya promyshlennost' Chechenskoj respubliki / Vestnik Akademii Nauk Chechenskoj respubliky № 1 (22) , Grozny 2014, S. 109-114. [Murtazayev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Vataev U.V. Cement Industry of the Chechen Republic / Bulletin of the Academy of Sciences of the Chechen Republic № 1 (22), Grozny 2014, p. 109-114. (In Russ)]
4. Murtazayev S-A.YU., Salamanova M.SH., Alaskhanov A.KH., Murtazayeva T. S-A. Sovremennyye tsement-nyye tekhnologii s primeneniym peredovykh sposobov pylegazoochistki // Kollektivnaya monografiya po materialam Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy sovremennogo materialovedeniya». Posvyashchennoy 80-letiyu Zasluzhennogo deyatelya nauki RF, d.t.n., professora KH.I. Ibragimova, sostoyavsheysya v g. Groznom 18-19 dekabrya 2015 g. 2 t. S 99-107. [Murtazayev S-U., Salamanov M.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazayeva T.S.A. Modern cement technologies with the use of advanced methods of dust and gas cleaning // Collective monograph on materials of the All-Russian scientific-practical conference "Actual problems of modern materials science." Dedicated to the 80th anniversary of the Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor Kh.I. Ibragimova, held in Grozny on December 18-19, 2015 2 tons. From 99-107. (In Russ)]
5. Udodov S.A., Chernykh V.F., Chernyy D.V. Primeneniye poristogo zapolnitelya v otdelochnykh sostavakh dlya yacheistogo betona // Sukhiye stroitel'nyye smesi. – 2008. – № 3. – С.70. [Udodov SA, Chernykh VF, Cherny DV Application of porous aggregate in finishing compositions for cellular concrete // Dry mixes. - 2008. - № 3. - C.70. (In Russ)]
6. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete //В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Cep. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018. C. 04018.
7. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. C. 337.
8. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Cep. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. C. 05011.
9. Soldatov A.A., Sariyev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Stroitel'nyye materialy na osnove zhidkogo stekla // V sbornike: Aktual'nyye problemy stroitel'stva, transporta, mashinostroyeniya i tekhnosfernoy bez-opasnosti Materialy IV-y yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Severo-Kavkazskogo federal'nogo uni-versiteta. N.I. Stoyanov (otvetstvennyy redaktor). 2016. – S. – 192-195. [Soldatov A.A., Sariyev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Building materials based on liquid glass // In the collection: Actual problems of construction, transport, engineering and technosphere safety Materials of the IV-th annual scientific and practical conference of the North-Caucasian Federal University. N.I. Stoyanov (executive editor). 2016. - S. - 192-195. (In Russ)]
10. Murtazayev S-A.YU., Salamanova M.SH., Saydumov M.S., Alaskhanov A.KH. Issledovaniye svoystv betonov na besklinkernykh vyazhushchikh // Perspektivy razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa i sovremennoye sostoyaniye neftegazovogo inzhenernogo obrazovaniya v Rossii, posvyashchennaya 105-letiyu M. D. Millionshchikova: materialy Vserossiyskoj nauchno – prakticheskoy konferentsii 11-12 iyunya 2018 g. – Grozny: FGBOU VO «GGNTU», 2018. – S.392 – 399. [Murtazayev S.-U., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Alaskhanov A.Kh. Investigation of the properties of concrete on besklinkernykh binders // Prospects for the development of the fuel and energy complex and the current state of oil and gas engineering education in Russia, dedicated to the 105th anniversary of MD Millionshchikov: materials of the All-Russian scientific-practical conference June 11-12, 2018 - Grozny: FSBEI IN "GGNTU", 2018. - C.392 - 399. (In Russ)]
11. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu., Ismailova Z.H The Use of Highly Active Additives for the Production of Clinkerless Binders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 355-358.
12. Salamanova M.Sh., Murtazayev S. Yu. Clinker-free binders based on finely dispersed mineral components // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. –SS.707-714.
13. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Zagorodnjuk, L.H., Volodchenko, A.N. Influence of the inorganic modifier structure on structural composite properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 19. Pages 40617-40622.
14. Lesovik, V.S., Zagorodnyuk, L.K., Mestnikov, A.E., Kudina, A.I., Sumskoi, D.A. Designing of mortar compositions on the basis of dry mixes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Volume 10. Issue 5. Pages 12383-12390.

15. M.Sh. Mintsae, D. K.-S. Bataev, K. Kh. Mazhiev, Adam Kh. Mazhiev. Prospects for Using 3D-Printing Technologies in Construction of Buildings in Seismic Areas. *Advances in Engineering Research*, volume 177, International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2018), pp. 311-315.
16. Volodchenko, A.A., Lesovik, V.S., Volodchenko, A.N., Zagorodnjuk, L.H., Pukharens, Y.V. Composite performance improvement based on non-conventional natural and technogenic raw materials // 2016. *International Journal of Pharmacy and Technology* 2016. 8(3), c. 18856-18867
17. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008/– 592 pp.
18. Geopolymer technology: The current state of the art// P.Duxson, A. Fernandez, J. Provis / J. Mater. Sci. 2007.–V. 42. P.2917-2933.
19. Murtazayev S-A.YU. Vliyaniye aktivnykh tseitrov poverkhnosti na reaktivnyy sposobnost' mineral'nykh dobavok / S-A.YU. Murtazayev, M.SH. Salamanova, M.S. Saydumov, Z.KH. Ismailova // Nauchnyy zhurnal «Sovremennaya nauka i innovatsii» (Stavropol' – Pyatigorsk). – 2017. - №2 (18). -S.168-175. [Murtazayev S.A.Yu. The influence of surface active sites on the reactivity of mineral additives / C-A.Y. Murtazayev, M.Sh. Salamanova, M.S. Saydumov, Z.Kh. Ismailova // Scientific journal "Modern Science and Innovations" (Stavropol - Pyatigorsk). - 2017. - №2 (18). -C.168-175. (In Russ)]
20. S-A.YU. Murtazayev, M.SH. Salamanova Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoy prirody // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. – 2018. – №2 (T.46).– S. 65 –70. [S.A.Y. Murtazayev, M.Sh. Salamanova. Prospects for the use of thermo-activated raw materials of aluminosilicate nature // Volga Scientific Journal. 2018. - №2 (T.46) . pp. 65 –70. (In Russ)]
21. Ye.A. Nikiforov, V.I. Loganina, Ye.Ye. Simonov Vliyaniye shchelochnoy aktivatsii na strukturu i svoystva diatomita / Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2011. – № 2. – S.30-32.  
[E.A. Nikiforov, V.I. Loganina, E.E. Simonov Effect of alkaline activation on the structure and properties of diatomite / Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. 2011 № 2. pp.30-32. (In Russ)]
22. Martschuk V. Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand von Mochleistungsbetonen / V. Martschuk, T. Stark //Thesis: Wiss. Z.Bauhaus -Univ. Weimar. - 1998. - V.44. - №1-2. - S.92-103.
23. Larbi, J.A. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen //Cem. and Concr. Res. - 1990. - V20. - № 5. - pp. 783-794.
24. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S.,Strokovaya V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders // *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. 2014. Vol. 9. Issue 22. pp 16945–16955.

**Сведения об авторах:**

**Саламанова Мадина Шахидовна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

**Алиев Саламбек Алимбекович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

**Муртазаева Разета Сайд-Альвиевна** – аспирант, кафедра технологии строительного производства.

**Information about the authors:**

**Madina Sh. Salamanova** – Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Construction Technology.

**S. A. Aliev** - Cand. Sci. (Technical). Assoc. Prof., Department of Construction Technology.

**Razeta S.-A. Murtazaeva** - Graduate student, Department of Construction Technology.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 20.05.2019.

**Принята в печать** 21.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 20.05.2019.

**Accepted for publication** 21.06.2019.

**Для цитирования:** Алимуратов Ш.А., Гаджиев А.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. Влияние вакуумной обработки и технологических факторов на прочность жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2):158-166. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-158-166

**For citation:** Alimuradov Sh.A., Gadzhiev A.M., Khadzhishalapov G.N., Hezhev T.A. Effect of vacuum treatment on technological properties of heat-resistant ceramzyt-concrete on compositional binding. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(2):158-166. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-158-166

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 666.974.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-158-166

### ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ ЖАРОСТОЙКОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

Алимуратов Ш.А.<sup>4</sup>, Гаджиев А.М.<sup>3</sup>, Хаджишалапов Г.Н.<sup>1</sup>, Хежев Т.А.<sup>2</sup>

<sup>1,3,4</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1,3,4</sup> 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>2</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

<sup>2</sup> 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

<sup>1</sup> e-mail:dekanat\_asf@mail.ru, <sup>2</sup> e-mail: hejev\_tolya@mail.ru,

<sup>3</sup> e-mail:5542334f@mail.ru, <sup>4</sup> e-mail:archiash9@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является изучения влияния вакуумной обработки, температуры нагрева, времени перемешивания и усилия пригруза на прочность жаростойкого керамзитобетона для футеровки тепловых агрегатов. **Метод.** Исследование основано на технологии вакуумной обработки жаростойкого бетона на основе композиционного вяжущего для футеровки пода вагонетки туннельной печи обжига кирпича, вакуумного уплотнения бетонной смеси. **Результат.** Исследовано влияние вакуумной обработки смеси на технологические свойства жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем из портландцемента и тонкомолотого керамзитового песка, активированных на планетарной мельнице (Активатор–4М). Разработаны составы и исследованы технологические свойства керамзитобетона в зависимости от температуры нагрева и количества тонкомолотой добавки. **Вывод.** Результаты анализа зависимости прочности керамзитобетона от температуры нагрева, времени перемешивания и усилия пригруза подтверждают, что показатели прочности бетона при вакуумировании выше, чем у бетона без вакуумной обработки; повышение прочности бетона после вакуумной обработки при различных технологических режимах воздействия объясняется повышением показателей удобоукладываемости, которое характеризуется подвижностью и жесткостью бетонной смеси, более плотной упаковкой заполнителя в структуре бетона, а также большим эффектом от вакуумного уплотнения, связанное с отсосом воды и воздуха, а также статическим уплотнением вследствие разности атмосферного давления и давления вакуум-полости. Величина действующего усилия достигает 70-75 кН/м<sup>2</sup> с удалением от поверхности вакуумирования воды и воздуха; передаваемое на бетон давление снижается, так как часть нагрузки расходуется на определение сил внутреннего трения и развития контактных напряжений в твердой фазе.

**Ключевые слова:** вакуумная, обработка, композиционное, вяжущее, жаростойкий, керамзитобетон, технологические, свойства

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### EFFECT OF VACUM TREATMENT ON TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT CERAMZYT-CONCRETE ON COMPOSITIONAL BINDING

Shahmurad A. Alimuradov<sup>4</sup>, Abdulla M. Gadzhiev<sup>3</sup>, Khaji N. Khadzishalapov<sup>1</sup>, Tolya A. Hezhev<sup>2</sup>

<sup>1,3,4</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1,3,4</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>2</sup>H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

<sup>2</sup>173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

<sup>1</sup>e-mail:dekanat\_asf@mail.ru, <sup>2</sup>e-mail: hejev\_tolya@mail.ru,

<sup>3</sup>e-mail:5542334f@mail.ru, <sup>4</sup>e-mail:archiash9@mail.ru

**Abstract. Objectives** The aim of the study is to study the effect of vacuum treatment, heating temperature, mixing time and load force on the strength of heat-resistant expanded clay concrete for lining thermal units. **Method** The study is based on the vacuum processing technology of heat-resistant concrete based on a composite binder for lining the hearth of a trolley of a brick kiln, vacuum-packed concrete mix. **Result** The effect of vacuum processing of the mixture on the technological properties of heat-resistant expanded clay concrete on a composite binder made from Portland cement and finely ground expanded clay activated in a planetary mill (Activator-4M) is investigated. Compositions have been developed and the technological properties of expanded clay concrete have been investigated depending on the heating temperature and the amount of finely ground additives. **Conclusion** The results of the analysis of the dependence of the strength of expanded clay concrete on the heating temperature, the mixing time and the load strength confirm that the concrete strength indicators during evacuation are higher than for concrete without vacuum treatment; the increase in concrete strength after vacuum treatment under various technological exposure conditions is explained by an increase in workability indicators, which is characterized by the mobility and stiffness of the concrete mixture, denser packing of aggregate in the concrete structure, and also the large effect of vacuum compaction associated with the suction of water and air as well as static sealing due to the difference in atmospheric pressure and vacuum cavity pressure. The magnitude of the effective force reaches 70-75 kN / m<sup>2</sup> with the removal of water and air from the vacuum surface; the pressure transmitted to the concrete is reduced, since part of the load is spent on determining the forces of internal friction and the development of contact stresses in the solid phase.

**Keywords:** vacuum, processing, compositional, astringent, heat-resistant, expanded clay concrete, technological, properties

**Введение.** Вакуумирование является одним из эффективных технологических методов, позволяющих извлечь из уложенного и уплотненного бетона около 10...20 % избыточной (свободной) воды затворения, благодаря чему существенно улучшаются физико-механические свойства бетона.

**Постановка задачи.** Цель исследования – изучения влияния вакуумной обработки, и технологических факторов, а именно температуры нагрева, времени перемешивания и усилия пригрузки на прочность жаростойкого керамзитобетона для футеровки тепловых агрегатов. Разработка технологии вакуумной обработки жаростойкого бетона на основе композиционного вяжущего для футеровки пода вагонетки туннельной печи обжига кирпича, расчет технологических параметров вакуумного уплотнения бетонной смеси и ее влияние на технологические свойства жаростойкого керамзитобетона является актуальной задачей.

Жаростойкие керамзитобетоны должны иметь жесткость в пределах 2-3 см [1-6,13]. При этой жесткости качественная укладка и уплотнения смеси является достаточно сложной задачей. В связи с этим улучшение показателя удобоукладываемости за счет увеличения В/Ц отношения является важной задачей. Так как в жаростойких керамзитобетонах любая излишняя во-



да оказывает отрицательное воздействие на качество футеровки и в процессе эксплуатации может привести к взрывообразному разрушению бетона, из-за порового давления в структуре бетона, удаление влаги до процесса сушки изделий имеет огромное значение.

