

ISSN (Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

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



Том 43, № 4, 2016.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 43, No.4, 2016.

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 71366 в федеральном каталоге периодических изданий ОАО Агентства «Роспечать». Подписной индекс 93522 в объединенном каталоге «Пресса России». 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).

© Учредитель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2016.

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 71366 is in the federal catalogue of periodicals of the JSC Rospechat Agency. Subscription index 93522 in the integrated catalogue "Press of Russia". 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).

© Founder Daghestan State Technical University, 2016

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

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ Том 43, № 4, 2016 г.

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

Абакаров Г.М., д.х.н., профессор, заведующий кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Абдулгалимов А.М., д.э.н., профессор, заведующий кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Адамов А.П., д.т.н., профессор 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.

Билалов Б.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Володин В.М., д.э.н., профессор, декан Пензенского государственного университета, г. Пенза, Россия.

Гулиев М.Е., д.э.н., доцент Азербайджанского государственного экономического университета, г. Баку, Азербайджанская республика.

Гусейнов Р.В., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Исалова М.Н., д.э.н., профессор, заведующая кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Исмаилов Э.Ш., д.б.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, начальник Управления развития перспективных исследований, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор, ректор 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.

Магомедов А.Г., д.э.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

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

Митаров Р.Г., д.ф.-м.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Павлюченко Е.И., д.э.н., профессор, проректор по НИИД Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, заведующий 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.

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «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, ректор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор, ректор 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.

Давидок А.Н., д.т.н., заслуженный строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия.

Джанзаков И.И., д.т.н., профессор, член-корр. НИА РК, академик МАНЭБ, г. Атырау, Республика Казахстан.

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.

Кругляков А.А. д.т.н., профессор, генеральный директор научно-коммерческой фирмы WBN, г. Берлин, Германия.

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

Несветаев Г.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия.

Райзер В.Д., д.т.н., профессор, штат Калифорния, г. Сан-Диего, США.

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

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

Эмиров Ю.Н., д.ф.-м.н., ученый-исследователь Центра нанотехнологий Университета Южной Флориды, США.

Якунин А.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Вычислительные системы и информационная безопасность», ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия.

Адрес учредителя: 367015, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс 8722)623715; (8722)623964 E-mail:vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

Научные направления:

Физико-математические науки
Механика

Технические науки

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

Информатика, вычислительная техника и управление

Строительство и архитектура

Экономические науки

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 43, №4 Махачкала, 2016 – 200 с.

Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕХАНИКА..... 8

Ахмедова М.Р., Гусейнов Р.В.

**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТЧИКИ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБ
В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ 8**

Ахмедпашаев М.У., Ахмедпашаев М.М., Бегов Ж.Б.

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ВИНТОВ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ
ВИБРООБКАТКОЙ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ..... 17**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ.....25

Баранов А.Ю., Осина А.А., Синькова В.А.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ
ДЛЯ ОБЩЕГО КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ..... 25**

Васильев Т.Р., Кокуев А.Г.

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ОПТИ-
КО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 34**

Гайдаев А.А.

**НАКЛОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ РАДИОВОЛН МЕТЕОРНЫМИ СЛЕДАМИ
В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ 42**

Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Мироненко И.Г., Челушкина Т.А.

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГРУПП ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ПО ПЕРЕХОДНЫМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ЯЧЕЙКАХ 53**

Марченко А.С., Сулин А.Б.

**ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛОТЫ 63**

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 73

Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю.

**ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕЙСМОДАТЧИКОВ НА ТОЧ-
НОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИПОЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 73**

Баламирзоев А.Г., Баламирзоева Э.Р., Магомедова М.Р.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ И ВЫНОСА
СОЛЕЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ 85**

Ибрагимов С.А., Кадиев П.А.

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОДНОРОДНЫХ РЕГИСТРОВЫХ СРЕД С ПРОГРАММИ-
РУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ 95**

Стариков Е.С., Сучкова Л.И.

**ГИБРИДНЫЕ ПОДХОДЫ К ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ О ТЕМПОРАЛЬ-
НЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ В ГРУППЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ БАЗЫ ДАННЫХ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА..... 104**

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	112
<i>Аллаев М.О.</i> ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВОВ ГРУНТА С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СЛАГАЮЩИХ ПОРОД НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ	112
<i>Алехин В.С., Купчикова Н.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИ- ОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОНАБИВНЫХ МИКРОСВАЙ С УШИ- РЕННОЙ ПЯТОЙ ИЗ ЩЕБНЯ.....	123
<i>Алиев С.А., Муртазаева Т. С-А., Сайдумов М.С., Саламанова М.Ш.</i> САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ СЕЙСМО- СТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	133
<i>Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М.</i> НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ	144
<i>Жильникова Т.Н., Корянова Ю.И., Несветаев Г.В.</i> ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЛИЯНИЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ БЕТОНОВ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ С ДВУХСТАДИЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ.....	153
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	167
<i>Атуева Э.Б., Исалова М.Н., Шабанова М.М.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОММУНАЛЬНОГО ХО- ЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ МУНИЦИПАЛЬНО- ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА	167
<i>Байрамуков С.Х., Долаева З.Н., Каппушева М.Б.</i> ДИНАМИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИ- ЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ЖИЛИЩНОГО ФОНДА.....	175
<i>Доржиева Э.Л.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ КОРПОРАЦИЙ.....	184
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ.....	197

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
“Daghestan State Technical University”
HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Volume 43, No. 4, 2016.

<p>Editor-in-Chief: Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Editorial Board: Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gasan M. Abakarov, Doctor of Chemical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Abdulgalim M. Abdulgalimov, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Bilal A. Bilalov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Viktor M. Volodin, Doctor of Economics, Professor, Dean, Penza State University, Penza, Russia. Mushfig E. Guliev, Doctor of Economics, Associate Professor, Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan; Rasul V. Guseynov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Marzhanat N. Isalova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Elder Sh. Ismailov, Doctor of Biology, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the department of the development of perspective researches of National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia; Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC "Research Center" Strategy", Moscow, Russia. Arbuli. G. Magomedov, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Rizwan G. Mitorov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Elena I. Pavlyuchenko, Doctor of Economics, Professor, Vice Rector on scientific and innovative activity, Daghestan State Technical University, Makhachkala, 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; Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, Doctor of Technical Science, Professor, Dean, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia.</p>	<p>Research areas</p> <p>Physical-mathematical science Mechanics</p> <p>Technical science Power, Metallurgical and Chemical Mechanical Engineering</p> <p>Computer science, Computer Engineering and Management</p> <p>Building and architecture</p> <p>Economic science</p>
<p>Editorial council</p> <p align="center">Chairman of the editorial council:</p> <p>Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, rector, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p align="center">The co-chairs of the editorial council:</p> <p>Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, rector, Ustinov Baltic State Technical University "VOEN-MECH", Saint-Petersburg, Russia Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia; Members of the editorial Board Mustafa B.-O. Babanly, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan. Alexey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC "SIC Construction", Moscow, Russia. Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, corresponding member, SRA RK, academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan. 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. Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director. Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung - Dr., Friedrichstrasse 106 b, D-10117 Berlin, Germany / Deutschland. Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia. Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. Vladimir D. Raizer, Ph.D., Professor, California, San Diego, USA. 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. Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia. Yousof N. Emirov, Doctor of Mathematics and Physics, research associate, Nanotechnology Research and Education Center, University of South Florida, USA. Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, head of the department, Computing Systems and Information Security, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p>	<p align="center">Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science</p> <p>Volume 43, No.4 Makhachkala, 2016 –200 p.</p> <p>Published by decision of the Academic Council Daghestan State Technical University</p> <p>Edition address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367015, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>

CONTENTS

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE

MECHANICS 8

Milena R.Akhmedova, Rasul V.Guseynov

HIGH PERFORMANCE TAPS FOR CUTTING THREADS IN DIFFICULT TO MACHINE MATERIALS8

Magomedpasha U. Akhmedpashaev, Murad M. Akhmedpashaev, Zhamidin B.Begov

INCREASE IN THE WORKING LIFE OF SCREWS OF IMMERSION PUMPS BY VIBRATORY FINISHING OF THEIR SURFACES17

TECHICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING 25

Alexander U.Baranov, Anastasia A.Osina, Valentina A.Sinkova

ENERGY AND CONSTRUCTION CONDITIONS OF THE EFFECTIVENESS OF APPAATUS FOR GENERAL CRYOTHERAPEUTIC IMPACT25

Timur R.Vasilyev, Andrey G.Kokuev

APARATUS FOR MEASURING MULTIPHASE CURRENT DIFFUSION BASED ON THE OPTOACOUSTIC EFFECT34

Abidi A.Gaydaev

TRANSVERSE SCATTERING OF RADIO WAVES BY METEOR TRAILS IN PULSED MODE42

Tagir A.Ismailov, Khadzhimurat M. Gajiyev, Igor G. Mironenko, Tatiana A.Chelushkina

DIAGNOSIS OF GROUPS OF ELECTRO-RADIO COMPONENTS ACCORDING TO THE TRANSIENT RESPONSES FOR THE DETECTION OF DEFECTS ON THE FUNCTIONAL CELLS53

Andrey S. Marchenko, Alexander B.Sulin

EFFECTIVE SOLUTIONS FOR THERMOELECTRIC HEAT TRANSFORMERS USING HEAT CONVERTERS63

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT73

Tagirbek G. Aslanov, Khaskil J. Magomedov, Uma A. Musaeva, Khalipa Y.Tagirov

INFLUENCE OF THE SPATIAL ARRANGEMENT OF SEISMIC DETECTORS ON THE ACCURACY OF EARTHQUAKE HYPOCENTRE DETERMINATION73

Abdul G. Balamirzoev, Esmira R. Balamirzoeva, Milada R.Magomedova

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF RESORPTION AND SALT DEPLETION BY FILTRATION IN FISSURED ROCK STRATA85

Syltansaid A. Ibragimov, Pasay A. Kadiev

PROVISION OF RELIABILITY OF HOMOGENEOUS REGISTER MEDIA WITH PROGRAMMED SLIDING REDUNDANCY STRUCTURE 95

Egor S. Staricov, Larisa I. Suchkova

HYBRID APPROACHES TO THE FORMALISATION OF EXPERT KNOWLEDGE CONCERNING TEMPORAL REGULARITIES IN THE TIME SERIES GROUP OF A SYSTEM MONITORING DATABASE104

BUILDING AND ARCHITECTURE	112
<i>Mazhid O. Allaev</i>	
EVALUATION OF SUBSOIL MASSIF STABILITY TAKING INTO ACCOUNT THE IRREGULARITY OF CONSTITUENT ROCKS ON THE BASIS OF A RANDOM SIZE AND FUNCTION MODEL	112
<i>Vitaly S. Alekhin, Natalia V. Kupchikova</i>	
EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL ANALYSIS FOR THE DEFORMATION- STRENGTH CHARACTERISTICS OF RAMMED MICRO-PILES WITH A BROADENED AGGREGATE BASE	123
<i>Salambek A. Aliev, Tamara S. Murtazayeva, Magomed S. Saydumov, Madina S. Salamanova</i>	
SELF-CONSOLIDATING CONCRETE USED IN THE MONOLITHIC CONSTRUCTION OF EARTHQUAKE-RESISTANT TALL BUILDINGS	133
<i>Damir T. Bautdinov, Magomed M. Dzhamaludinov</i>	
STRESSED STATE OF ROCKY SUBSOIL IN THE VICINITY OF A CIRCULAR SECTION HYDRAULIC ENGINEERING TUNNEL TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPY OF THE GROUND MEDIUM	144
<i>Tatjana N. Zhilnikova, Yulia I. Koryanova, Grigory V. Nesvetaev</i>	
INTEGRAL INDICATORS OF THE INFLUENCE OF FORMULA-TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE CEMENT MATRIX OF CONCRETE STRUCTURE FORMATION FOR INJECTION WITH TWO-STEP EXPANSION	153
ECONOMIC SCIENCE	167
<i>Enara B. Atueva, Marzhanat N. Isalova, Madina M. Shabanova</i>	
INCREASING THE FUNCTIONAL EFFECTIVENESS OF MUNICIPAL SERVICE SYSTEMS THROUGH MUNICIPAL-PRIVATE PARTNERSHIP MECHANISMS.....	167
<i>Salis K. Bayramukov, Zuriyat N. Dolaeva, Madina B. Kappusheva</i>	
DYNAMIC PLANNING INDICATORS FOR OPTIMISING THE ENERGY MODERNISATION OF RESIDENTIAL HOUSING STOCK.....	175
<i>Erzhena L. Dorzhieva</i>	
IMPROVED METHODS FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATION DEVELOPMENT IN RUSSIAN CORPORATIONS.....	184
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	197

Для цитирования: Ахмедова М.Р., Гусейнов Р.В. Высокопроизводительные метчики для нарезания резьб в труднообрабатываемых материалах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):8-16. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-8-16

For citation: Akhmedova M.R., Guseinov R.V. High performance taps for cutting threads in difficult to machine materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43(4):8-16. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-8-16

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621.993

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-8-16

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТЧИКИ ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ахмедова М.Р.¹, Гусейнов Р.В.²

¹Кубанский государственный университет,

¹350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, Россия,

²Филиал Дагестанского государственного технического университет в г. Каспийске,

²367015, г. Каспийск, ул. Алферова 3, Россия,

¹e-mail- mili-g1@mail.ru, ²e-mail:ragus05@mail.ru

Резюме: *Цель.* В статье рассматриваются вопросы инструментального обеспечения операций нарезания внутренних резьб в деталях из труднообрабатываемых материалов. Указано на существующую связь между амплитудой вибраций системы и стойкостью инструмента. На этой основе определено направление улучшения показателей стойкости инструмента за счет повышения его виброустойчивости. На основе критического анализа существующих конструкций с учетом их недостатков поставлена задача разработки новых технологичных конструкций метчиков, обеспечивающих устойчивую работу при обработке труднообрабатываемых материалов. **Метод.** Одним из основных способов повышения виброустойчивости инструмента является уменьшение площади контакта инструмента с заготовкой в зоне резания. Для повышения виброустойчивости метчиков предложены методы повышения виброустойчивости за счет корригирования зубьев метчика с целью полного исключения трения боковых сторон зуба о поверхности нарезаемой резьбы и неравномерного выполнения шага стружечных канавок. **Результат.** Идея повышения виброустойчивости, следовательно, точности нарезаемой резьбы и стойкости за счет уменьшения площади контакта зубьев с заготовкой в зоне резания реализована в разработанных новых конструкциях виброустойчивых метчиков, признанных изобретениями. В корригированных метчиках повышение виброустойчивости достигнуто путем высотной коррекции за счет занижения боковых сторон зубьев заборного конуса метчика дополнительным углом 30°. В другой конструкции перья выполнены с неравномерным угловым шагом. Приведены результаты испытаний разработанных метчиков при обработке коррозионно-стойкой стали 1Х18Н9Т. Получено многократное повышение стойкости инструмента за счет их высокой виброустойчивости. **Вывод.** Разработанные метчики обладают рядом достоинств, характеризующихся высокой стойкостью при обработке труднообрабатываемых материалов, но, несмотря на незначительное повышение трудоемкости их изготовления по сравнению со стандартными метчиками, могут быть рекомендованы для широкого внедрения в производство.

Ключевые слова: обработка внутренних резьб; метчики; виброустойчивость инструмента; корригирование профиля резьбы

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

HIGH PERFORMANCE TAPS FOR CUTTING THREADS IN DIFFICULT TO MACHINE MATERIALS

*Milena R. Akhmedova*¹, *Rasul V. Guseynov*²

¹Kuban State University,

¹149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 35004, Russia,

²Branch of Dagestan State Technical University in Kaspiysk,

³Alferov Str., Kaspiysk 367015, Russia,

¹e-mail mili-gl@mail.ru, ²e-mail: ragus05@mail.ru

Abstract: Objectives. This article explores in detail questions of instrument operation function of tapping internal threads in hard materials. The existing relationship between vibration system amplitude and tool durability is indicated; on this basis, it is determined that the best course for improving the durability performance is increasing vibratory resistance. Based on a critical analysis of existing designs with consideration of their flaws, the development of new technological designs of taps is tasked with ensuring stable operation when handling hard materials. **Methods.** It is noteworthy that one of the main vibration resistance improvement methods of the tool is to reduce the contact area of the tool with the work piece in the cutting zone. Methods are proposed for improving the vibration resistance of taps, considering the correlation adjustment of tap teeth in order to completely eliminate friction at the sides of the thread cutting surface and uneven implementation flute cutting steps. **Results.** The idea of increasing vibration resistance has seen the new development of vibration-proof tap designs, heralded as innovations due to the accuracy of thread cutting and durability achieved by reducing the thread contact area with the work piece in the cutting zone. Increased vibration resistance is achieved in the modified taps through high correction by means of thread side downgrading of the coarse tap cone by an additional angle of 30°. In another design, the stylus provided with uneven angular spacing. Test results of designed taps machined in corrosion-resistant 1Kh18N9T steel. A manifold increase in tool durability was achieved due to its high vibration resistance. **Conclusions.** The redesigned taps have a number of advantages, characterised by a high resistance when processing difficult materials and an insignificant increase in the complexity of their manufacture compared with standard taps. Therefore they can be recommended for large-scale implementation in production.

Keywords: internal thread cutting, taps, vibratory resistance, thread correlation adjustment

Введение. Трудности, возникающие при обработке высокопрочных, жаропрочных и титановых сплавов, наиболее резко проявляются при нарезании резьб метчиками.