После вакуумной обработки бетон приобретает структурную прочность 0,3...0,4 МПа, что достаточно для распалубки заформованных блоков. В связи с тем, что вакуумная обработка эффективно для тонкостенных конструкций (не более 25...300 мм) [7,14] было принято решение за толщину блоков футеровки принять 300 мм, что позволяет эффективно уплотнять и извлекать из бетонной смеси избыточную влагу и лишний воздух, имеющийся в пустотах бетона путем создания в плоскости бетона разряжения, направленного к поверхности вакуума.

**Методы исследования.** Вакуумирование обычно применяют при бетонировании полов, сводов-оболочек и других конструкций с развитой горизонтальной поверхностью. Использование современных вакуумных установок позволяет улучшить технологические свойства жестких жаростойких бетонных смесей за счет оптимизации В/Ц и применения современных пластифицирующих добавок.

Процесс механического вакуумирования заключается в извлечении из уложенного бетона части воды через проницаемую стенку, на внешней поверхности на которой создается вакуум [1,7]. После укладки керамзитобетона на под вагонетки, на его верхней, свободной поверхности устанавливается вакуум-щит. Он представляет собою раму с укрепленной на ней прочной решеткой, металлической сеткой, а также в некоторых случаях хлопчатобумажным фильтром. Задняя грань неглубокой рамы герметически прикрывается листовым металлом, а образовавшаяся таким образом внутренняя полость присоединяется к вакуум-насосу.

По контуру рамы, со стороны решетки, укладывается валик из мягкого каучука, с тем, чтобы обеспечить воздухонепроницаемость вакуум-щита по линии соприкосновения его с поверхностью бетона. На вакуум-щите устанавливается обычно и вибратор, который пускают в ход с самого начала, чтобы обеспечить плотное соприкосновение вакуум-щита с бетоном. В вакуум-проводке, на некотором расстоянии от ввода у щита, включается манометр (вакуумметр) для контроля разрежения, а далее, за присоединением к гибкому шлангу, устанавливается отстойный бак, куда поступает отсасываемая из бетона вода. Разрежение, создаваемое в вакуум-щите насосом, вызывает отсасывание воды из бетона и отвод ее в отстойник.

Процесс водоотведения и заметное повышение плотности керамзитобетона бетона можно объяснить по схеме, предложенной в работе [7].

Предположим, что масса бетона толщиной  $H$  ограничивается двумя плоскостями  $AA'$  - свободной поверхностью (соприкасающейся с окружающим воздухом) и  $BB'$  - непроницаемой стенкой.

Накроем плоскость  $AA'$  вакуум-щитом, для того, чтобы рассматривать задачу как одномерную (одного параметра  $z$ ). Вакуум-щит создает на  $AA'$  разрежение –  $P_0$ , действие выражается в том, что оно побуждает содержащиеся в бетоне воду и воздух двигаться в направлении  $z$ . Вместе с тем оно создает давление  $+P_0$  как результат реакции рамы и решетки.

По направлению  $O_z$ , в возрастающих расстояниях от  $O$ , разместим манометры, представляющие собой горизонтальные, наполненные водой трубки, на одном конце которых имеется полый сетчатый шарик, через который заключенная в трубку вода сообщается с бетонной смесью, другие же концы трубок сообщаются с ртутными манометрами (вакуумметрами).



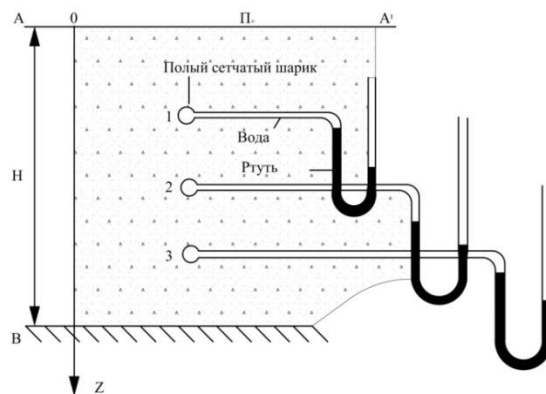


Рис. 1. Схема определения вакуумного эффекта  
 Fig. 1. The scheme for determining the vacuum effect

Из опыта, проведенной на установке, собранной по схеме, приведенной в работе [7], можно определить среднюю эффективность вакуумирования по формуле [1].

$$\varepsilon_m = \frac{E}{Z} = \varepsilon_0 \left[ 0.42 - 0.086 \cdot 1g \frac{qZ}{\varepsilon_0} \right], \quad [1]$$

где  $E$  - количество воды,  $Z$  - толщина слоя вакуумирования по направлению вертикальной оси,  $\varepsilon_0$  - начальное количество воды,  $q$  - постоянная для данного типа бетона.

Если значение  $qZ$  превышает 3, отношение  $E/Z$  стремится к  $\varepsilon_0/4$ .

Этот опыт показывает, что из массива керамзитобетона можно извлечь лишь  $1/4$  воды затворения, эти выводы позволяют увеличить  $B/C$  отношение в бетоне на 25%.

Элементы из жаростойкого бетона не требуют предварительной (до строительства их них теплового агрегата) сушки и обжига; они обладают остаточной монтажной прочностью [7]; удаление влаги (собственно сушка) жаростойкого керамзитобетона происходит в процессе вывода теплового агрегата на рабочий режим.

Для жаростойкого керамзитобетона сушка и первый нагрев имеют решающее значение, так как от них зависят дальнейшая работоспособность теплового агрегата, его свойства в процессе эксплуатации, а также долговечность.

Процессы, которые происходят в жаростойком керамзитобетоне при сушке и первом нагреве, зависят от его состава, влажности, конструктивных особенностей элементов теплового агрегата (наличие кожуха, ребер и др.) и нагрузки на них [5,8].

Например, на  $1 \text{ м}^3$  бетона при затворении смеси вводят 150-250 л воды, которая, испаряясь при нагреве, превращается в пар со значительным увеличением в объеме, создавая напряжения в структуре бетона. Кроме того, при нестационарном нагреве и остывании бетонных элементов в них появляются собственные температурно-влажностные напряжения.

В результате в бетоне при изменении температурного режима из-за напряженного состояния могут появляться микро- и макротрещины или он может полностью разрушаться. Нарушение структуры бетона при нагреве и остывании оказывает влияние на его свойства. Нагрев вызывает также в составляющих бетона дополнительную гидратацию и реакции в твердой фазе.

Массообмен, напряжения, возникающие в структуре бетона и в конструктивных элементах, изготовленных из него, а также химические реакции в бетоне непосредственно связаны друг с другом и влияют на его сушку и нагревание [1,10].

Для определения влияния вакуумной обработки на прочность жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем в зависимости от технологических факторов такие, как температура нагрева, время перемешивания и усилия пригруза были изготовлены образцы жаростойкого бетона из базового состава бетона, приведенные в табл.1.

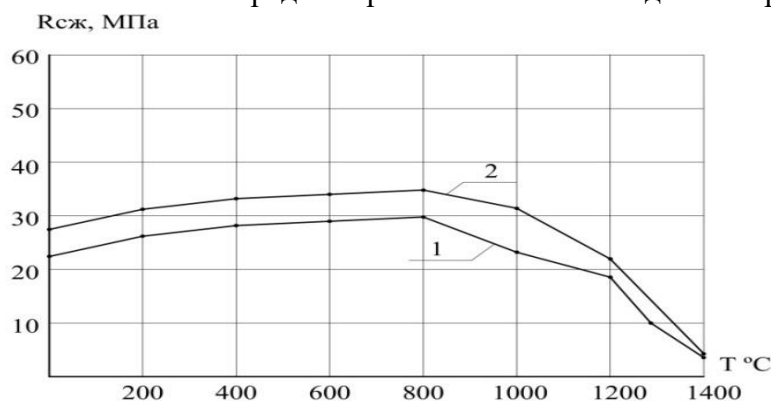
**Таблица 1. Состав жаростойкого керамзитобетона на композиционно вяжущим**  
**Table 1. Composition of heat-resistant expanded clay concrete on composite binders**

№	Наименование компонентов Name of components	Расход кг/м <sup>3</sup> Consumption kg / m <sup>3</sup>	Тонкость помола г/см <sup>2</sup> Grinding fineness g / cm <sup>2</sup>	Крупность зерен мм. The grain size mm.	%	
					Вяжущее Astringent	заполнитель Aggregate
1	Активизированное вяжущее Activated binder	400	3500	-	-	-
	a) Цемент Cement	280	3500	-	70	-
	b) Добавка Additive	120	3500	-	30	-
2	Крупный заполнитель керамзитовый гравий Large aggregate expanded clay gravel	350	-	3-5 5-10	-	50 50
3	Мелкий заполнитель керамзитовый песок Fine aggregate expanded clay sand	300	-	0,2 – 0,4 0,4 – 0,9 0,9 – 1,0	-	20 20 60
4	Пластифицирующая добавка СП – 1 The plasticizing additive SP - 1	2	-	-	8	-

Результаты испытания на прочность образцов жаростойкого керамзитобетона в зависимости от температуры нагрева, времени перемешивания и усилия пригруза приведены на рис. 2, 3 и 4.

На рис. 2 приведены зависимости прочности при сжатии от температуры нагрева в диапазоне от 20° до 1200°С оптимального состава бетона на композиционном вяжущем с тонкомолотой добавкой до 30%, без вакуумирования и с вакуумной обработкой.

Анализ зависимости прочности свидетельствует о том, что при повышении температуры нагрева наблюдается плавное повышение предела прочности на сжатие до температуры 800°С.



**Рис. 2. Зависимость прочности жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем от температуры нагрева** После сушке при 105°С. 2. После вакуумирования и сушке при 105°С.

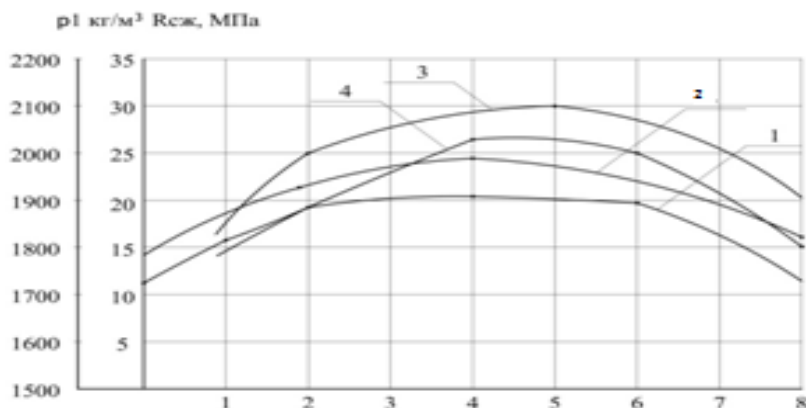
**Fig. 2. The dependence of the strength of heat-resistant expanded clay on a composite binder on the heating temperature** 1. After drying at 105°C. 2. After evacuation and drying at 105°C

В интервале температуры от 800-1200°С наблюдается снижение прочности до 20-25% по сравнению с образцами по сравнению с образцами бетона, высушенными до постоянной массы. Интервал температур 500-800°С характеризуется дегидратацией гидроксида кальция, что вызывает нарушение структуры портландцементного камня и приводит к снижению прочности.

В портландцементном камне на основе тонкомолотой добавки из керамзитового песка наблюдается увеличение прочности после высушивания образцов до постоянной массы. Это происходит вследствие уплотнения структуры цементного камня в процессе удаления воды, в результате прочность повышается в 1,5 раза относительно исходной.

Зависимость прочности от температуры нагрева жаростойкого керамзитового бетона на композиционном вяжущем после нагрева при температуре 105°С показывает, что вакуумная обработка повышает прочность жаростойкого бетона соответственно на 9 – 10%.

Влияние продолжительности перемешивания после загрузки всех компонентов бетонной смеси на прочность при сжатии и плотность после вакуумной и без вакуумной обработки приводятся на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость прочности и средней плотности  $\rho$  от времени перемешивания жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем 1 - для обычного жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем, 2. - с вакуумной обработкой, 3. - вакуумной обработкой, 4. - без вакуумной обработки**

**Fig. 3. The dependence of strength and average density  $\rho$  on the mixing time of the heat-resistant expanded clay concrete on a composite binder. 1. for conventional heat-resistant expanded clay concrete on a composite binder, 2. the same with vacuum treatment, 3. the same with vacuum treatment, 4. without vacuum treatment**

Результаты анализа зависимости прочности бетона от времени перемешивания показали, что максимальное значение прочности достигается при времени перемешивания в течение 4-5 минут. С увеличением продолжительности перемешивания показатели прочности и плотности бетона снижаются из-за расслоения бетонной смеси. Показатели прочности и плотности свидетельствуют, что режим, выбранный для перемешивания, можно рассматривать как оптимальный. Из рис. 3. видно, что максимальное значение предела прочности при сжатии обеспечивает бетонная смесь с вакуумной обработкой при продолжительности перемешивания от 3 до 4 минут, прочность достигает до 23-25 МПа, что на 20-23% выше показателей по сравнению с показателем бетонной смеси без вакуумной обработки.

В технологии производства изделий из жаростойкого бетона наиболее распространенными методами уплотнения формовочных масс являются: вибрация, вибрация с пригрузом, прессование или вибропрессование, а также трамбование [15].

Предварительные испытания показали, что виброформование керамзитового жаростойкого бетона без пригруза оказалось не эффективным, так как в этом случае требуется увеличение водотвердого отношения в смеси, что приводит к снижению прочности бетона [15]. Из-за образования в процессе сушки на изделиях трещин, которые приводят к значительному снижению прочности бетона, формование трамбованием не приемлемо.

Из практики технологии производство изделий из жаростойких бетонов, как указано в работах и нормативных документах [3,9,12,15,16], прессование и трамбование можно использовать только при изготовлении из жаростойких бетонов мелкогазобетонных блоков. При изготовлении крупногазобетонных блоков наиболее эффективным является вибрирование с пригрузом. Как указывают авторы [2,11], в зависимости от удобоукладываемости смеси, которое характеризуется жесткостью и подвижностью для каждого состава бетонной смеси, необходим свой конкретный способ и режим уплотнения. Формирование оптимальной структуры для жа-

ростойкого керамзитового бетона возможно только в том случае, если выбран конкретный режим уплотнения путем сравнения различных параметров.