Условия работы метчиков весьма затруднены, так как в работе участвуют одновременно большое количество зубьев; контакт инструмента с деталью осуществляется не только в зоне резания, но и по нерабочим боковым поверхностям; как отдельные режущие зубья, так и весь метчик недостаточно прочны, особенно при нарезании резьб с малым диаметром и шагом; зона резания малодоступна для смазочно-охлаждающей жидкости и т.д. [1].

Увеличенная площадь контакта инструмента с деталью, недостаточное смазывание и охлаждение, с учетом повышенной склонности жаропрочных материалов к схватыванию, обуславливают возрастание момента и работы трения, что вызывает повышение температуры резания и интенсивный износ метчика. Кроме того, упругое последствие витков резьбы, особенно при обработке титановых сплавов, характеризующихся низким значением модуля упругости, вызывает возникновение нормальных сил, приводящих к защемлению зубь-

ев метчика во впадинах резьбы и возрастанию суммарного крутящего момента. В результате при нарезании резьбы метчиками в жаропрочных и титановых сплавах наблюдаются сколы и выкрашивание отдельных зубьев, ухудшение качества обработки и поломка метчиков.

Постановка задачи. Повышение качества механической обработки и производительности труда можно достичь разными путями, в частности, за счет оптимального выбора режимов резания, улучшения конструкции режущего инструмента. В настоящее время сформировался целый ряд комбинированных инструментов, позволяющих совместить резьбовую операцию с другими видами обработки (зенкерование и нарезание резьбы, сверление и нарезание резьбы, развертывание и нарезание резьбы и др.) [2-7].

Применение комбинированных инструментов обеспечивает повышение производительности обработки, а также себестоимости обработки на данной операции. Кроме того, при их использовании уменьшается количество вспомогательного инструмента, высвобождаются рабочие позиции и места в инструментальных магазинах при обработке на современном оборудовании. Благодаря этим преимуществам следовало бы их рекомендовать для широкого использования в машиностроении. Однако проведенные исследования показали, что применение комбинированного осевого инструмента, особенно малого диаметра, неэффективно при обработке труднообрабатываемых материалов [8]. Дело в том, что такой инструмент из-за увеличенной длины характеризуется малой жесткостью, следовательно, малой виброустойчивостью.

На рис. 1 показана зависимость амплитуды колебаний от жесткости метчика при нарезании внутренней резьбы М10 в коррозионно-стойкой высокопрочной стали аустенитного класса, легированной азотом 08Х20Р5АГ12МФ, применяемой для изготовления деталей судостроения ($V=3$ м/мин) [9]. Анализ этой зависимости показывает, что уменьшение жесткости метчика на 39 % приводит к увеличению амплитуды колебаний почти в 2 раза.

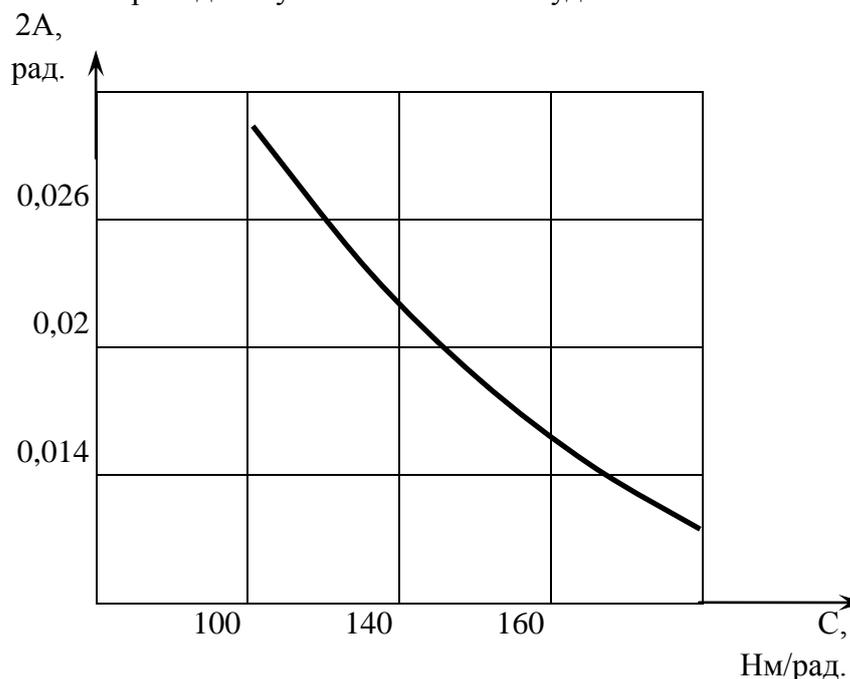


Рис.1. Зависимость амплитуды колебаний от жесткости метчика

Fig.1. The dependence of amplitude on stiffness of the tap

Учитывая однозначную связь между амплитудой вибраций инструмента и стойкостью, повышение стойкости метчиков можно достичь за счет повышения их виброустойчивости.

Методы исследования. Идея повышения виброустойчивости метчика, следовательно, точности нарезаемой резьбы и стойкости инструмента, за счет уменьшения площади контакта зубьев с заготовкой в зоне резания научно обоснована нашими исследованиями, а также исследованиями других авторов [10-16]. Как показали проведенные исследования, для

большого класса закаленных сталей, жаропрочных и титановых сплавов это трение существенно. Поэтому потребовалось создание методов коррекции зубьев метчика с целью полного исключения трения боковых сторон зуба о поверхности нарезаемой резьбы. Хорошие результаты показывают скорректированные метчики, характеризующиеся тем, что у них угол профиля меньше угла профиля нарезаемой резьбы.

В результате между обрабатываемым материалом и боковыми поверхностями режущих зубьев возникают зазоры, что уменьшает момент трения, устраняет защемление зубьев метчика во впадинах резьбы и способствует лучшему проникновению смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания [17].

Получение заданного профиля резьбы достигается в результате обратной конусности по среднему диаметру метчика. Угол обратного конуса обычно рассчитывают по формуле:

$$\operatorname{tg} \eta = \operatorname{tg} \varphi \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varepsilon}{2} - 1 \right), \quad (1)$$

где, δ – угол обратного конуса; φ – угол заборного конуса; α_0 – угол профиля резьбы; ε – угол профиля метчика. Для метрической резьбы $\alpha_0 = 60^\circ$.

При нарезании метрической резьбы угол профиля метчика ε примерно на 4 - 5 градусов меньше профиля нарезаемой резьбы. Такой профиль получается путем его шлифовки с обратной конусностью η под углом к оси метчика. Резьбу шлифуют с обратным конусом при повороте стола резьбошлифовального станка или смещении заднего центра; круг при этом заправляют под углом η .

Необходимо указать на существенные недостатки скорректированных метчиков данной конструкции. Во-первых, на профиле резьбы, нарезанной таким метчиком, остаются несрезанные гребешки высотой

$$h = \frac{P}{Z} \sin \varphi, \quad (2)$$

где, P – шаг резьбы; Z – число перьев.

Такие метчики нельзя использовать для обработки точных резьб.

Во-вторых, скорректированные метчики данной конструкции нельзя применять для глухих отверстий, так как при больших значениях образующиеся на поверхностях обработки ступеньки по размерам превышают значения высоты неровностей для заданного класса шероховатости профиля резьбы.

В-третьих, в виду малости угла $\frac{\varepsilon}{2}$ боковой коррекции имеется трение участков, прилегающих к режущей части зуба. Как показали исследования, для жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов это трение существенно.

В-четвертых, переточки метчика сопровождаются уменьшением среднего диаметра нарезаемой резьбы, ухудшая точность обработки.

Величина уменьшения среднего диаметра резьбы Δd_2

$$\Delta d_2 = 2000 a \operatorname{tg} \alpha \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha_0} \frac{\sin A}{\cos B}, \text{ мкм} \quad (3)$$

где a – толщина слоя, снимаемого при переточке метчика по передней поверхности, в мм.

$$A = \frac{\varepsilon}{2}; \quad B = \frac{\varepsilon}{2} + \varphi.$$

Величина a определяется износом по задней поверхности и по углам режущих зубьев метчика.

Обсуждение результатов. При нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах повышенной прочности величина износа по задней поверхности высока и эффективность таких метчиков низка, особенно при обработке отверстий высокой точности.

Поэтому потребовалось создание новых методов коррекции зубьев метчика с целью полного исключения трения боковых сторон зуба о поверхности нарезаемой резьбы [18, 19].

В конструкции автора [18], признанной изобретением, это достигалось совершенно новым методом высотной коррекции за счет занижения боковых сторон зубьев заборного конуса метчика дополнительным углом 30° с сохранением внутреннего диаметра метчика.

Ширина первой впадины определяется по формуле (4)

$$a_1 = C [(0,5 (d - d_0) / \tan \varphi - L + P) \sin \varphi \sin (0,5 \alpha_0)], \quad (4)$$

где, $C = 1 / [2 \cos (\frac{\alpha_0}{2} + \varphi)] + 1 / [2 \cos (\frac{\alpha_0}{2} - \varphi)]$

Каждая последующая впадина больше предыдущей, на величину S

$$S = C \frac{P}{4} \sin \varphi \sin \frac{\alpha_0}{2}, \quad (5)$$

где L – длина заборного конуса; d_0 – внутренний геометрический диаметр резьбы метчика.

Так как трение этих частей об обрабатываемый материал вследствие деформации поперечного сечения велико, их удаление значительно уменьшает момент трения. В результате этого устраняется защемление зубьев метчика во впадинах резьбы, и обеспечиваются условия для лучшего проникновения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания. При таком задании размеров впадин обеспечивается удаление трущихся участков зубьев.

При резбонарезании за счет последовательного увеличения впадин зубьев заборной части, а, следовательно, и уменьшения толщины соответствующих зубьев, неработающие поверхности зубьев сошлифованы, трение этих частей об обработанные поверхности витков резьбы отсутствуют, улучшается проникновение смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания, и нагрузка равномерно распределяется между зубьями. Все это приводит к уменьшению сил резания, трения и момента резбонарезания, деформации поперечного сечения, к сглаживанию характеристики силы за счет уменьшения суммарной площади контакта метчика с деталью в зоне резания, следовательно, к уменьшению амплитуды крутильных автоколебаний метчика. Кроме того, увеличивается объем впадин зубьев метчика, что увеличивает коэффициент вмещаемости стружки, и не происходит забивания метчика стружкой.

Уменьшение трения по боковым поверхностям зубьев предлагаемых метчиков и более высокая эффективность смазочно-охлаждающих жидкостей обуславливают заметное снижение температуры резания [19]. Снижение крутящего момента и температуры резания при работе такими метчиками повышает их стойкость более в 6 раз (рис. 2). Метчики до износа по задней поверхности зубьев 0,3 мм обеспечивают точность в пределах не ниже 4Н.

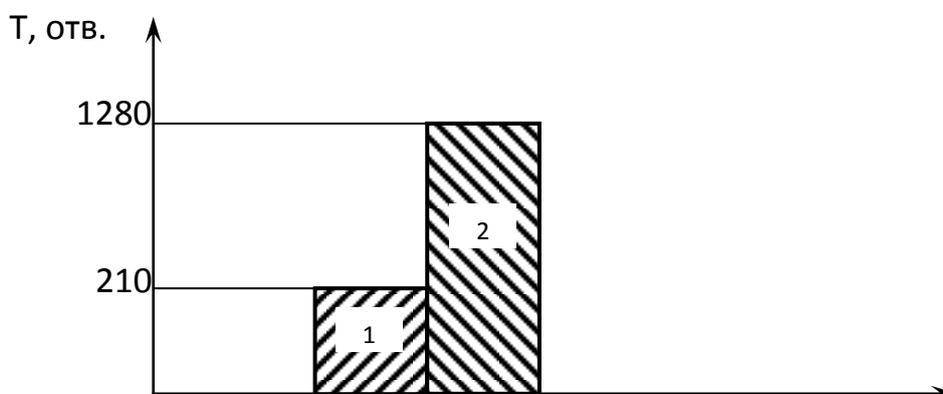


Рис. 2 Стойкость различных конструкций метчиков

Fig. 2 Resistance of various designs of taps

(1X18H9T, M10, $\varphi_3 = 3^\circ$, $\gamma = 7^\circ$, $\alpha = 9^\circ$, $z = 3$, $h_3 = 0,25$ мм, P6M5)

1 – стандартный метчик, 2 – разработанный метчик

Конструкция такого метчика не очень технологична в изготовлении, поскольку требует большого набора шлифовальных кругов, количество которых равно количеству зубьев заборного конуса плюс один калибрующий зуб, отличающихся друг от друга толщиной, соизмеримой с точностью правки шлифовального круга и точностью базирования инструмента. Поэтому требовалось создание новой конструкции метчика, лишенной указанных недостатков.

Нами разработан метчик, обладающий всеми преимуществами предыдущего, но характеризующийся большей технологичностью [20]. Отличительной особенностью его конструкции является то, что боковой профиль зубьев заборной части и первого витка калибрующей части занижен, а их внутренние диаметры расположены на конусе, обратном конусу заборной части. При этом на рабочей части выполнена направляющая часть, а боковой профиль зубьев заборной части и первого витка калибрующей части занижен с обеих сторон. При нарезании резьб средних и больших диаметров в труднообрабатываемых сталях и сплавах, титановых сплавах хорошие результаты показывают метчики [21], у которых помимо того, что неработающие участки зубьев удалены, но и отмечается разная толщина стружки, снимаемой перьями.

На рисунке 3 показано поперечное сечение предлагаемого метчика с тремя перьями. Метчик содержит три стружечные канавки I, II, III, соответственно три пера I_n, II_n, III_n. У стандартного метчика задний угол получают затылованием задней поверхности по архимедовой спирали АЕ. Величина затылования EL определяется по известной формуле:

$$EL = \frac{d}{z} \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

где, d - диаметр метчика, α - величина заднего угла заточки, z - число перьев.

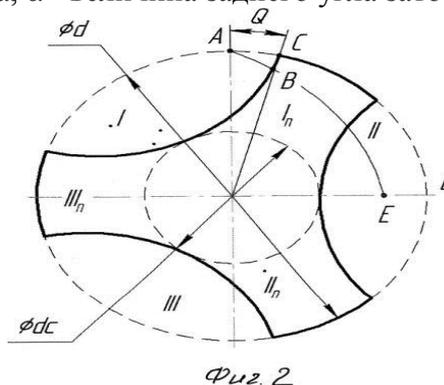


Рис. 3. Поперечное сечение предлагаемого метчика с тремя перьями

Fig. 3. The cross section of the proposed tap with three flutes

Одна стружечная канавка, в нашем случае I, выполнена с угловым сдвигом θ по часовой стрелке с сохранением диаметра сердцевины d_c. В таком случае объем стружечных канавок не меняется, ширина пера III_n увеличивается. Затылование зубьев по задней поверхности предлагаемого метчика производится как у обычного стандартного метчика.

Выполнение стружечной канавки I с угловым сдвигом θ по часовой стрелке приводит к смещению режущей кромки из точки A в точку C, что приводит к уменьшению толщины среза зубьями первого пера I на величину BC.

$$BC = \theta \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

Толщина среза зубьями третьего пера a_{III_n} метчика определяется по известной формуле:

$$a_{III_n} = P \operatorname{tg} \varphi, \quad (8)$$

где, P - шаг резьбы, z - число перьев, соответственно, стружечных канавок, φ угол заборного конуса метчика.

Толщина срезаемого слоя зубьями первого пера a_{I_n} будет меньше на величину BC, чем a_{III_n}, т.е.

$$a_{I_n} = a_{III_n} - \theta \operatorname{tg} \alpha = P \operatorname{tg} \varphi - \theta \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Толщина срезаемого слоя зубьями второго пера a_{II_n}, соответственно, будет на величину BC больше, чем a_{III_n}, т.е.

$$a_{II_n} = P \operatorname{tg} \varphi + \theta \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

Данный метчик работает следующим образом. В процессе резания зубья разных перьев работают с разными толщинами среза. Из-за неоднородности обрабатываемого материала, наличия в нем твердых и мягких включений, различной толщины среза разными зубьями в процессе обработки резьбы метчик будет совершать вынужденные крутильные колебания. Так как сила трения уменьшается с увеличением скорости, эти колебания будут способствовать уменьшению трения в зоне резания, облегчается подача в нее смазочно-охлаждающей жидкости, облегчается формирование и удаление стружки (образуется элементная стружка), устраняется налипание ее на режущие кромки.

Все это значительно снижает момент трения и, соответственно, величину крутящего момента. В результате улучшается качество обработанных поверхностей, повышается стойкость инструмента. Кроме того, образование элементной стружки дает возможность несколько уменьшить объем стружечных канавок за счет увеличения величины диаметра сердцевины d_c . Это повысит жесткость инструмента и, соответственно, стойкость инструмента, и качество резьбы.

Вывод. Проведены исследования работоспособности метчиков, в конструкцию которых заложена идея повышения виброустойчивости, следовательно, точности обработки и стойкости инструмента за счет уменьшения площади контакта зубьев с заготовкой в зоне резания. Предложенная идея может быть реализована для улучшения конструкций других металлорежущих инструментов.

Разработанные метчики обладают рядом достоинств, отличающихся более высокой стойкостью при обработке труднообрабатываемых материалов. Несмотря на незначительное повышение трудоемкости их изготовления по сравнению со стандартными метчиками, могут быть рекомендованы для широкого внедрения в производство.