Как отмечает А.Е. Десов, В.И. Шмигальский [4], И.Н.Ахвердов [1], О.А.Савинов [11] и др., при формировании изделий из малоподвижных и жестких бетонных смесей необходимо обоснованно выбрать параметры и величины пригруза. Из анализа проведенных исследований установлено, что давление пригруза должно равномерно распределяться по всей поверхности изделия. При формировании образцов виброуплотнением с пригрузом в давление составляло 0,9; 0,11; 0,13; 0,15; 0,17; 0,19; 0,21; 0,23 МПа.

Результаты исследований влияния вакуумной обработки на прочность керамзитобетона в зависимости от усилия пригруза приведены на рис. 4. С увеличением величины давления от пригруза до  $(15 - 17) \cdot 10^{-2}$  МПа прочность бетона возрастает и составляет 32 МПа. Низкие результаты прочности при малых значениях величины давления от пригруза объясняются неравномерным распределением статистического давления на поверхности изделий. При увеличении давления от пригруза от  $(15 - 17) \times 10^{-2}$  МПа до  $19 \times 10^{-2}$  МПа прочность уменьшается до 28 МПа. Увеличение прочности вероятно происходит за счет бокового перемещения наиболее крупных зерен заполнителя под давлением касательных напряжений, а также увеличения внутренних напряжений в образце.

Результаты исследований способа формирования жаростойкого керамзитового бетона с вакуумной обработкой позволяет сделать вывод, что наибольшее значение предела прочности при сжатии достигается при величине пригруза от  $(15 \div 17) \cdot 10^{-2}$  МПа.

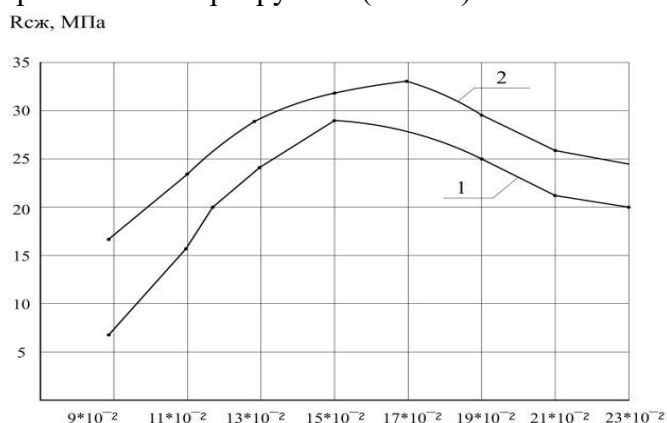


Рис. 4. Зависимость прочности от величины усилия пригруза жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем 1. Без вакуумной обработки, 2. С вакуумной обработки  
Fig. 4. The dependence of strength on the magnitude of the load load of heat-resistant expanded clay on a composite binder 1. Without vacuum treatment, 2. With vacuum processing

**Вывод.** Проведенный анализ зависимости прочности от температуры нагрева времени перемешивания и усилия пригруза показывает, что прочность бетона при вакуумировании выше, чем у бетона без вакуумной обработки. Повышение прочности бетона после вакуумной обработки при различных технологических режимах воздействия объясняется повышением показателей удобоукладываемости, которое характеризуется подвижностью и жесткостью бетонной смеси, более плотной упаковкой заполнителя в структуре бетона, а также большим эффектом от вакуумного уплотнения, связанное с отсосом воды и воздуха, а также статическим уплотнением вследствие разности атмосферного давления и давления вакуум-полости [15]. При этом величина действующего усилия достигает  $70-75 \text{ кН/м}^2$  с удалением от поверхности вакуумирования воды и воздуха передаваемое на бетон давление снижается, так как часть нагрузки расходуется на определение сил внутреннего трения и развития контактных напряжений в твердой фазе.

#### Библиографический список:

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона [Текст]/ И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981, – 464с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона [Текст]/ Ю.М. Баженов. – М.: Изд. АСВ. 2003.– 499с.

3. ГОСТ 20910-90. Бетоны жаростойкие. Технические условия [Текст]/ – М.: Издательство стандартов, 1991г. – 6с.
4. Десов А.Е., Шмигальский В.И. Экспериментальные данные о распространении колебаний различных частей в бетонных смесях при станковом вибрировании: Сб. трудов НИИЖБ. 1961. Вып. 19.С.33-37.
5. Жуков В.В. Легкие жаростойкие бетоны для шахты реактора нового поколения [Текст]/ В.В. Жуков, Г.Н. Хаджишалапов. – Махачкала: ГУП «Типография Дагестанского научного центра РАН», – 2006г – 293с.
6. Инструкция по технологии приготовления жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат, 1989. -39 с.
7. Лермит Р. Проблемы технологии бетона: Пер с фр / Под ред. И с преисл. А.Е.Десова. Изд. 2-е – М.: Издательство ЛКИ, 207-296 с.
8. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Сушка и первый нагрев тепловых агрегатов из жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. -96 с. (Госстрой СССР. Науч.-исслед. Ин-т бетона и железобетона НИИЖБ).
9. Пособие к СНиП 2.03.04-84. По проектированию бетонных и железобетонных конструкций предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 183с.
10. Рамачардран В., Фельдман Ф., Бодугуэн Дж. Наука о бетоне. – М.: Стройиздат, 1986. -280с.
11. Савинов О.А. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных смесей [Текст]/ О.А. Савинов, Е.В. Лавринович. – Л.: Стройиздат. – 1986. – 280с.
12. СН-156-79. Инструкция по технологии приготовления жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат. –1979. 40с.
13. Технология изготовления жаростойких бетонов / Н. –и. ин-т железобетона. – М.: Стройиздат, 1991. -64 с. - (Справочное пособие к СНиП).
14. Технология строительных процессов: учеб. / А.А. Афанасьев, Н.Н. Данилова, О.М. Терентьева, - 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2011. -464 с. ил.
15. Тотурбиев Б.Д. Строительные материалы на основе силикат – натриевых композиций [Текст]/ Б.Д. Тотурбиев. – М.: Стройиздат, 1988 –203 с.
16. Хлыстов А.И. Повышение эффективности и улучшение качества футерованных конструкций из жаростойкого бетона [Текст]: А.И. Хлыстов, А.В. Божко, С.В. Соколова, Р.Т. Рязов// Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – №3. – С.26-31.

#### References:

1. Akhverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Tekst]/ I.N. Akhverdov. – М.: Stroyizdat, 1981, – 464s. [Akhverdov I.N. Fundamentals of concrete physics [Text] / I.N. Akhverdov. М.: Stroyizdat, 1981, 464p. (In Russ)]
2. Bazhenov YU.M. Tekhnologiya betona [Tekst]/ YU.M. Bazhenov. – М.: Izd. ASV. 2003.– 499s. [Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Text] / Yu.M. Bazhenov. - М.: Publishing. DIA. 2003.– 499s. (In Russ)]
3. GOST 20910-90. Betony zharostoykiye. Tekhnicheskiye usloviya [Tekst]/ – М.: Izdatel'stvo standartov, 1991g. – 6s. [ GOST 20910-90. Concrete is heat-resistant. Specifications [Text] / М.: Publishing house of standards, 1991. 6p. (In Russ)]
4. Desov A.Ye., Shmigal'skiy V.I. Eksperimental'nyye dannyye o rasprostranenii kolebaniy razlichnykh chastei v betonnykh smesyakh pri stankovom vibrirovanii: Sb. trudov NIIZHB. 1961. Vyp. 19.S.33-37. [Desov A.E., Shmigalsky V.I. Experimental data on the propagation of vibrations of various parts in concrete mixtures during easel vibration: Sat. Proceedings of the NIIZHB. 1961. Issue 19.pp. 33-37. (In Russ)]
5. Zhukov V.V. Legkiye zharostoykiye betony dlya shakhty reaktora novogo pokoleniya [Tekst]/ V.V. Zhukov, G.N. Khadzhashalapov. – Makhachkala: GUP «Tipografiya Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN», – 2006g – 293s. [Zhukov VV Light heat-resistant concrete for a new generation reactor mine [Text] / V.V. Zhukov, G.N. Hajishalapov. - Makhachkala: State Unitary Enterprise "Printing House of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", 2006 293p. (In Russ)]
6. Instruksiya po tekhnologii prigotovleniya zharostoykikh betonov. – М.: Stroyizdat, 1989. -39 s [Instructions for the preparation of heat-resistant concrete. М.: Stroyizdat, 1989. 39 p. (In Russ)]
7. Lermi R. Problemy tekhnologii betona: Per s fr / Pod red. I s preisl. A.Ye.Desova. Izd. 2-ye – М.: Izdatel'stvo LKI, 207-296 s. [Lermi R. Concrete technology problems: Transl. From fr / Ed. And with preisl. A.E. Desov. Ed. 2nd - М.: Publishing house LKI. pp. 207-296. (In Russ)]
8. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyayeva V.F. Sushka i pervyy nagrev teplovykh agregatov iz zharostoykikh betonov. – М.: Stroyizdat, 1976. -96 s. (Gosstroy SSSR. Nauch.-issled. In-t betona i zhelezobetona NIIZHB). [Nekrasov KD, Zhukov VV, Gulyaeva V.F. Drying and first heating of heat aggregates from heat-resistant concrete. - М.: Stroyizdat, 1976. 96 p. (Gosstroy of the USSR. Scientific research. Institute of concrete and reinforced concrete NIIZhB)(In Russ)]
9. Posobiye k SNiP 2.03.04-84. Po proyektirovaniyu betonnykh i zhelezobetonnnykh konstruktсий prednaznachen-nyye dlya raboty v usloviyakh vozdeystviya povyshennykh i vysokikh temperatur. – М.: TSITP Gosstroy SSSR, 1989. – 183s. [The allowance for SNiP 2.03.04-84. For the design of concrete and reinforced concrete structures designed to work in conditions of exposure to elevated and high temperatures. - М.: TsITP Gosstroy USSR, 1989. 183p. (In Russ)]
10. Ramachardran V., Fel'dman F., Boduguén Dzh. Nauka o betone. – М.: Stroyizdat, 1986. -280s. [Ramachardran V., Feldman F., Bodyguin J. The science of concrete. М.: Stroyizdat, 1986. 280p. (In Russ)]

11. Savinov O.A. Vibratsionnaya tekhnika uplotneniya i formovaniya betonnykh smesey [Tekst] / O.A. Savinov, Ye.V. Lavrinovich. – L.: Stroyizdat. – 1986. – 280s. [Savinov O.A. Vibration technology for compaction and molding of concrete mixtures [Text] / O.A. Savinov, E.V. Lavrynovych. L.: Stroyizdat. 1986. 280p. (In Russ)]
12. SN-156-79. Instruksiya po tekhnologii prigotovleniya zharostoykikh betonov. – M.: Stroyizdat. –1979. 40s. [CH-156-79. Instructions for the preparation of heat-resistant concrete. - M.: Stroyizdat. –1979. 40p. (In Russ)]
13. Tekhnologiya izgotovleniya zharostoykikh betonov / N. –i. in-t zhelezobetona. – M.: Stroyizdat, 1991. -64 s. - (Spravochnoye posobiye k SNIP). [The manufacturing technology of heat-resistant concrete / N. –i. Institute of reinforced concrete. - M.: Stroyizdat, 1991. 64 p. (Reference manual to the SNIP) (In Russ)]
14. Tekhnologiya stroitel'nykh protsessov: ucheb. / A.A. Afanas'yev. N.N. Danilova, O.M. Terent'yeva, - 2-ye izd., pererab. – M.: Vysshaya shkola, 2011. -464 s. il. [Technology of construction processes: textbook. / A.A. Afanasyev. N.N. Danilova, O.M. Terentyev, - 2nd ed., Rev. - M.: Higher School, 2011. 464 p. (In Russ)]
15. Toturbiyev B.D. Stroitel'nyye materialy na osnove silikat – natriyevykh kompozitsiy [Tekst] / B.D. Toturbi-yev. – M.: Stroyizdat, 1988 –203 s. [Toturbiev B.D. Building materials based on silicate - sodium compositions [Text] / B.D. Toturbiev. - M.: Stroyizdat, 1988. 203 p. (In Russ)]
16. Khlystov A.I. Povysheniye effektivnosti i uluchsheniye kachestva futerovannykh konstruksiy iz zharostoykogo betona [Tekst]: A.I. Khlystov, A.V. Bozhko, S.V. Sokolova, R.T. Riyazov // Ogneupory i tekhnicheskaya kera-mika. – 2004. – №3. – S.26-31. [Khlystov A.I. Improving the efficiency and improving the quality of lined structures made of heat-resistant concrete [Text]: A.I. Khlystov, A.V. Bozhko, S.V. Sokolova, R.T. Riyazov // Refractories and technical ceramics. 2004. No. 3. pp. 26-31. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Хаджишалапов Гаджи Нурмагомедович** – доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета, кафедра технологии и организации строительного производства.

**Хежев Толя Амирович** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Кабардино-Балкарской республики, действительный член Адыгской (Черкесской) Международной академии наук, заведующий кафедрой строительного производства.

**Гаджиев Абдулла Магомедсаламович** - ассистент, кафедра технологии и организации строительного производства.

**Алимурадов Шахмурад Алимурадович** – аспирант, кафедра технологии и организации строительного производства.

**Information about the authors:**

**Khaji N. Khadzhishalapov** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Dean of the Faculty of Architecture and Construction, Department of Technology and Organization of Construction Production.

**Tolya A. Hezhev** - Dr. Sci. (Technical), Prof., Honored Worker of Science of the Kabardino-Balkarian Republic, Full member of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences, Head of the Department of Construction Industry.

**Abdulla M. Gadzhiev** – Assistant, Department of Technology and Organization of Construction Production.

**Shahmurad Alimuradov** –Aspirant, Department of Technology and Organization of Construction Production.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 13.05.2019.