Библиографический список:

1. Woods S. Insider trading: evaluating internal threading methods// Cutting Tool Engineering. Northfield, IL. 2014.
2. Emuge. Thread Cutting Technology. Clamping Technology. Toll Catalogue140. EMUGE – Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG Fabrik für Präzisionswerkzeuge, 2010. 760 p.
3. Voelkener W. Einfache Berechnung der maximalen Uniformkraft beim ge-leiteten Anstanchen. Fertigungstechen und Betr. 1971, 21, № 5 . S. 308-309.
4. Pat. DE 3627798 A1 DBR, Int.Cl.4 B23G 5/20. Verfahren und Werkzeug zur Herstellung von Gewindebohrungen / Rolf Klenk GmbH & Co Kg (DBR).
5. Pat. 5413438 USA, Int.Cl.6 B23C 3/00; B23G 5/20. Combined hole making and threading tool / M.C.Turchan (USA).
6. Pat. 456408 Sweden, Int.Cl.4 B23G 5/20. Borr och gangverk tyg / B Bergstrom, H.Lindberg (Sweden); Sandvik AB (Sweden).
7. Древаль А.Е. Разработка комбинированных резьбообразующих инструментов/А.Е.Древаль, П.Д.Булахов, А.В.Литвиненко// Новые технологии, оборудование, оснастка и инструменты для механической обработки и сборки; Матер.семина «Знание» РФСР. Моск. дом науч.-техн. проп. М.,1990. - С.153-156.
8. Гусейнов Р.В. Об эффективности комбинированного инструмента при лезвийной обработке отверстий в труднообрабатываемых материалах/ Р.В.Гусейнов// Вестник машиностроения. М.: 2001.- №9. - С.54-56.
9. Гусейнов Р.В. Интенсификация технологических процессов обработки труднообрабатываемых материалов путем управления динамическими параметрами системы. /Автореферат диссертации на соискание ученой степени докт. техн.наук. Санкт-Петербург, 1998.
10. Гусейнов Р.В. Исследование процесса обработки отверстий на основе нелинейной динамики./Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р.// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014.- №4.- С.77-80.

11. Гусейнов Р.В. Расчетная модель динамики нелинейных систем/ Гусейнова М.Р., Гусейнов Р.В. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. - №1(36). - С.24-30.
12. Гусейнов Р.В. Нарезание точных резьб. /Вестник машиностроения.М.:2004.№10.- С.47-48.
13. Гусейнов Р.В. Инструментальное обеспечение технологии обработки резьб в жаропрочных и титановых сплавах./ Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р.//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. - №28. - С.57-62.
14. Гусейнов Р.В. Обоснование базы данных для исследования динамических процессов при резании./ Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р.//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. - №4. - С.36-44.
15. Гусейнов Р.В. Технология нарезания внутренних резьб при наличии радиальных сил/ Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р. //Вестник машиностроения. 2009. №5. С.60-62.
16. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом.Л.: Машиностроение.1986.-180 с.
17. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. Коллектив авторов. М.: Машиностроение, 1972. - 200 с.
18. Гусейнов Р.В., Жарков И.Г. Метчик. А.С. 1222443 Б.И. №2. -1986.
19. Гусейнов Р.В. Корригированные метчики. И.: Машиностроитель. №2.-1998.
- 20.Гусейнов Р.В. Метчик. А.С. 2229965. Б.И. №5, 1999.
21. Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р. Метчик. Патент 2542217. Б.И. №5. РФ.2015.

References:

- 1.Woods S. Insider trading: evaluating internal threading methods. Cutting Tool Engineering. Northfield, IL. 2014.
2. Emuge. Thread Cutting Technology. Clamping Technology. Toll Catalogue140. EMUGE – Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG Fabrik für Przisionswerkzeuge. 2010. 760 p.
3. Voelkener W. Einfache Berechnung der maximalen Uniformkraft beim geleiteten Anstanchen. Fertigungstechnik und Betr. 1971;21(5):308-309.
4. Pat. DE 3627798 A1 DBR, Int.Cl.4 B23G 5/20. Verfahren und Werkzeug zur Herstellung von Gewindebohrungen. Rolf Klenk GmbH & Co Kg (DBR).
5. Turchan M.C. Combined hole making and threading tool. Pat. 5413438 USA, Int.Cl.6 B23C 3/00; B23G 5/20. (USA).
6. Bergstrom B., Lindberg H., Sandvik A.B.(Sweden). Borr och gangverk tyg. Pat. 456408 Sweden, Int.Cl.4 B23G 5/20. (Sweden);
7. Dreval A.E., Bulakhov P.D., Litvinenko A.V. Razrabotka kombinirovannykh rezboobrazuyushchikh instrumentov. Novyye tekhnologii, oborudovanie, osnastka i instrumenty dlya mekhanicheskoy obrabotki i sborki; Mater. semin. "Znanie" RSFSR. Mosk. dom nauch.-tekhn. prop. M.; 1990. 153-156. [Dreval A.E., Bulakhov P.D., Litvinenko A.V. Development of combined threading tools. New technologies, equipment, tools and instruments for machining and assembly. Proceedings of the seminar of "Knowledge" of the RSFSR. Moscow House of Scientific and Technical Propaganda. Moscow; 1990. 153-156. (In Russ.)]
8. Guseynov R.V. Ob effektivnosti kombinirovannogo instrumenta pri lezviynoy obrabotke otverstiy v trudnoobrabatyvaemykh materialakh. Vestnik mashinostroyeniya. M.; 2001;9:54-56. [Guseynov R.V. On the efficiency of the combined tool in the case of holes' edge cutting machining in the difficult-to-machine material. Russian Engineering Research. Moscow; 2001;9:54-56. (In Russ.)]
9. Guseynov R.V. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov putem upravleniya dinamicheskimi parametrami sistemy. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni dokt. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg; 1998. [Guseynov R.V. Intensification of technological processing of the hardly processed materials by the manage-

ment of system's dynamic parameters. Published summary of PhD thesis. St. Petersburg; 1998. (In Russ.)]

10. Guseynov R.V., Rustamova M.R. Issledovanie protsessa obrabotki otverstiy na osnove nelineynoy dinamiki. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014;4:77-80. [Guseynov R.V., Rustamova M.R. Research of hole making process on the basis of nonlinear dynamics. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014;4:77-80. (In Russ.)]

11. Guseynov R.V., Guseynov R.V. Raschetnaya model dinamiki nelineynykh system. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;1(36):24-30. [Guseynov R.V., Guseynov R.V. Design model of nonlinear dynamics. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;1(36):24-30. (In Russ.)]

12. Guseynov R.V. Narezanie tochnykh rezb. Vestnik mashinostroeniya. M.; 2004;10:47-48. [Guseynov R.V. Cutting of exact screw threads. Russian Engineering Research. Moscow; 2004;10:47-48 (In Russ.)]

13. Guseynov R.V., Rustamova M.R. Instrumentalnoye obespechenie tekhnologii obrabotki rezb v zharoprochnykh i titanovykh splavakh. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013;28:57-62. [Instrumental support of screw threads' processing technology in heatproof and titanium alloys. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013;28:57-62. (In Russ.)]

14. Guseynov R.V., Rustamova M.R. Obosnovanie bazy dannykh dlya issledovaniya dinamicheskikh protsessov pri rezanii. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014;4:36-44. [Guseynov R.V., Rustamova M.R. Database substantiation for the research of dynamic processes at cutting. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014;4:36-44. (In Russ.)]

15. Guseynov R.V., Rustamova M.R. Tekhnologiya narezaniya vnutrennikh rezb pri naliichii radialnykh sil. Vestnik mashinostroyeniya. 2009;5:60-62. [Guseynov R.V., Rustamova M.R. Technology of internal screw thread cutting in the presence of radial forces. Russian Engineering Research. 2009;5:60-62. (In Russ.)].

16. Zharkov I.G. Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom. L.: Mashinostroyenie; 1986. 180 s. [Zharkov I.G. Vibrations while processing by edge tool. Leningrad: Mashinostroyenie; 1986. 180 p. (In Russ.)]

17. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh, vysokoprochnykh i titanovykh splavov. Kollektiv avtorov. M.: Mashinostroyenie; 1972. 200 s. [Cutting of heat proof, high-strength and titanic alloys. Group of authors. Moscow: Mashinostroyenie; 1972. 200 p. (In Russ.)]

18. Guseynov R.V., Zharkov I.G. Metchik. A.S. 1222443 B.I. №2, 1986.

19. Guseynov R.V. Korrigirovannyye metchiki. I.: Mashinostroitel; 1998:2. [Guseynov R.V. Corrected screw cutting tools. I.: Mashinostroitel; 1998:2. (In Russ.)]

20. Guseynov R.V. Metchik. A.S. 2229965. B.I. №5, 1999.

21. Guseynov R.V., Rustamova M.R. Metchik. Patent 2542217. B.I. №5.RF.2015.

Сведения об авторах.

Ахмедова Милена Расуловна – старший преподаватель.

Гусейнов Расул Вагидович – доктор технических наук, профессор кафедры технических комплексов и САПР.

Information about the authors.

Milena R. Akhmedova – Senior lecturer.

Rasul V. Guseynov – Dr. Sc. (Technical), Prof., Department of technical systems and CAD.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 07.09.2016.

Received 07.09.2016.

Принята в печать 19.11.2016.

Accepted for publication 19.11.2016.

Для цитирования: Ахмедпашаев М. У., Ахмедпашаев М. М., Бегов Ж.Б. Повышение ресурса работы винтов погружных насосов виброобкаткой их поверхностей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):17-24. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-17-24

For citation: Ahmedpashaev M. U., Ahmedpashaev M. M., Begov ZH. B. Increase in the working life of screws of immersion pumps by vibratory finishing of their surfaces. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):17-24. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-17-24

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ. МЕХАНИКА

УДК: 620.193.16.004.624

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-17-24

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ВИНТОВ ПОГРУЖНЫХ НАСОСОВ ВИБРООБКАТКОЙ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Ахмедпашаев М.У.¹, Ахмедпашаев М.М.², Бегов Ж.Б.³

¹⁻³Филиал Дагестанского государственного технического университета в г. Каспийске,

367015 г. Каспийск, ул. Алферова 3, Россия,

¹⁻²e-mail: ailahmedpashaev@mail.ru, ³e-mail: zhamidin2013@yandex.ru

Резюме. Цель. Исследовать возможности повышения ресурса работ винтов погружных насосов виброобкаткой их поверхностей. **Метод.** В основу метода виброобкатки положено два принципа: отказ от шлифования - использование тонкого пластического деформирования и усложнение кинематики по сравнению с известными процессами обкатывания роликами и шариками. **Результат.** Разработана принципиальная схема виброобкатывания; построены графики напряжений, возникающих в поверхностном слое стали 30ХГСА при точении и виброобкатывании; определена зависимость микротвердости от глубины распространения наклепа при обкатывании и виброобкатывании.

Установлено, что поскольку виброобкатывание является способом отделочно-упрочняющей обработки, кинематические и динамические характеристики этого процесса связаны, как и при других видах чистовой обработки, с показателями качества обрабатываемых поверхностей. Задача разработки методики определения режимов виброобработки усложнена, во-первых, тем, что число параметров, определяющих режим этого процесса, значительно больше, чем при обкатывании и других способах обработки с относительно простой кинематикой, во-вторых, тем, что все параметры режима в той или иной мере влияют на все характеристики качества поверхности. **Вывод.** При виброобкатывании поверхностей слой винта погружных насосов испытывает давление инструмента (шарика) и происходит упруго-пластическая деформация поверхностных слоев, распространяющаяся на некоторую глубину. Температура при виброобкатывании по обычным режимам не превышает 150-300^oC, причем она резко падает с увеличением глубины, и уже на глубине 0,1-0,3 мм от поверхности винта снижается до температуры окружающей среды.

Оптимизация микрорельефа трущихся поверхностей – наиболее эффективный способ улучшения их прирабатываемости, уменьшения прирабочного и нормального износа, улучшения их противозадирных свойств. Доказана эффективность и перспективность использования виброобкатывания практически во всех областях металлообрабатывающей промышленности.

Ключевые слова: виброобкатывание, инструмент, винт погружного насоса, нефтяная промышленность, материал, износ, параметры режимов

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

INCREASE IN THE WORKING LIFE OF SCREWS OF IMMERSION PUMPS BY
VIBRATORY FINISHING OF THEIR SURFACES

Magomedpasha U. Akhmedpashaev¹, Murad M. Akhmedpashaev², Zhamidin B. Begov³

¹⁻³ Branch of Dagestan State Technical University in Kaspiysk,

3 Alferov Str., Kaspiysk 367015, Russia,

¹⁻²e-mail: ailahmedpashaev@mail.ru, ³e-mail: zhamidin2013@yandex.ru

Abstract: Objectives. To investigate the increased performance possibilities of screws on submersible pumps by vibratory finishing of their surfaces. **Method.** The vibratory finishing method is based on two principles: rejection of light plastic deformation polishing as well as the complication of kinematics associated with known cold working processes. **Results.** A schematic diagram of vibratory finishing; the compiled graphs show pressure, occurring in the surface layer of steel 30KhGSA when lathe turning and vibratory finishing; the microhardness dependence on the work hardening distribution depth at rolling and vibratory finishing is determined. It is established that since vibratory finishing is a method of hardening, kinematic and dynamic characteristics of the process are connected, as in other types of finishing, with characteristic indicators of machined surfaces. The task of developing methods for determining the vibratory finishing regime is complicated, firstly by the number of parameters that determine the process conditions being considerably greater than tumbling and other processing methods with relatively simple kinematics; secondly, due to the fact that all the mode parameters affect all surface quality characteristics in one way or another. **Conclusion.** When vibratory finishing the surface layer of a screw submerged in a vibratory machine, using steel shots for burnishing, an extension of the surface layer's elastic-plastic deformation to a certain depth is achieved. The temperature at the time of vibratory finishing, according to conventional standards, does not exceed 150-300^oC; moreover, it decreases sharply with increasing depth and at room temperature is already at the depth of 0.1-0.3 mm from the surface of the screw. Microrelief optimisation of the bearing surfaces is the most effective way to improve conformability, reduce the run-in and normal wear and improve anti-seize properties. The efficiency and potential for the use of vibratory finishing in virtually all areas of the metal industry is proven.

Keywords: vibratory finishing, tools, screws for submersible pumps, oil industry, material wear, parameter regimes

Введение. В конструкциях погружных насосов, используемых для добычи нефти из скважин, которые самостоятельно не фонтанируют, рабочим элементом, создающим разрежение в рабочей зоне, является длинный (около 3-х метров) винт, работающий в трибосопряжении с резиновой обоймой [1,2,3,4]. К точности размеров и формы таких винтов конструкторы предъявляют высокие требования, что обусловлено необходимостью повышения показателей надежности работы насосов, и в частности, работоспособности винта в узле трения. При добыче нефти с больших глубин 1000-1200 м, когда температура окружающей среды достигает 200^oC, вместе с нефтью в насос попадают абразивные частицы (песчинки кварца), а также другие вредные для износостойкости поверхностей деталей вещества (парафин, сера, органические кислоты и др.). Повышенный и неравномерный абразивный износ рабочей поверхности стального винта является главным фактором, ограничивающим ресурс насоса [5,6,7,8,9].

Используемый в настоящее время на практике метод шлифования лепестковыми крупами не предназначен для размерной обработки фасонных деталей [10], поэтому от этого ме-

тогда нельзя ожидать заметного исправления отклонений фасонной геометрии рабочей поверхности, допущенных при точении винта, тем более повышения их ресурса работы. Выемка насоса из скважины с последующим его ремонтом является трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому становится очевидной актуальность решения проблемы повышения работоспособности насосов на этапе их изготовления.

Постановка задачи. Шлифование является трудоемкой операцией и не упрочняет поверхность винта погружных насосов. Для упрочнения и получения мелкозернистой структуры, повышающей прочность и твердость винта, в статье поставлена цель - повышение ресурса работы винта погружных насосов виброобработкой его поверхностей.

Методы исследования. В основу метода виброобработки положена два принципа: отказ от шлифования - использование тонкого пластического деформирования и усложнение кинематики по сравнению с известными процессами обкатывания роликами и шариками. Принципиальная схема виброобкатывания и параметры режима показаны на рисунке 1.

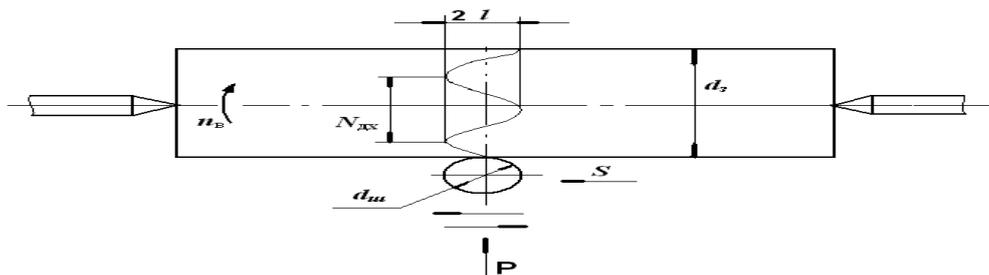


Рис. 1. Принципиальная схема и параметры режима виброобкатывания

Fig. 1. Circuit diagram and mode settings vibroabrasive

Как известно, силы, возникающие в процессе виброобкатывания, создают большие контактные давления на его рабочей поверхности, поэтому материал рабочей части инструмента должен обладать следующими основными свойствами [11,12]: большой твердостью; способностью сопротивляться стиранию; высоким пределом прочности на сжатие; низким коэффициентом трения (при трении в паре с металлом); большой теплопроводностью и теплоемкостью. Всем этим требованиям в наилучшей степени отвечает алмаз.

Помимо этого, указанными свойствами обладают: синтетический корунд, минералокерамика, твердые сплавы и легированные инструментальные стали. При обработке стали 30ХГСА винта погружных насосов в качестве шарика или ролика можно использовать любой из указанных выше материалов.