**Принята в печать** 20.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 13.05.2019.

**Accepted for publication** 20.06.2019.

**Для цитирования:** Долгова А.В., Несветаев Г.В. Влияние дозировки редиспергируемых порошков и типа низкомо-  
дульных включений на свойства мелкозернистого бетона. Вестник Дагестанского государственного техниче-  
ского университета. Технические науки. 2019;46 (2):167-175. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-167-175

**For citation:** Dolgova A.V., Nesvetaev G.V. Effect of dosage of redispersible powders and the type of low-modular inclu-  
sions on the properties of fine-aggregate concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.  
2019; 46(2):167-175. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-167-175

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-167-175

### ВЛИЯНИЕ ДОЗИРОВКИ РЕДИСПЕРГИРУЕМЫХ ПОРОШКОВ И ТИПА НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Долгова А.В.<sup>2</sup>, Несветаев Г.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет,

<sup>1</sup>344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д.1, Россия,

<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения,

<sup>2</sup>344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка

Народного Ополчения, д. 2, Россия,

<sup>1</sup> e-mail: nesgrin@yandex.ru, <sup>2</sup> e-mail: anya.dolgova.75@mail.ru

**Резюме. Цель.** Надежность и долговечность конструкций с использованием различных по свойствам материалов (штукатурные покрытия, облицовки плиткой, новый бетон при ремонте и восстановлении конструкций и т.п.) в значительной степени зависит от сцепления слоев и деформационных свойств покрытий. Для получения требуемых свойств используемых для покрытий материалов в состав новых бетонов вводят модификаторы на основе полимеров и низкомодульные включения, например, вовлеченный воздух. Целью работы является выявление некоторых закономерностей изменения свойств бетонов при совместном введении указанных модификаторов. **Метод.** Экспериментальное определение пределов прочности на растяжение при изгибе, сжатие, начального модуля упругости, сцепления с бетонным основанием по стандартным методикам. **Результат.** Установлено влияние отдельного и совместного введения в состав мелкозернистого бетона редиспергируемых полимерных порошков и различных по свойствам низкомодульных включений. **Вывод.** Совместное введение в состав мелкозернистого бетона различных низкомодульных включений и редиспергируемых полимерных порошков обеспечивает снижение показателя уровня напряжений при вынужденных деформациях за счет различного влияния на прочностные и деформационные свойства и способствует повышению сцепления нового бетон с бетонным основанием.

**Ключевые слова:** сухие строительные смеси, редиспергируемые полимерные порошки, низкомодульные включения, сцепление с бетонным основанием, модуль упругости, предел прочности

## BUILDING AND ARCHITECTURE

### EFFECT OF DOSAGE OF REDISPUTABLE POWDERS AND THE TYPE OF LOW-MODULAR INCLUSIONS ON THE PROPERTIES OF FINE-AGGREGATE CONCRETE

**Dolgova Anna V.<sup>2</sup>, Grigory V. Nesvetaev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Donskoy State Technical University,

<sup>1</sup>344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1, Russia,

<sup>2</sup>Rostov State University of Communications,

<sup>2</sup>344038, Rostov-on-Don, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia sq., 2, Russia,

<sup>1</sup> e-mail: [nesgrin@yandex.ru](mailto:nesgrin@yandex.ru), <sup>2</sup> e-mail: [anya.dolgova.75@mail.ru](mailto:anya.dolgova.75@mail.ru)

**Abstract Objectives** Reliability and durability of structures using materials with various properties (plaster coatings, cement glue, new concrete during repair and restoration of structures, etc.) largely depends on the adhesion of the layers and the deformation properties of the coatings. To obtain the required properties of materials used for coatings, modifiers based on polymers and low-modulus inclusions are introduced into the composition of new concretes, for example, entrained air. The aim of the work is to identify some patterns of change in the properties of concrete with the joint introduction of these modifiers. **Method** Experimental determination of the tensile strength in bending, compression, E-modulus, adhesion to the concrete base by standard methods. **Result** The influence of separate and joint introduction of dispersible polymer powders and various low-modulus inclusions into the composition of fine-grained concrete has been established. **Conclusion** The joint introduction to the composition of fine-grained concrete of various low-modulus inclusions and redispersible polymer powders provides a reduction in the stress level during forced deformations due to the different effects additives on the strength and deformation properties and contributes to increased adhesion to the concrete.

**Keywords:** dry construction mixtures, redispersible polymer powders, low-modulus inclusions, adhesion with concrete base, modulus of elasticity, tensile strength, compressive strength

**Введение.** Применение сухих строительных смесей (ССС) при производстве отделочных и иных работ обеспечивает рост производительности труда и высокое качество получаемой продукции [1-5]. В состав многих ССС входит релаксированный полимерный порошок (РПП) для регулирования деформационных свойств и повышения сцепления с основанием. Производители выпускают РПП в основном на основе винилацетата, сополимеров винилацетата и этилена, винилового эфира вераатиковой кислоты, эфиров акриловой кислоты [6-8,17]. Для управления структурообразованием бетона, улучшения свойств бетонной смеси и повышения морозостойкости бетона в его состав вводят низкомолекулярные включения (НМВ) демпфирующего действия, например, воздухововлекающие добавки (ВВ) и зольные микросферы (МС) [9-11].

Применение МС, в сравнении с ВВ, обеспечивает ряд преимуществ, в т.ч: объем НМВ в составе готовой смеси не зависит от условий перемешивания; объем НМВ в составе готовой смеси не изменяется во времени.

**Постановка задачи.** Учитывая многообразие РПП и производимых в РФ цементов, выявление некоторых закономерностей влияния некоторых РПП при их совместном введении с НМВ на свойства растворов (мелкозернистых бетонов - МЗБ) и получение количественных показателей, характеризующих их эффективность, представляет актуальную задачу.

Оценка влияния вида цемента и модифицирующих добавок произведена на МЗБ состава Ц:П = 35:65 с использованием следующих материалов:

- ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Подгоренский цементник» (ПЦ-1), ЦЕМ I 52,5 Н ЗАО «Осколцемент» (ПЦ-2), ЦЕМ I 42,5 Н СС АО «Подольск-Цемент» (ПЦ-3);



- водоудерживающая добавка – Rutocelle 75 RT 50000 (ВУ);
- РПП – Vinnapas 4042 Н;
- воздухововлекающая добавка Esapon 1214 (ВВ);
- МС - зольная микросфера Новочеркасской ГРЭС.

Во всех составах дозировка ВУ составляла 0,25% от массы сухой смеси. Содержание РП варьировалось от 0 до 3% от массы сухой смеси. Дозировка ВВ составляла 0,015% от массы сухой смеси. Дозировка МС - 1,31% от массы сухой смеси при соотношении Ц:П = 36,2:62,5.

**Методы исследования.** Определение предела прочности на сжатие  $R$  и растяжение при изгибе  $R_f$  выполнялось на образцах 40х40х160 мм по ГОСТ 310.4. Определение начального модуля упругости  $E_0$  выполнялось на тех же образцах посредством измерения динамического модуля упругости ультразвуковым методом с последующим пересчетом [12]. Сцепление с бетонным основанием  $R_{сц}$  выполнялось по ГОСТ 31356. Результаты испытаний в возрасте 28 суток представлены в табл.1.

**Таблица 1. Результаты определения строительно-технических свойств мелко-зернистых бетонов**  
**Table 1. The results of determining the construction and technical properties of fine-grained concrete**

Вид НМВ View	Дозировка РПП, % RPP dosage	Строительно-технические свойства МЗБ, МПа Construction and technical properties of fine-grained concrete MPa											
		ПЦ-1				ПЦ-2				ПЦ-3			
		R	$R_f$	$E_0$	$R_{сц}$	R	$R_f$	$E_0$	$R_{сц}$	R	$R_f$	$E_0$	$R_{сц}$
0	0	15,2	4,29	11975	1,06	21,1	5,43	13810	1,03	14,1	4,12	11530	0,87
	1	10,5	3,74	10010	1,17	17,2	4,64	12553	1,19	13,3	4,06	11096	1,03
	2	12,7	4,28	10320	0,64	13,4	4,17	10382	1,41	13,1	4,1	10097	1,12
	3	10,9	3,59	8885	0,59	13,3	4,1	10270	1,22	11,6	3,97	9475	1,16
ВВ	0	8,5	3,35	8309	0,66	15,8	4,12	11303	0,2	14,3	4,11	11431	0,58
	1	10,1	3,49	9150	0,48	12,6	4,08	9722	1,23	13,8	4,38	11046	0,89
	2	9,1	3,63	8919	1,06	14,6	4,28	10553	1,22	12,4	3,94	10619	1,3
	3	10,8	3,84	9197	0,87	12,9	4,06	10562	1,31	11,4	3,92	9491	1,22
МС	0	14,5	4,14	11128	1,16	19,4	5,24	13369	0,79	15,6	3,9	11109	0,92
	1	11,6	3,87	9061	0,97	13,3	4,36	11723	0,68	12,3	4,01	9825	0,99
	2	10,6	3,53	8499	0,94	13,6	4,18	10296	0,97	10,5	3,78	9082	0,88
	3	9,9	3,47	8375	0,44	10,8	4,02	9542	1,37	9,7	3,8	8402	0,96

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 представлена зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие  $R_f = f(R)$ .



Рис. 1. Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе от предела прочности на сжатие: ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; Б – по данным [13] для МЗБ с органоминеральным модификатором

Fig. 1. The dependence of the tensile strength in bending on the ultimate compressive strength:

PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; B - according to [13] for the MZB with an organomineral modifier

Из представленных в табл. 1 и на рис. 1 данных очевидно:

- зависимость  $R_f = f(R)$  является достаточно универсальной. Поскольку величина  $(1 - R^2)$ , где  $R^2$  представлена на рис.1) характеризует процент дисперсии, который нельзя объяснить регрессией, можно отметить, что для ПЦ<sub>1</sub> и ПЦ<sub>2</sub> это значение составляет менее 20%, а для всех цементов - менее 15%, что свидетельствует о достаточно тесной корреляции между пределом прочности на изгиб и сжатие;
- полученная в настоящем исследовании зависимость  $R_f = f(R)$  для всех цементов качественно соответствует зависимостям, приведенным в [13,15,16].

На рис. 2 и 3 представлены зависимости пределов прочности модифицированных МЗБ от дозировки РПП и видов низкомолекулярных включений.

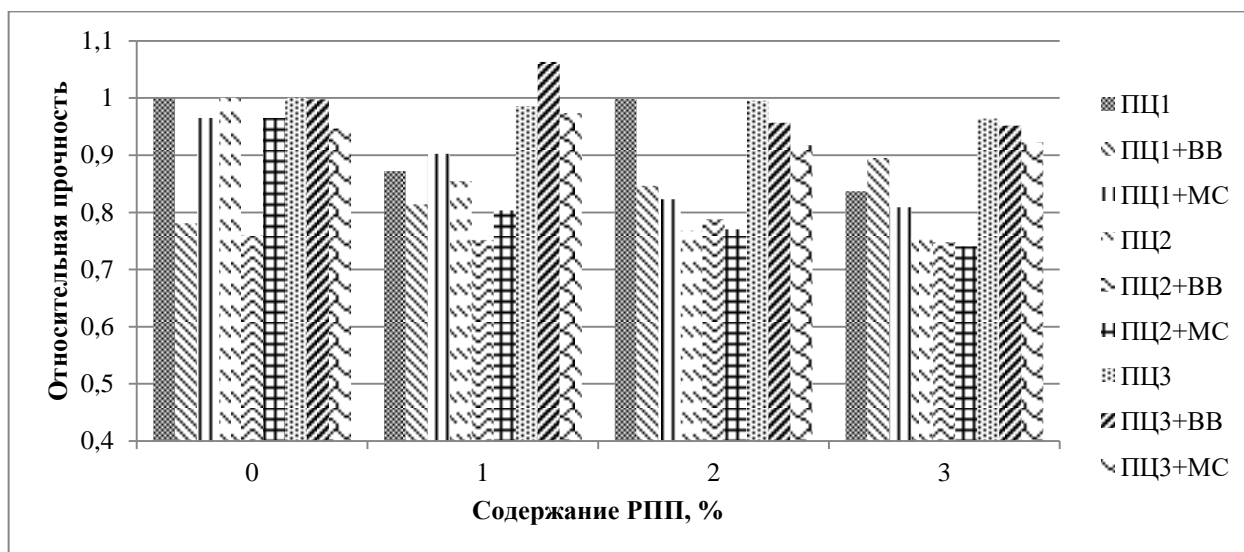


Рис. 2. Влияние дозировки РПП и вида НМВ на относительный предел прочности на растяжение при изгибе модифицированного МЗБ: ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; BB, MC – различные НМВ

Fig. 2. The effect of the dosage of RPP and the type of HMB on the relative tensile strength in bending of a modified MZB: PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; VV, MS - various NMV

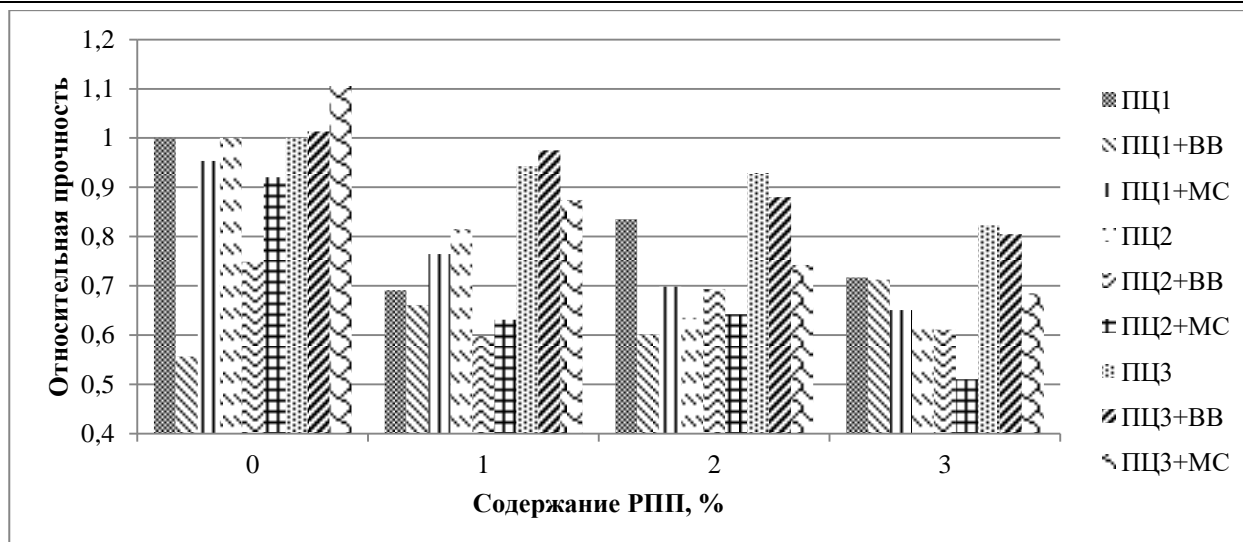


Рис. 3. Влияние дозировки РПП и вида НМВ на относительный предел прочности на сжатие модифицированного МЗБ: ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; BB, MC – различные НМВ

Fig. 3. The effect of the dosage of the RPP and the type of NMP on the relative compressive strength of the modified MZB: PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; VV, MS - various NMV

Из представленных на рис. 2 и 3 данных следует:

- общей тенденцией является снижение предела прочности МЗБ при увеличении дозировки РПП и введении НМВ, при этом снижение прочности при изгибе в зависимости от вида ПЦ в составах без НМВ может составлять от 4% (ПЦ-3) до 25% (ПЦ-2), а при сжатии 18% и 37% соответственно, что свидетельствует о большем влиянии РПП на прочность на сжатие;
- введение НМВ совместно с РПП может приводить к дополнительному снижению прочности, в итоге общее максимальное снижение прочности на изгиб может составлять до 25%, на сжатие – до 50%;

На рис. 4 представлена зависимость величины начального модуля упругости модифицированного МЗБ от предела прочности на сжатие.

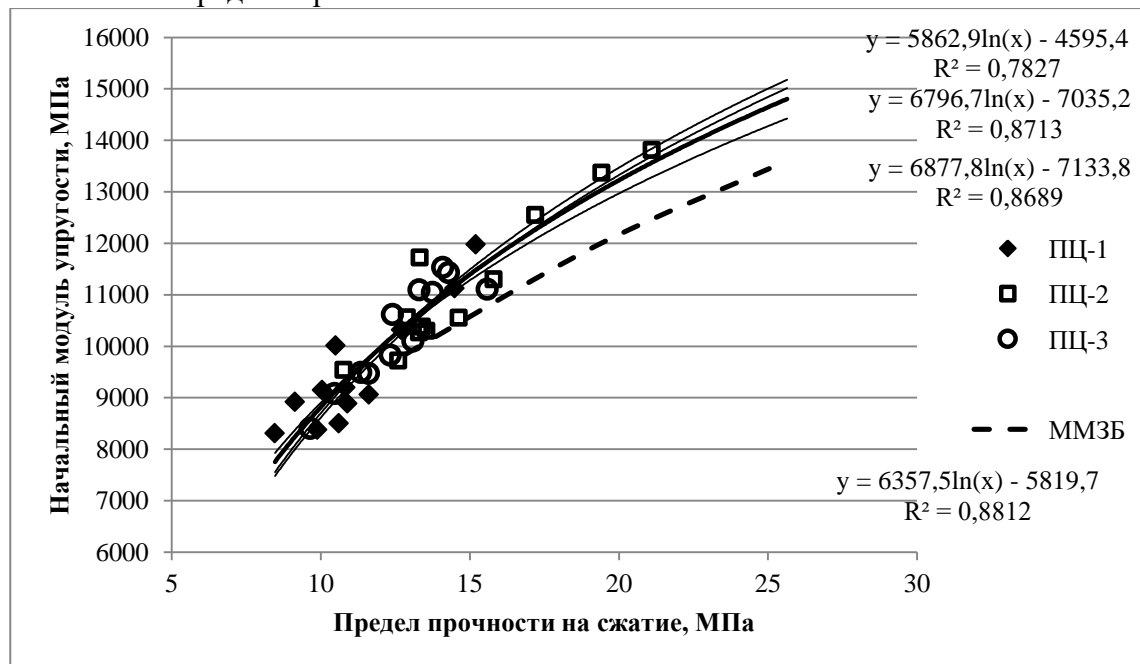


Рис. 4. Зависимость начального модуля упругости МЗБ от предела прочности на сжатие:

ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; MMZB – по данным [14] для МЗБ с органоминеральным модификатором

Fig. 4. Dependence of the initial elastic modulus of the MZB on the compressive strength:

PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; MMZB - according to [14] for the MZB with an organomineral modifier

Из представленных на рис. 4 данных следует:

- начальный модуль упругости МЗБ с РПП в основном определяется пределом прочности на сжатие;
- при введении НМВ совместно с РПП снижение начального модуля упругости МЗБ может достигать 40%.

На рис. 5 представлена зависимость сцепления МЗБ с бетонным основанием от дозировки РПП и вида НМВ.

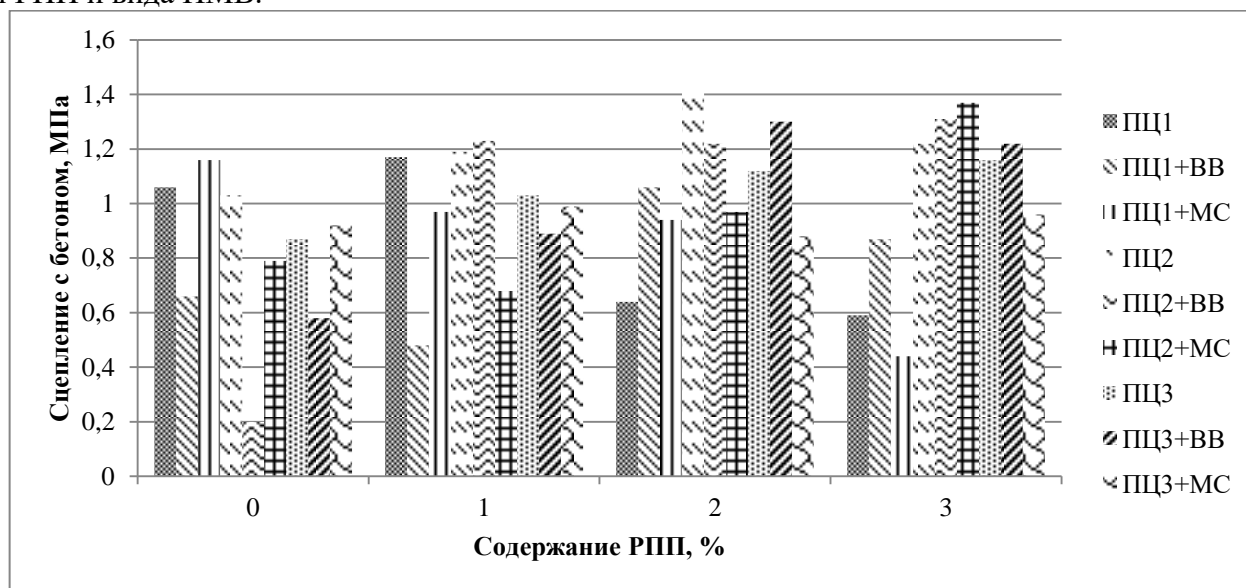


Рис. 5. Зависимость сцепления МЗБ с бетонным основанием от дозировки РПП и вида НМВ: ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; BB, MC – различные НМВ

Fig. 5. The dependence of the adhesion of the MZB with a concrete base on the dosage of the RPP and the type of NMW: PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; VV, MS - various NMV

Из представленных на рис. 5 данных очевидно:

- зависимость величины сцепления с бетонным основанием от дозировки РПП носит сложный характер, в зависимости от вида цемента возможно как снижение сцепления, так и повышение до 33%, что не противоречит некоторым данным [5,18];
- при совместном введении РПП и НМВ рациональная дозировка РПП для обеспечения максимального сцепления зависит от вида цемента, максимальное повышение сцепления составило 49% (ПЦ3+BB+2%РПП).

В связи с тем, что в процессе эксплуатации МЗБ, полученные из ССС, подвергаются температурным воздействиям, в качестве показателя, позволяющего оценить надежность сцепления МЗБ с основанием (например, для клеев, штукатурных покрытий, ремонтных составов), может рассматриваться условный относительный уровень напряжений

$$u(\sigma) = \frac{\Delta \varepsilon \cdot E_0}{R_t \cdot (1 + \varphi)}, \quad (1)$$

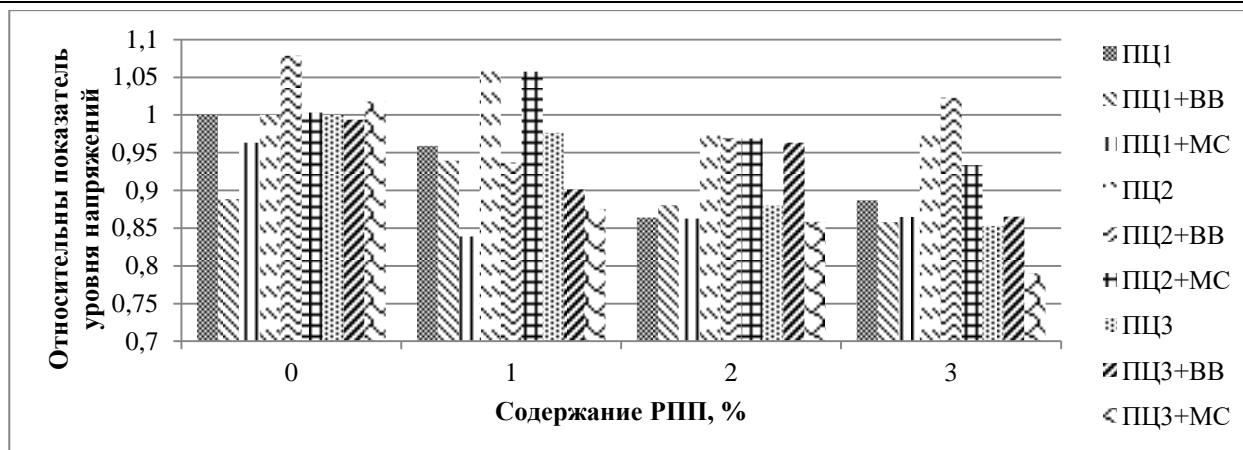
$\Delta \varepsilon$  – разность деформаций МЗБ и основания вследствие температурного градиента и различия величин коэффициентов линейного температурного расширения;

$E_0$  – начальный модуль упругости МЗБ;

$R_t$  – предел прочности МЗБ на растяжение;

$\varphi$  – коэффициент ползучести.

На рис. 6 представлена зависимость указанного показателя от дозировки РПП и вида НМВ при  $\varphi = 0$ .



**Рис.6. Зависимость относительного показателя уровня напряжений при изменении температуры от дозировки РПП и вида НМВ: ПЦ1, ПЦ2, ПЦ3 – различные цементы; BB, MC – различные НМВ**  
**Fig. 6. Dependence of the relative indicator of the level of stresses when the temperature changes on the dosage of RPP and the type of HMB: PTs1, PTs2, PTs3 - various cements; VV, MS - various NMV**

Из представленных на рис. 6 данных следует:

- отмечается тенденция к снижению величины  $u(\sigma)$  при увеличении дозировки РПП, в т.ч. в сочетании с НМВ, но возможно и повышение величины  $u(\sigma)$  в зависимости от особенностей цемента;
- снижение величины  $u(\sigma)$  может составлять от 5 до 21%.

Можно предположить, что составы с минимальным значением величины  $u(\sigma)$  будут обеспечивать лучшие показатели морозостойкости контактной зоны.

#### Вывод.

1. При одновременном введении в состав МЗБ комплексной добавки РПП + НМВ (в виде BB или MC):

- соотношение между пределом прочности на растяжение при изгибе  $R_f$  и на сжатие  $R$  в основном определяется величиной прочности МЗБ на сжатие  $R_f = 1,24 \cdot R^{0,47}$ , некоторое влияние оказывает вид цемента, содержание РПП и вид НМВ.
- соотношение между начальным модулем упругости  $E_0$  МЗБ и пределом прочности на сжатие  $R$  в основном определяется величиной прочности МЗБ на сжатие  $R_f = 6358 \cdot \ln R - 5820$ .

2. Снижение прочности МЗБ в зависимости от вида ПЦ в составах с РПП без НМВ может составлять от 4% до 25 при изгибе, а при сжатии от 18% до 37%, что свидетельствует о большем влиянии РПП на прочность на сжатие. Введение НМВ совместно с РПП может приводить к дополнительному снижению прочности, в итоге общее максимальное снижение прочности на изгиб может составлять до 25%, на сжатие – до 50%.

4. Зависимость величины сцепления МЗБ с бетонным основанием от дозировки РПП носит сложный характер. В зависимости от вида цемента возможно как снижение сцепления, так и повышение до 33%. При совместном введении РПП и НМВ возможно максимальное повышение сцепления до 49%, при этом рациональная дозировка РПП для обеспечения максимального сцепления зависит от вида цемента.

#### Библиографический список:

1. Сухие смеси в современном строительстве / В.А. Безбородов [и др.] Новосибирск, 1998. 94 с.
2. Корнеев В.И., Зозуля П.В. Сухие строительные смеси (состав, свойства): учеб. пособие – М.: РИФ «Стройматериалы», 2010. 320 с.
3. Шаменская Е.А., Орлова Т.Н. Плиточные сухие клеи и системы // Строительные материалы. 1999. №7-8. С. 14-16.
4. Пухаренко Ю.В., Харитонов А.М., Шангина Н.Н., Сафонова Т.Ю. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2011. №1(26), С. 98-103.