Поскольку виброобкатывание является способом отделочно-упрочняющей обработки, кинематические и динамические характеристики этого процесса связаны, как и при других видах чистовой обработки, с показателями качества обрабатываемых поверхностей.

Решение задачи разработки методики определения режимов виброобработки усложнено, во-первых, тем, что число параметров, определяющих режим этого процесса, значительно больше, чем при обкатывании и других способах обработки с относительно простой кинематикой, во-вторых, тем, что все параметры режима в той или иной мере влияют на все характеристики качества поверхности.

Параметры, определяющие режим виброобкатывания, следующие: n_B - частота вращения винта, в мин^{-1} ; S - подача шарика за один оборот заготовки погружного винта, в мм; $N_{дх}$ - число двойных ходов (циклов осцилляций), в мин; l - амплитуда осцилляции, в мм; d_3 - диаметр заготовки погружного винта; $d_{ш}$ - диаметр шарика инструмента; P - усилие вдавливания шарика.

В зависимости от сочетания параметров режима обработки (S ; n_B ; $N_{дх}$; P) при постоянных значениях остальных параметров можно получить один из следующих видов микрорельефа виброобкатанной поверхности (табл. 1). Кроме указанных видов микрорельефа, возможно их сочетание, например, микрорельефа IV вида с I, II или III видом.

Получению микрорельефа I, II и III вида обычно предшествует гладкое накатывание или выглаживание, при этом чистота поверхности увеличивается от I до IV класса, т.к. толь-

ко IV вид микрорельефа или его комбинация с другими видами приводит к созданию полностью нового микрорельефа.

Таблица 1. Виды микрорельефа виброобкатанной поверхности
Table 1. Types of surface microrelief vibracathedral

Вид микрорельефа	I	II	III	IV
	Отсутствие пересечение	Неполное пересечение	Полное пересечение	Слияние

Обсуждение результатов. При виброобкатывании поверхностей слой винта погружных насосов испытывает давление инструмента (шарика) и происходит упруго-пластическая деформация поверхностных слоев, распространяющаяся на некоторую глубину.

Температура при виброобкатывании по обычным режимам не превышает 150-300°C, причем она резко падает с увеличением глубины, и уже на глубине 0,1 - 0,3мм от поверхности винта снижается до температуры окружающей среды. Поэтому исключены структурные и фазовые изменения, обусловленные действием тепла в процессе обработки (прижоги, вторичная закалка и отпуск), что характерно для методов обработки резанием.

Пластическая деформация происходит путем сдвигов по плоскостям скольжения отдельных частей кристаллитов, раздроблением крупных кристаллов. При этом структура поверхностного слоя становится более мелкозернистой и получает ориентацию-текстуру, что для винтов погружных насосов является положительным эффектом, так как направлена перпендикулярно действию изгибающих сил.

При виброобкатывании в поверхностном слое металла создаются значительные сжимающие остаточные напряжения (рис. 2). Естественно, что в первую очередь, это относится к поверхностям с полностью новым микрорельефом. При создании системы канавок на поверхности винта также возникает напряжение, однако особенности его распределения по поверхности обусловлены тем, что упрочненные участки перемещаются с участками исходной поверхности.

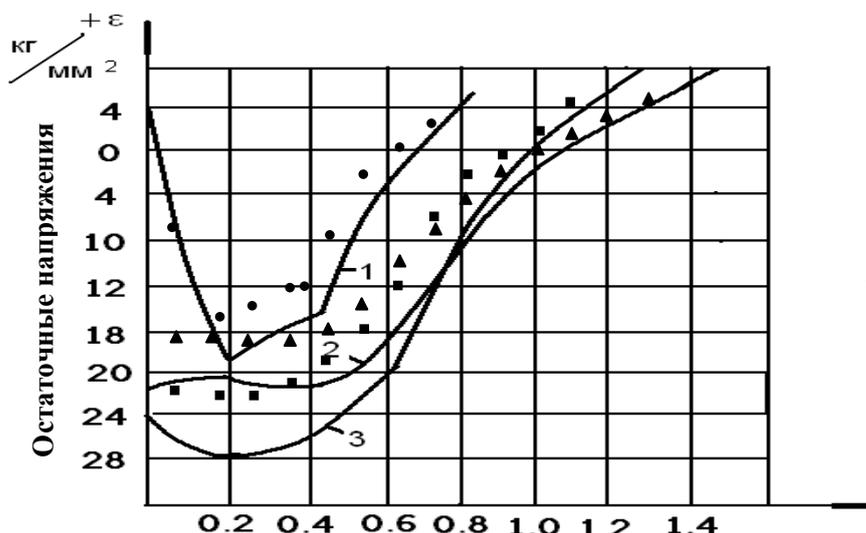


Рис. 2. Графики напряжений, возникающих в поверхностном слое стали 30ХГСА при точении (1), обкатывании (2) и виброобкатывании (3)

Fig. 2. Graphic of stresses arising in the surface layer of steel 30 KhGSA turning (1), rolling (2) and vibroabrasive (3)

Упрочнение поверхностного слоя при виброобкатывании связано с изменением тонкой кристаллической структуры металла при пластической деформации. Упрочнение металла объясняет современная теория дислокации.

Зависимость микротвердости от глубины распространения наклепа при обкатывании и виброобкатывании представлена на рис. 3. Видно, что глубина наклепанного слоя после виброобкатывания колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров и значительно возрастает с применением предварительного выглаживания поверхности или накатывания.

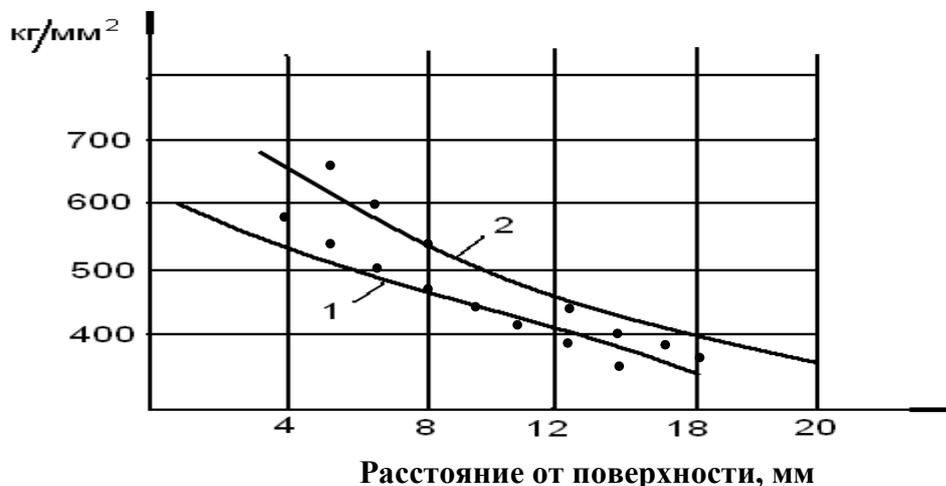


Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины распространения наклепа при обкатывании (1) и виброобкатывании (2)
Fig. 3. The dependence of microhardness on the depth distribution of shot peening during the orbital forging (1) and vibroabrasive (2)

Практика показывает эффективность и перспективность использования виброобкатывания практически во всех областях металлообрабатывающей промышленности [13 - 21]. В последующие годы проведены значительные исследования возможности применения виброобкатывания для обработки деталей двигателей внутреннего сгорания, срок службы которых лимитируется износом.

Вывод. На износостойкость винта погружного насоса влияет большое количество факторов, наиболее важными из которых являются количество и качество поверхностей трущихся деталей, в том числе абразивные природные нефтяные частицы.

Независимо от характера пар трения и условий их работы основными геометрическими характеристиками качества трущихся поверхностей, определяющими их прирабатываемость и износостойкость, являются: величина опорной поверхности, форма микронеровностей и их однородность. Эти характеристики обуславливают в первую очередь маслоемкость поверхностей при граничном трении и величину площади контакта при сухом трении. Нормирование конструктором лишь высоты микронеровностей является недостаточным.

Оптимизация микрорельефа трущихся поверхностей – наиболее эффективный способ улучшения их прирабатываемости, уменьшения прирабочного и нормального износа, улучшения их противозадирных свойств.

Виброобкатывание обладает наибольшими возможностями образования микрорельефа, близкого к оптимальному условию работы винта погружного насоса.

Библиографический список:

1. Progressive Cavity Pump [Электронный ресурс]. – Режим доступа: best-pump.com/progressive-cavity.
2. Погружные насосы для скважин: виды, характеристики, монтаж.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: energomir.net/vodoprovod
3. Screw Pump - Progressive Cavity Screw Pump Manufacturer from Nashik.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: positivemeteringpump.com/screw.