5. Несветаев Г.В., Ужахов М.А. Некоторые вопросы оценки качества клеев для плитки // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2007. №1. С. 64-66.
6. Цюрбригген Р., Дильгер П. Дисперсионные полимерные порошки – особенности поведения в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 1999. №3. С. 10-13.
7. Захезин А.Е., Черных Т.Н., Трофимов Б.Я., Крамра Л.Я. Влияние редиспергируемых порошков на свойства цементных строительных растворов // Строительные материалы. 2004. №10. С. 6-8.
8. Голунов С.А. Модификация плиточных клеев редисперсионными полимерными порошками VINNAPAS // Строительные материалы. 2004. №3. С. 47-50.
9. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. Уфа, ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
10. Зимакова Г.А. Зольные механоактивированные микросферы – компонент высокоэффективных бетонов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №12(54). С. 90-94.
11. Баталин Б.С. Исследование эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей // Успехи современного естествознания: Материалы конференции. 2007. №7. С. 71-73.
12. Несветаев Г.В. Бетоны: учебно-справочное пособие. 2-е изд., перераб и доп. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 381 с.
13. Несветаев Г.В., Базоев О.К. Новая серия добавок в бетон производства НПП «Ирстройпрогресс» // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы 4-й межд. конф. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2006. С. 319-326.
14. Несветаев Г.В. Применение модификаторов с целью управления модулем упругости бетона / Новые научные направления строительного материаловедения: Академические чтения РААСН. – Белгород, 2005. Ч.2. С. 51-57.
15. Бычкова О.А. Клей быстрой фиксации на основе гипсоглиноземистого расширяющегося цемента и портландцемента // «Инженерный вестник Дона» (электронный научный журнал), 2018, № 3. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5102](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5102)
16. Бычкова О.А. Быстротвердеющие стяжки на основе гипсоглиноземистого расширяющегося цемента и портландцемента // «Инженерный вестник Дона» (электронный научный журнал), 2018, № 3. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5103](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5103)
17. Ohama Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Noyes Publications, Japan, 1995. 227 p.
18. Rajgelj S. Cohesion aspects in rheological behavior of fresh cement mortars // Mater. et constr. 1985. №104. P. 109-114.

#### References:

1. Sukhiye smesi v sovremennom stroitel'stve / V.A. Bezborodov [i dr.] Novosibirsk, 1998. 94 s. [Dry mixes in modern construction / V.A. Bezborodov [et al.] - Novosibirsk, 1998. 94 p. (In Russ)]
2. Korneyev V.I., Zozulya P.V. Sukhiye stroitel'nyye smesi (sostav, svoystva): ucheb. posobiye – M.: RIF «Stroymaterialy», 2010. 320 s. [Korneyev V.I., Zozulya P.V. Dry building mixtures (composition, properties): proc. allowance - M.: RIF "Building Materials", 2010. 320 p. (In Russ)]
3. Shamenskaya Ye.A., Orlova T.N. Plitochnyye sukhkiye klei i sistemy // Stroitel'nyye materialy. 1999. №7-8. S. 14-16. [Shamenskaya E.A., Orlova T.N. Tiled dry adhesives and systems // Construction materials. 1999. № 7-8. pp. 14-16. (In Russ)]
4. Pukharensko YU.V., Kharitonov A.M., Shangina N.N., Safonova T.YU. Restavratsiya istoricheskikh ob"yektov s primeneniym sovremennykh sukhikh stroitel'nykh smesey // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2011. №1(26), S. 98-103 [Puharenko Yu.V., Kharitonov, AM, Shangina, N.N., Safonova, T.Yu. Restoration of historical objects using modern dry building mixtures // Bulletin of civil engineers. 2011. №1 (26), pp. 98-103. (In Russ)]
5. Nesvetayev G.V., Uzhakhov M.A. Nekotoryye voprosy otsenki kachestva kleyev dlya plitki // ALITinform: Tsement. Beton. Sukhiye smesi. 2007. №1. S. 64-66. [Nesvetayev G.V., Uzhakhov M.A. Some issues of quality assessment of tile adhesives // ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixes. №1. pp. 64-66. (In Russ)]
6. Tsyurbriggen R., Dil'ger P. Dispersionnyye polimernyye poroshki – osobennosti povedeniya v sukhikh stroitel'nykh smesyakh // Stroitel'nyye materialy. 1999. №3. S. 10-13. [Zyurbriggen R., Dilger P. Dispersion polymer powders - behavioral peculiarities in dry building mixtures. Stroitel'nye materialy, 2013, no. 1999. №3. Pp. 10-13. (In Russ)]
7. Zakhezin A.Ye., Chernykh T.N., Trofimov B.YA., Kramra L.YA. Vliyaniye redispergiruyemykh poroshkov na svoystva tsementnykh stroitel'nykh rastvorov // Stroitel'nyye materialy. 2004. №10. S. 6-8. [Zakhezin, A.E., Chernykh, TN, Trofimov, B.Ya., Kramra, L.Ya. The influence of redispersible powders on the properties of cement mortars // Construction materials. 2004. №10. pp. 6-8. (In Russ)]
8. Golunov S.A. Modifikatsiya plitochnykh kleyev redisperсионными полимерными порошками VIN-NAPAS // Stroitel'nyye materialy. 2004. №3. S. 47-50. [Golunov S.A. Modification of tile adhesives with redispersible polymeric powders VINNAPAS // Construction materials. 2004. No. 3. pp. 47-50. (In Russ)]
9. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. Strukturoobrazovaniye i razrusheniye tsementnykh betonov. Ufa, GUP «Ufimskiy poligrafkombinat», 2002. 376 s. [Babkov VV, Mokhov V.N.,

- Kapitonov S.M., Komokhov P.G. Structure formation and destruction of cement concretes. Ufa, GUP Ufa Printing House, 2002. 376 p. (In Russ)]
10. Zimakova G.A. Zol'nyye mekhanooaktivirovannyye mikrosfery – komponent vysokoeffektivnykh be-tonov // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2016. №12(54). S. 90-94. [Zimakova G.A. Ash mechanically activated microspheres - a component of high-performance concrete // International Scientific Research Journal. 2016. №12 (54). pp. 90-94. (In Russ)]
  11. Batalin B.S. Issledovaniye effektivnosti dobavok, primenyayemykh dlya proizvodstva sukhikh stroi-tel'nykh smesey // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya: Materialy konferentsii. 2007. №7. S. 71-73. [Batalin B.S. Study of the effectiveness of additives used for the production of dry building mixtures // Successes of modern natural science: Conference materials. 2007. №7. pp. 71-73. (In Russ)]
  12. Nesvetayev G.V. Betony: uchebno-spravochnoye posobiye. 2-ye izd., pererab i dop. Rostov-na-Donu: Feniks, 2013. 381 s. [Nesvetayev G.V. Concretes: a reference manual. 2nd ed., Pererab and add. Rostov-on-Don: Phoenix, 2013. 381 p. (In Russ)]
  13. Nesvetayev G.V., Bazoyev O.K. Novaya seriya dobavok v beton proizvodstva NPP «Istroyprogress» // Beton i zhelezobeton v tret'yem tysyacheletii: Materialy 4-y mezhd. konf. Rostov-na-Donu: RGSU, 2006. S. 319-326. [Nesvetayev G.V., Bazoyev O.K. New series of concrete additives produced by NPP Istroyprogress // Concrete and reinforced concrete in the third millennium: Proceedings of the 4th int. conf. Rostov-on-Don: RSSU, 2006. pp. 319-326. (In Russ)]
  14. Nesvetayev G.V. Primeneniye modifikatorov s tsel'yu upravleniya modulem uprugosti betona / Novyye nauchnyye napravleniya stroitel'nogo materialovedeniya: Akademicheskiye chteniya RAASN. – Belgo-rod, 2005. CH.2. S. 51-57. [Nesvetayev G.V. The use of modifiers to control the modulus of elasticity of concrete / New scientific directions of building materials science: Academic readings of the RAACS. - Belgorod, 2005. Part 2. pp. 51-57. (In Russ)]
  15. Bychkova O.A. Kley bystroy fiksatsii na osnove gipsoglinozemistogo rasshiryayushchegosya tsementa i portlandtsementa // «Inzhenernyy vestnik Dona» (elektronnyy nauchnyy zhurnal), 2018, № 3. [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5102](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5102) Bychkova O.A. Glue of fast fixing on the basis of gypsum-aluminous expanding cement and portland cement // Don Engineering Newsletter (electronic scientific journal), 2018, No. 3. [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5102](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5102) (In Russ)]
  16. Bychkova O.A. Bystrotverdeyushchiye styazhki na osnove gipsoglinozemistogo rasshiryayushchegosya tsementa i portlandtsementa // «Inzhenernyy vestnik Dona» (elektronnyy nauchnyy zhurnal), 2018, № 3. [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5103](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5103)
  17. [ Bychkova O.A. Quick-hardening screeds based on gypsum-alumina expanding cement and portland cement // Don Engineering Newsletter (electronic scientific journal), 2018, No. 3. [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5103](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5103)(In Russ)]
  18. Ohama Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Noyes Publications, Japan, 1995. 227 p.
  18. Rajgelj S. Cohesion aspects in rheological behavior of fresh cement mortars // Mater. et constr. 1985. №104. pp 109-114.

**Сведения об авторах:**

**Несветаев Григорий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология строительного производства».

**Долгова Анна Владимировна** – старший преподаватель, кафедра «Изыскание, проектирование и строительство железных дорог».

**Information about the authors:**

**Grigory V. Nesvetayev** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of Department «Technology of construction production»

**Dolgova Anna V.** – Senior Lecturer, of the Department «Surveys, design and construction of railways»

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 28.04.2019.

**Принята в печать** 03.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 28.04.2019.

**Accepted for publication** 03.06.2019.

**Для цитирования:** Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М. Алгоритм расчета нелинейного поведения тонкостенных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (2):176-184. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-176-184

**For citation:** Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M. Nonlinear behavior calculation algorithm for thin-walled systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2):176-184. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-176-184

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-176-184

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СИСТЕМ

Муртазалиев Г.М.<sup>1</sup>, Пайзулаев М.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 [smdstu@mail.ru](mailto:smdstu@mail.ru), <sup>2</sup> e-mail: [ventav@mail.ru](mailto:ventav@mail.ru)

**Резюме. Цель.** Появление современных высокопрочных материалов приводит к созданию тонкостенных конструкций в различных сферах техники. Для получения необходимой информации об их поведении под нагрузкой следует анализировать все характерные особенности, встречающиеся на всех этапах их нагружения – на начальном (исходном) этапе их работы с учетом одного или нескольких видов нелинейностей, найти возможные критические состояния и, в зависимости от рода потери устойчивости, изучить характер начального этапа посткритического деформирования. В статье на основе алгоритма, сочетающего приближенные аналитические и численные методы, решается модельная задача – изучение особенностей поведения тонкостенной сферической оболочки под нагрузкой. **Метод.** Исследование основано на решении нелинейной задачи определения напряженно-деформированного состояния на начальной - осесимметричной стадии работы; критических (бифуркационных) значений нагрузок; анализе характера постбифуркационного поведения. В работе используется вариант общей теории устойчивости и посткритического поведения конструкций ранее разработанный В.Т. Койтером. **Результат.** Решение такой общей задачи, связанной с разрывными явлениями, осуществляется на базе математических идей, сформулированных в теории ветвления решений нелинейных уравнений. Получены значения коэффициентов, характеризующих начальный этап постбифуркационного поведения оболочек и, важные с практической точки зрения, соотношения между критическими и предельными значениями нагрузок. Показано, что в зависимости от площади загружаемой распределенной нагрузкой части поверхности оболочки, характер начального этапа посткритического деформирования меняется не только количественно, но и качественно. **Вывод.** Наиболее эффективными при решении задач, связанных с разрывными явлениями, являются комбинации приближенных аналитических – теории катастроф и численных методов, не требующих сложных, трудоемких и значительных объемов вычислений. Анализ начального этапа постбифуркационного поведения конструкций позволяет оценить степень опасности достижения критического состояния, что достигается учетом значений соответствующих коэффициентов надежности в расчетах.

**Ключевые слова:** нелинейные задачи, устойчивость, ветвление решений, теория катастроф, посткритическое поведение



## BUILDING AND ARCHITECTURE

### NONLINEAR BEHAVIOR CALCULATION ALGORITHM FOR THIN-WALLED SYSTEMS

**Gelani M. Murtazaliev<sup>1</sup>, Magomed M. Payzulaev<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 [smdstu@mail.ru](mailto:smdstu@mail.ru), <sup>2</sup>e-mail: [ventav@mail.ru](mailto:ventav@mail.ru)

**Abstract Objectives** The emergence of modern high-strength materials leads to the creation of thin-walled structures in various fields of technology. To obtain the necessary information about their behavior under load, one should analyze all the characteristic features encountered at all stages of their loading - at the initial (initial) stage of their operation, taking into account one or more types of nonlinearities, find possible critical states and, depending on the type of stability loss, study the nature of the initial stage of postcritical deformation. Based on an algorithm combining approximate analytical and numerical methods, the article solves the model problem — studying the behavior of a thin-walled spherical shell under load. **Method.** The study is based on solving the nonlinear problem of determining the stress-strain state at the initial - axisymmetric stage of work; critical (bifurcation) load values; analysis of the nature of post-bifurcation behavior. The work uses a variant of the general theory of stability and postcritical behavior of structures previously developed by V.T. Coiter. **Result.** The solution of such a general problem associated with discontinuous phenomena is carried out on the basis of mathematical ideas formulated in the theory of branching solutions of nonlinear equations. The values of the coefficients characterizing the initial stage of the post-bifurcation behavior of the shells and, from a practical point of view, the relations between the critical and limiting values of the loads are obtained. It is shown that depending on the area of the shell surface part loaded by the distributed load, the nature of the initial stage of postcritical deformation changes not only quantitatively, but also qualitatively. **Conclusion.** The most effective in solving problems associated with discontinuous phenomena are combinations of approximate analytical ones - catastrophe theory and numerical methods that do not require complex, time-consuming and significant amounts of computation. Analysis of the initial stage of the post-bifurcation behavior of structures allows us to assess the degree of danger of reaching a critical state, which is achieved by taking into account the values of the corresponding reliability coefficients in the calculations.

**Keywords:** nonlinear problems, stability, decision branching, catastrophe theory, postcritical behavior

**Введение.** Фундаментальные математические положения теории ветвления решений нелинейных уравнений подробно рассматриваются в трех основных частях, указанных на рис.1.



Рис. 1. Теория ветвления решений нелинейных уравнений

Fig. 1. The theory of branching solutions of nonlinear equations

В соответствии с этой схемой решение общей нелинейной краевой задачи расчета конструкций, связанной с разрывными явлениями, проводится на основе алгоритма, указанного на рис.2.

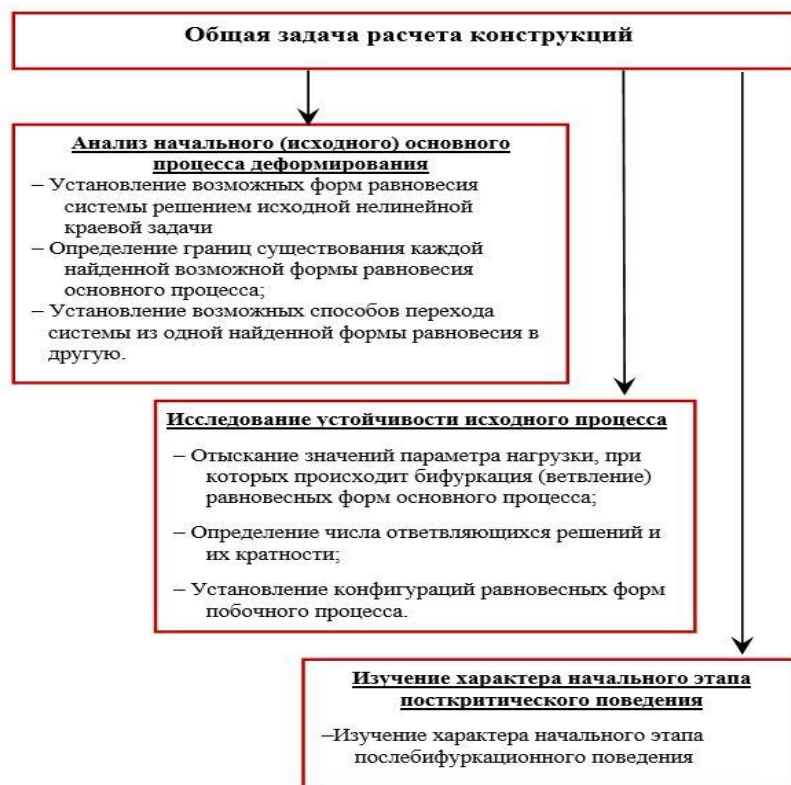


Рис. 2. Общая задача расчета конструкций  
 Fig. 2. The general task of structural analysis

**Постановка задачи.** При расчете тонкостенных конструкций особую значимость приобретает исследование устойчивости форм равновесий. Ввиду многообразия решаемых задач здесь возможна следующая классификация постановок задач (рис.3).

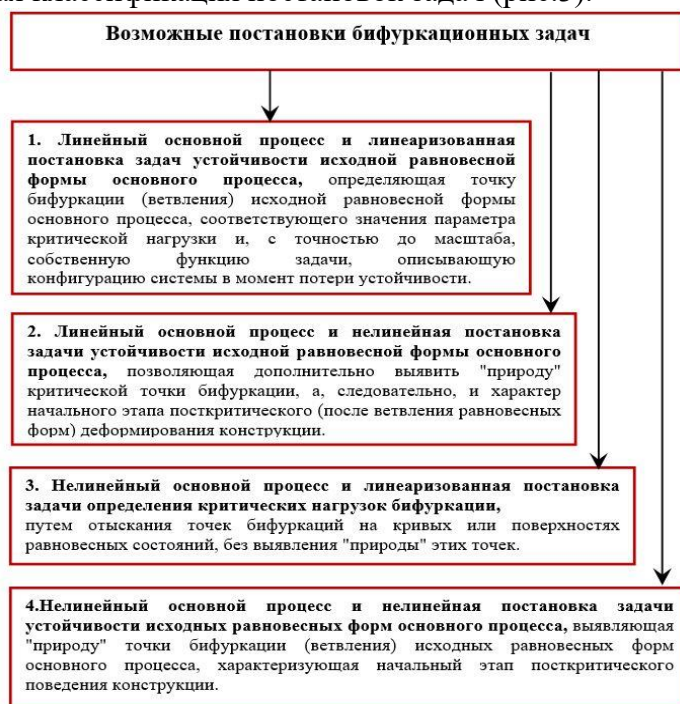


Рис. 3. Возможные постановки бифуркационных задач  
 Fig. 3. Possible statements of bifurcation problems

В данной работе на основе алгоритма, сочетающего приближенные аналитические и численные методы, решается одна модельная задача – изучение особенностей поведения под нагрузкой тонкостенной сферической оболочки, решением 4 типа задач из приведенных на рис.3. В качестве основной принята система двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных смешанного вида, записанная относительно функции прогибов  $W$  и функции усилий  $F$ , описывающая случай геометрически нелинейного деформирования пологих оболочек под действием поперечной нагрузки интенсивности  $q$  (волной отмечены размерные величины):

$$\begin{cases} D \cdot \nabla^4 W = \nabla^2 F + L(W, F) + q; \\ (1/Eh) \cdot \nabla^4 F = -\nabla^2 W - (1/2) \cdot L(W, W), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\nabla^2(\cdot)$ ,  $L(\cdot)$  – дифференциальные операторы, имеющие в полярных координатах вид:

$$\nabla^2(\cdot) = K_2 \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial r^2} + K_1 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(\cdot)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \varphi^2} \right]; \quad (2)$$

$$L(W, F) = \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \cdot \left( \frac{\partial F}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \cdot \left( \frac{\partial W}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial W}{r \partial \varphi} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial F}{r \partial \varphi} \right). \quad (3)$$

Заменой в (3)  $F$  на  $W$  находится оператор  $L(W, W)$ .

Решение этих уравнений в замкнутом виде, дающее полную информацию об особенностях работы оболочки на всех этапах нагружения невозможно. Поэтому в данной работе изучение поведения оболочки разбито на три этапа, которые могут быть рассмотрены и как отдельные задачи:

- нелинейная задача определения напряженно-деформированного состояния на начальной - осесимметричной стадии работы;
- определение критических (бифуркационных) значений нагрузок;
- анализ характера постбифуркационного поведения.

**Методы исследования.** В случае осесимметричной деформации оболочки функции  $W$  и  $F$ , а следовательно, и компоненты напряженно-деформированного состояния не зависят от полярного угла  $\varphi$ . Если к тому же  $K_1=K_2=K$ , то приведенные выше формулы (1)÷(3) значительно упрощаются:

– система (1) может быть проинтегрирована и ее первый интеграл принимает вид:

$$\begin{cases} D \frac{d}{dr} (\nabla^2 W) = h \frac{dF}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{dW}{dr} + K \right) + \Psi(r); \\ \frac{d}{dr} (\nabla^2 \Phi) = -E \left[ \frac{1}{2r} \left( \frac{dW}{dr} \right)^2 + K \frac{dW}{dr} \right], \end{cases} \quad (4)$$

где

$\nabla^2(\cdot) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r \frac{d(\cdot)}{dr} \right]$  – оператор Лапласа в полярных координатах для осесимметричной задачи;

В общепринятых безразмерных параметрах и обозначениях [6] уравнения осесимметричного деформирования (4) примут вид:

$$\begin{cases} (r \cdot \Theta)' - \frac{\Theta}{r} = \Phi(\Theta - r) - \Psi_0(r); \\ (r \cdot \Phi)' - \frac{\Phi}{r} = -\Theta \left( \frac{\Theta}{2} - r \right), \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } \Psi_0(r) = 4 \int p r dr. \quad (6)$$

В случае загрузки оболочки давлением интенсивности  $p$ , приложенным к круговой области радиуса  $r_1$  с центром в вершине купола:

$$\Psi_0(r) = \begin{cases} 2pr^2, & r < b_1; \\ 2pb^2, & r > b_1, \end{cases} \quad (7)$$

где  $b_1 = \frac{r_1}{a} b$ .

В этом случае уравнения могут быть записаны в единообразной форме:

$$\begin{cases} (r \cdot \Theta)' - \frac{\Theta}{2} = \Phi(\Theta - r) - 2p \cdot b_1^2 \cdot \delta(r); \\ (r \cdot \Phi)' - \frac{\Phi}{r} = -\Theta \left( r + \frac{\Theta}{2} \right), \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{где } \delta(r) = \begin{cases} \frac{r^2}{b_1^2}, & r < b_1; \\ 1, & r > b_1. \end{cases} \quad (9)$$

Системой уравнений (8) описывается упруго-нелинейное осесимметричное деформирование пологих оболочек вращения и вместе с соответствующими граничными условиями составляют полную систему уравнений для решения конкретных задач.

Эта система может быть решена разными методами. Основной трудностью является получение непрерывной кривой равновесных состояний, поскольку численные методы, если не предпринимать специальных приемов, становятся расходящимися в окрестностях особых точек. Ранее авторы работы решали эту задачу на основе алгоритма, сочетающего метод конечных разностей повышенной точности с методом дифференцирования по параметру, представляющего “шаговую” процедуру. Использована процедура смены ведущего параметра в окрестностях особых точек, позволившая построить непрерывные кривые для разных параметров кривизны и нагрузки, определяя каждую точку каждой кривой решением системы нелинейных уравнений.

Более эффективным является использование алгебраических средств и геометрических образов теории катастроф, позволяющее представить поведение целых классов конструкций единой наглядной геометрической картиной. Такая процедура позволяет существенно сократить объем последующих вычислений.

На рис. 4 и 5, показаны многообразие катастрофы сборки – поверхность равновесных состояний оболочки и отображение катастрофы сборки на плоскость управляющих параметров  $K$  и  $q^*$ , дающие полную качественную и количественную информацию о поведении под нагрузкой целого класса оболочек.

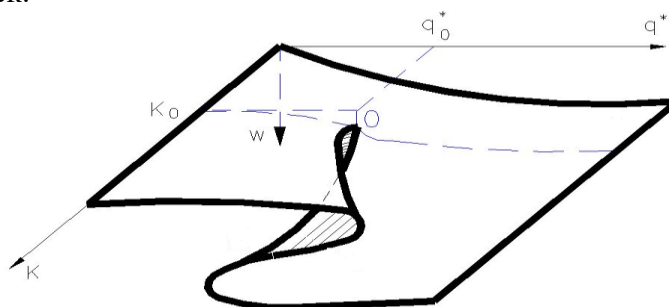


Рис.4. Многообразие катастрофы сборки – поверхность равновесных состояний оболочки

Fig. 4. Manifold catastrophe manifold - shell equilibrium surface

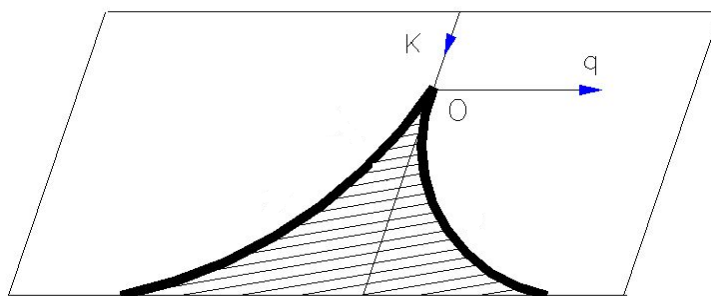


Рис.5. Отображение катастрофы сборки на плоскость управляющих параметров  $K$  и  $q^*$

Fig.5. The mapping of the disaster assembly on the plane of the control parameters  $K$  and  $q^*$

**Обсуждение результатов.** Для вычисления критических нагрузок бифуркации представим функцию прогибов  $W$  и усилий  $F$  в момент потери устойчивости в виде:

$$\begin{aligned} W(r, \varphi) &= W_0(r) + \xi W_1(r, \varphi); \\ F(r, \varphi) &= F_0(r) + \xi F_1(r, \varphi), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $W_0(r)$  и  $F_0(r)$  – величины, характеризующие осесимметричное поведения оболочки;

$W_1(r, \varphi)$  и  $F_1(r, \varphi)$  – приращения функций прогибов и усилий при возможном переходе оболочки к смежным несимметричным формам.

$\xi$  – бесконечно малый параметр;

Подстановка (10) в исходные уравнения (1), учет уравнений (8) и последующая линеаризация по  $\xi$  приводит к уравнениям:

$$\begin{aligned} \nabla^4 W_1 &= \nabla^2 F_1 - \left( \frac{\dot{F}_1}{r} - \frac{\dot{F}_1}{r^2} \right) \Theta' + \frac{\Phi}{r} W_1'' - \frac{F_1''}{r} \Theta + \left( \frac{\dot{W}_1}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \Phi; \\ \nabla^4 F_1 &= -\nabla^2 W_1 + \left( \frac{\dot{W}_1}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \Theta' + \frac{W_1''}{r} \Theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Эти уравнения, кроме тривиального решения ( $W_1=F_1=0$ ), для некоторых значений параметра внешней нагрузки входящего в значения  $\Theta$  и  $\Phi$ , имеют нетривиальные решения.

Примем функции  $W_1$  и  $F_1$  в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_1(r, \varphi) &= \sum_{n=2}^{\infty} W_{1n}(r) \cos n\varphi; \\ F_1(r, \varphi) &= \sum_{n=2}^{\infty} F_{1n}(r) \cos n\varphi, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $n$  – число окружных волн (случаи  $n=0$  и  $n=1$  являются особыми случаями).

С учетом (12) (11) превращаются и в бесконечную систему однородных обыкновенных дифференциальных уравнений для функций  $W_{1n}(r)$  и  $F_{1n}(r)$ :

$$\begin{aligned} \nabla_n^4 W_{1n} &= \nabla_n^2 F_{1n} - \left( \frac{1}{r} \dot{F}_{1n} - \frac{n^2}{r^2} \dot{F}_{1n} \right) \Theta' + \frac{\Phi}{r} W_{1n}'' - \\ &\quad - \frac{\Theta}{r} F_{1n}'' + \left( \frac{1}{r} \dot{W}_{1n} - \frac{n^2}{r^2} \dot{W}_{1n} \right) \Phi'; \\ \nabla_n^4 F_{1n} &= -\nabla_n^2 W_{1n} + \frac{\Theta}{r} W_{1n}' + \left( \frac{1}{r} \dot{W}_{1n} - \frac{n^2}{r^2} \dot{W}_{1n} \right) \Theta'. \end{aligned} \quad (13)$$

Система уравнений методом конечных разностей повышенной точности сводится к системе алгебраических уравнений. Равенство нулю детерминанта из коэффициентов системы уравнений (13), в которой параметр нагрузки входит в значения  $\Theta$  и  $\Phi$  и определяет критическое значение нагрузки, при котором исходное осесимметричное состояние переходит в возможные несимметричные формы.

Для определения характера начального этапа постбифуркационного состояния представим:

$$\begin{aligned} W &= W_0 + \xi W_1 + \xi^2 W_2 + \dots; \\ F &= F_0 + \xi F_1 + \xi^2 F_2 + \dots, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $W_0$  и  $F_0$  – параметры исходного осесимметричного деформирования;

$W_1$  и  $F_1$  – нормированные значения собственных функций, характеризующие форму выпучивания;

$W_2$  и  $F_2$  – функции, характеризующие начальный этап посткритического поведения оболочки, подлежащие определению;  $\xi$  – малый параметр.

Подставляя выражения (14) в исходные уравнения (1), приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях параметра  $\xi$  в правых и левых частях, с учетом уравнений (8) и (11) получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \nabla^4 W_2 - \nabla^2 F_2 + \left( \frac{F'_2}{r} + \frac{\ddot{F}_2}{r^2} \right) \cdot \Theta'_{cr} + \frac{W''_2}{r} \Phi_{cr} + \frac{F''_2}{r} \Theta_{cr} - \left( \frac{W'_2}{r} + \frac{\ddot{W}_2}{r^2} \right) \cdot \Phi'_{cr} = \\ = \left( \frac{F'_1}{r} + \frac{\ddot{F}_1}{r^2} \right) \cdot \ddot{W}_1 + \left( \frac{W'_1}{r} + \frac{\ddot{W}_1}{r^2} \right) \cdot F_1 - 2 \left( \frac{\dot{F}_1}{r} \right)' \left( \frac{\dot{W}_1}{r} \right)'; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \nabla^4 F_2 + \nabla^2 W_2 - \left( \frac{W'_2}{r} + \frac{\ddot{W}_2}{r^2} \right) \cdot \Theta'_{cr} - \frac{W''_2}{r} \cdot \Theta_{cr} = \\ = \left( \frac{W'_1}{r} + \frac{\ddot{W}_1}{r^2} \right)^2 - \left( \frac{W'_1}{r} + \frac{\ddot{W}_1}{r^2} \right) \cdot W''_1. \end{aligned}$$

Уравнения (15), вместе с соответствующими граничными условиями, описывают постбифуркационное поведение оболочки на начальном участке побочной (вторичной, закритической) равновесной ветви, т.е. в окрестности точки ветвления (бифуркации) исходной равновесной формы.

Анализ начального этапа постбифуркационного поведения сводится к установлению зависимости между параметром действующей нагрузки и амплитудой, возникающей смежной несимметричной формы выпучивания. В работе используется вариант общей теории устойчивости и посткритического поведения конструкций ранее разработанный В.Т. Койтером. Алгебраизация системы линейных дифференциальных уравнений (15) осуществляется методом конечных разностей повышенной точности с последующим решением получаемых систем уравнений с помощью стандартных программ.

На основе такого алгоритма решены конкретные задачи, получены значения коэффициентов, характеризующих начальный этап постбифуркационного поведения оболочек и, важные с практической точки зрения, соотношения между критическими и предельными значениями нагрузок.

В частности, показано, что в зависимости от площади загружаемой распределенной нагрузкой части поверхности оболочки, характер начального этапа посткритического деформирования меняется не только количественно, но и качественно.

### **Вывод.**

1. Предлагаемая методика решения общей нелинейной краевой задачи расчета конструкций, состоящая из трех взаимосвязанных и последовательных этапов позволяет выявить все характерные особенности поведения под нагрузкой тонкостенных систем, теряющих устойчивость.

2. Наиболее эффективными при решении задач, связанных с разрывными явлениями, являются комбинации приближенных аналитических – теории катастроф и численных методов, не требующих сложных, трудоемких и значительных объемов вычислений.

3. Анализ характера начального этапа постбифуркационного поведения конструкций позволяет оценить степень опасности достижения критического состояния и в зависимости от последствий, гарантии против его наступления должна быть различной, что достигается учетом значений соответствующих коэффициентов надежности в расчетах.

### **Библиографический список:**

1. Арнольд В.И. Теория катастроф. Москва: Ленанд, 2016 с.134.
2. Баженов В. Г., Гоник Е. Г., Кибец А. И., Шошин Д. В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагружениях / Прикл. мех. и техн. физ. 2014 т. 55 № 1. С. 13-22.
3. Бородин А.И., Новикова Н.Н., Шаш Н.Н. Применение синергетических методов и теории катастроф // Журнал “Эффективное антикризисное управление”. выпуск №2(89)/2015.с 84-90.
4. Ганеева М. С., Моисеева В. Е. Нелинейный изгиб и устойчивость сферических и эллипсоидальных оболочек при неосесимметричном нагружении / Пробл. прочн. и пластич. 2013 № 75 ч. 2. С. 105-114.
5. Малых К. С., Новичков А. А., Придатыко И. С. Устойчивость сферических оболочек с учетом начальных неправильностей формы / Молодежь. Техника. Космос: Труды 6 Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 19-21 марта, 2014. 2014. С. 62-64.

6. Муртазалиев Г.М. Методы теории катастроф в задачах устойчивости оболочек. ДГТУ. Махачкала 2004. 200с.
7. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М., Гусейнова С.В. Геометрические образы теории катастроф в нелинейных задачах //Теория сооружений: достижения и проблемы: сб. статей по материалам всероссийской научно-практической конф., 19-20 ноября 2012г. Махачкала/ ДГТУ. – Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2012. 126с.
8. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М. Методы теории катастроф в механике конструкций //Теория сооружений: достижения и проблемы: сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, 27-28 ноября 2015г. Махачкала/ ДГТУ. – Махачкала: Типография RIZO-PRESS, 2015.-132с.
9. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф: Учебное пособие для студентов вузов. — Москва: Издательство "Высшая школа", 2005. 327с.
10. Петров В. В., Кривошеин И. В. Влияние неоднородности материала на устойчивость нелинейно деформируемых пологих оболочек двоякой кривизны / Вестн. СГТУ. 2014 № 4. С. 20-25.
11. Пикуль В. В. Устойчивость оболочек / Пробл. машиностр. и автоматиз.- 2012 № 2 С. 81-87.
12. Семко В. В., Кривошеин И. В. / Моделирование влияния вида граничных условий на устойчивость нелинейно деформируемых пологих оболочек / Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-26): Сборник трудов 26 Международной научной конференции, Нижний Новгород, 27-30 мая, 2013. С. 53-55.

#### References:

1. Arnol'd V.I. Teoriya katastrof. Moskva: Lenand, 2016 s.134. [Arnold V.I. Catastrophe theory. Moscow: Lenand, 2016 p.134. (In Russ)]
2. Bazhenov V. G., Gonik Ye. G., Kibets A. I., Shoshin D. V. Ustoychivost' i predel'nyye sostoyaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzheniyakh / Prikl. mekh. i tekhn. fiz. 2014 t. 55 № 1. S. 13-22. [Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibets A. I., Shoshin D. V. Stability and limit states of elastic-plastic spherical shells under static and dynamic loading / Prikl. fur. and tech. physical 2014 vol. 55 No. 1. pp. 13-22. (In Russ)]
3. Borodin A.I., Novikova N.N., Shash N.N. Primeneniye sinergeticheskikh metodov i teorii katastrof // Zhurnal "Effektivnoye antikrizisnoye upravleniye". vypusk №2(89)/2015.s 84-90. [Borodin A.I., Novikova N.N., Shash N.N. The use of synergetic methods and catastrophe theory // Journal "Effective Anti-Crisis Management". Issue No. 2 (89) / 2015.pp 84-90. (In Russ)]
4. Ganeyeva M. S., Moiseyeva V. Ye. Nelineynyy izgib i ustoychivost' sfericheskikh i ellipsoidal'nykh obolochek pri neosesimmetrichnom nagruzhenii / Probl. prochn. i plastich. 2013 № 75 ch. 2. S. 105-114. [Ganeeva M. S., Moiseeva V. E. Non-linear bending and stability of spherical and ellipsoidal shells under non-axisymmetric loading / Probl. durable and plastic. 2013 No. 75, part 2, pp. 105-114. (In Russ)]
5. Malykh K. S., Novichkov A. A., Pridat'ko I. S. Ustoychivost' sfericheskikh obolochek s uchetom nachal'nykh nepravil'nostey formy / Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: Trudy 6 Obshcherossiyskoy molo-dezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 19-21 marta, 2014. 2014. S. 62-64. [Malykh K. S., Novichkov A. A., Pridatko I. S. Stability of spherical shells taking into account the initial irregularities of the form / Youth. Equipment. Space: Proceedings of the 6th All-Russian Youth Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, March 19-21, 2014. 2014. pp. 62-64. (In Russ)]
6. Murtazaliyev G.M. Metody teorii katastrof v zadachakh ustoychivosti obolochek. DGTU. Makhachkala 2004. 200s. [Murtazaliyev G.M. Methods of catastrophe theory in problems of shell stability. DSTU. Makhachkala 2004.200s. (In Russ)]
7. Murtazaliyev G.M., Payzulayev M.M., Guseynova S.V. Geometricheskiye obrazy teorii katastrof v ne-lineynykh zadachakh //Teoriya sooruzheniy: dostizheniya i problemy: sb. statey po materialam vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf., 19-20 noyabrya 2012g. Makhachkala/ DGTU. – Makhachkala: Izd-vo DGTU, 2012. 126s. [Murtazaliyev G.M., Payzulaev M.M., Huseynova S.V. Geometric images of catastrophe theory in non-linear problems // Theory of constructions: achievements and problems: cb. articles on the materials of the All-Russian scientific and practical conference., November 19-20, 2012. Makhachkala / DSTU. - Makhachkala: Publishing house of DSTU, 2012.126p. (In Russ)]
8. Murtazaliyev G.M., Payzulayev M.M. Metody teorii katastrof v mekhanike konstruksiy //Teoriya so-oruzheniy: dostizheniya i problemy: cbornik statey po materialam II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 27-28 noyabrya 2015g. Makhachkala/ DGTU. – Makhachkala: Tipografiya RIZO-PRESS, 2015.-132s. [Murtazaliyev G.M., Payzulaev M.M. Methods of catastrophe theory in structural mechanics // Theory of Constructions: Achievements and Problems: Collection of articles based on materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, November 27-28, 2015. Makhachkala / DSTU. - Makhachkala: Printing house RIZO-PRESS, 2015. 132p. (In Russ)]
9. Ostreykovskiy V. A. Analiz ustoychivosti i upravlyayemosti dinamicheskikh sistem metodami teorii katastrof: Uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov. — Moskva: Izdatel'stvo "Vysshaya shkola", 2005. 327s. [Ostreykovsky V. A. Analysis of the stability and controllability of dynamic systems by the methods of catastrophe theory: a manual for university students. - Moscow: Higher School Publishing House, 2005. 327p. (In Russ)]



10. Petrov V. V., Krivoshein I. V. Vliyaniye neodnorodnosti materiala na ustoychivost' nelineyno de-formiruyemykh pologikh obolochek dvoyakoy krivizny / Vestn. SGTU. 2014 № 4. S. 20-25. [Petrov VV, Krivoshein IV. Influence of material heterogeneity on the stability of nonlinearly deformable shallow shells of double curvature / Vestn. SSTU. 2014 No. 4. pp. 20-25. (In Russ)]
11. Pikul' V. V. Ustoychivost' obolochek / Probl. mashinostr. i avtomatiz.- 2012 № 2 С. 81-87. [Pikul V.V. Stability of the shells / Probl. machine building and automation. 2012 No. 2 pp. 81-87. (In Russ)]
12. Semko V. V., Krivoshein I. V. / Modelirovaniye vliyaniya vida granichnykh usloviy na ustoychivost' nelineyno deformiruyemykh pologikh obolochek / Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-26): Sbornik trudov 26 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Nizhniy Novgorod, 27-30 maya, 2013. pp. 53-55. (In Russ)]
13. Semko V. V., Krivoshein I. V. / Modelirovaniye vliyaniya vida granichnykh usloviy na ustoychivost' nelineyno deformiruyemykh pologikh obolochek / Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-26): Sbornik trudov 26 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Nizhniy Novgorod, 27-30 maya, 2013. S. 53-55. [Semko V.V., Krivoshein I.V. / Modeling the influence of the type of boundary conditions on the stability of nonlinearly deformable shallow shells / Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-26): Proceedings of the 26th International Scientific Conference, Nizhny Novgorod, 27- May 30, 2013.pp. 53-55. (In Russ)]

**Сведения об авторах:**

**Муртазалиев Гелани Муртазалиевич** – доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики.

**Пайзулаев Магомед Муртазалиевич**– кандидат технических наук, доцент, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики.

**Information about the authors:**

**Gelani M. Murtazaliev** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics.

**Magomed M. Payzulaev** – Cand. Sci. (Technical), As. Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 18.05.2019.

**Принята в печать** 19.06.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 18.05.2019.

**Accepted for publication** 19.06.2019.



## **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: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

### **Elements of the title of the published material**

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

### **Body text**

Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

## **Bibliography**

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

## **Information about authors**

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no

more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

### **Composition of formulas**

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

### **Layout of figures**

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

### **Layout of tables**

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

### **Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff**

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

#### **Publication schedule**

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 ImamaShamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: [vestnik.dgtu@mail.ru](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– №2 – 2019.

**HERALD**  
**OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**  
Makhachkala, Volume 46, No.2, 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 30.06.2019г. Сдано в печать 30.06.2019г.

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 № 417.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»  
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.

## ДЛЯ ЗАМЕТОК