4. Industrial Pumps, Screw Pump Manufacturers, Dosing Pumps Suppliers.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: padmavatisalesandservices.com.
5. Костецкий Б.И. Фундаментальные закономерности трения и износа.- Киев: Знание, 1987.-30 с.
6. Костецкий В. И. Структурно – энергетические основы управления трением и износом в машинах: в помощь лектору и специалисту / подг. В.И. Костецким о-ву «Знание» УССР.– Киев: [Б.и], 1990. – 32 с.
7. Крагельский И. В. Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н.М. Михин.- М.: Машиностроение, 1984.- 280 с.
8. Сильман Г.И. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учебник / Г. И. Сильман, О. А. Горленко.- М.: Машиностроение, 2006.- 347с.
9. Крукович М. Г. Технологические методы повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Ч. 2 : повышение износостойкости деталей машин: учеб. пособие / М.Г. Крукович, А.Н. Минкевич, Э. Р. Тонэ - М. :[Б. и.], - 2002. - 150 с.
10. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / В.С.Комбалов; под. ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. - 296 с.
11. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов/Б.М. Базров.- М.: Машиностроение, 2005.-736 с.
12. Солоненко В.Г. Резание металлов и режущие инструменты/В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин: - М.: Высшая школа, 2007.-414 с.
13. Ахмедпашаев М.У. Усовершенствование технологии изготовления износостойких частей изделий машиностроения /М.У. Ахмедпашаев, А.У. Ахмедпашаев, М.М. Батдалов, М.М.Яхутлов//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2012.- № 26.- С. 73-77.
14. Ахмедпашаев А.У. Исследование влияния легирующих элементов на структуру экспериментальных образцов после поверхностного упрочнения/М.У. Ахмедпашаев, Ж.Б. Бегов, Б.М. Мусайбов//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2014.- Т.34.-№ 3.- С. 20-27.
15. 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.-S.2–13.
16. 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.
17. Begelinger A. Reibung Verschleip und Betriebsrauhigkeit bei verschie denen Lagerwerkstoffen /A. Begelinger // Ind Anz. 1981. V. 103, № 24. pp. 64-67.
18. Материаловедение и металлургия. Перспективы технологии и оборудования: материалы русско-японский семинара (МИС и С – ULVAC inc, 25 марта 2003 г.) / под ред. Л.В. Кожитова.– М.: МГИУ, 2003.– 373 с.
19. Современные технологии и материаловедение/под ред. Ю. А. Баландина: сб. тр. Магнитогорск. гос.техн. ун-т им. Г. И. Носова.- Магнитогорск: МГТУ, 2003. - 305 с.
20. АЮНТЕС Cylinder Skiving and Roller Burnishing Machine.- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: tubethe.com/watch/IMxaXCFvzQI.
21. Roller Burnishing. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: mol-lart.com/tooling/roller.

References:

1. Progressive Cavity Pump. Available from: best-pump.com/progressive-cavity
2. Pogruznyye nasosy dlya skvazhin: vidy, kharakteristiki, montazh. [Submersible pumps for wells: types, characteristics, mounting (In Russ.)]. Available from: energo-mir.net/vodprovod

3. Screw Pump – Progressive Cavity Screw Pump Manufacturer from Nashik. Available from: positivemeteringpump.com/screw
4. Industrial Pumps, Screw Pump Manufacturers, Dosing Pumps Suppliers. Available from: padmavatisalesandservices.com
5. Kostetskiy B.I. Fundamentalnyye zakonomernosti treniya i iznosa. Kiev: Znanie; 1987. 30 s. [Kostetskiy B.I. Fundamental regularities of friction and wear. Kiev: Znanie; 1987. 30 p. (In Russ.)]
6. Kostetskiy V.I. Strukturno-energeticheskie osnovy upravleniya treniem i iznosom v mashinakh: v pomoshch lektoru i spetsialistu. Podg. V.I. Kostetskim o-vu "Znanie" USSR. Kiev: [B.i]; 1990. 32 s. [Kostetskiy V.I. Structural and power result-based management of friction and wear in vehicles: in aid of lecturer and expert. Prepared by V.I. Kostetskiy to the Society of "Znanie" USSR. Kiev; 1990. 32 p. (In Russ.)]
7. Kragelskiy I.V., Mikhin, N.M. Uzly treniya mashin. M.: Mashinostroyeniye; 1984. 280 s. [Kragelskiy I.V., Mikhin, N.M. Friction units of vehicles. Moscow: Mashinostroyeniye; 1984. 280 p. (In Russ.)]
8. Silman G.I., Gorlenko O.A. Tribotekhnicheskoye materialovedenie i tribotekhnologiya: uchebnik. M.: Mashinostroyeniye; 2006. 347 s. [Silman G.I., Gorlenko O.A. Tribotechnical materials science and tribotechnology: textbook. Moscow: Mashinostroyeniye; 2006. 347 p. (In Russ.)]
9. Krukovich M.G., Minkevich, A.N., Tone E.R. Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostoykosti i vosstanovleniya detaley mashin. Ch. 2: povyshenie iznosostoykosti detaley mashin: ucheb. posobie. M.: [B. i.]; 2002. 150 s. [Krukovich M.G., Minkevich, A.N., Tone E.R. Technological methods of wear resistance increase and repair of machine components. Pt. 2: wear resistance increase of machine components: study guide. Moscow; 2002. 150 p. (In Russ.)]
10. Kombalov V.S. Metody i sredstva ispytaniy na trenie i iznos konstruktsionnykh i smazochnykh materialov: spravochnik. Pod red. K.V. Frolova, E.A. Marchenko. M.: Mashinostroyeniye; 2008. 296 s. [Kombalov V.S. Methods and techniques for friction and wear test of constructional material and lubricants: reference book. In: K.V. Frolov, E.A. Marchenko (Eds). Moscow: Mashinostroyeniye; 2008. 296 p. (In Russ.)]
11. Bazrov, B.M. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov. M.: Mashinostroyeniye; 2005. 736 s. [Bazrov, B.M. Fundamentals of manufacturing engineering: textbook for higher institutions. Moscow: Mashinostroyeniye; 2005. 736 p. (In Russ.)]
12. Solonenko V.G., Ryzhkin A.A. Rezanie metallov i rezhushchie instrumenty. M.: Vysshaya shkola; 2007. 414 s. [Solonenko V.G., Ryzhkin A.A. Metalcutting and cutting tools. Moscow: Vysshaya shkola; 2007. 414 p. (In Russ.)]
13. Akhmedpashaev M.U., Akhmedpashaev A.U., Batdalov M.M., Yakhutlov M.M. Uovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya iznosostoykikh chastey izdeliy mashinostroeniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2012; 26; 73-77. [Akhmedpashaev M.U., Akhmedpashaev A.U., Batdalov M.M., Yakhutlov M.M. Improvement of manufacturing technology of engineering products' wearproof parts. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2012;26;73-77. (In Russ.)]
14. Akhmedpashaev A.U., Begov Zh.B., Musaibov B.M. Issledovanie vliyaniya legiruyushchikh elementov na strukturu eksperimentalnykh obraztsov posle poverkhnostnogo uprochneniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki 2014;34(3):20-27. [Akhmedpashaev A.U., Begov Zh.B., Musaibov B.M. The research of the influence of alloying elements on the structure of experimental samples after superficial hardening. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014; 34(3):20-27. (In Russ.)]

15. Belen P., Kumar K.C.H., Wolman P. Thermodynamic assessment of the Ni - Ti phase diagram. *Z. Metallkde.* 1996; 87(1):2–13.
16. Ivanovskiy V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. i dr. *Skvazhinnyye nasosnyye ustanovki dlya dobychi nefi.* M.: GUP Izd-vo “Neft i gaz” RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina; 2002. 824 s. [Ivanovskiy V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. et al. Oil-well pumping units for the oil extraction. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ.; 2002. 824 p. (In Russ.)].
17. Begelinger A. Reibung Verschleip und Betriebsrauhigkeit bei verschie denen Lagerwerkstoffen. *Ind Anz.* 1981;103(4):64-67.
18. Materialovedenie i metallurgiya. Perspektivy tekhnologii i oborudovaniya: materialy russko-yaponskiy seminara (MIS i S – ULVAC inc, 25 marta 2003 g.). Pod red. L.V. Kozhitova. M.: MGIU; 2003. 373 s. [Kozhitov L.V. (Ed.). Materials science and metallurgy. Prospects of technology and equipment: proceedings of Russian-Japanese seminar (MIS and S – ULVAC inc, on March 25, 2003). Moscow: MSIU; 2003. 373 p. (In Russ.)]
19. Sovremennyye tekhnologii i materialovedenie. Pod red. Yu. A. Balandina: sb. tr. Magnitogorsk. gos. tekhn. un-t im. G. I. Nosova. Magnitogorsk: MGTU; 2003. 305 s. [Yu. A. Balandin (Ed.). Modern technologies and materials science. Collected papers of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk: MSTU; 2003. 305 p. (In Russ.)].
20. AIOHTEC Cylinder Skiving and Roller Burnishing Machine. Available from: tube-the.com/watch/IMxaXCFvzQI
21. Roller Burnishing. Available from: mol-lart.com/tooling/roller

Сведения об авторах.

Ахмедпашаев Магомедпаша Узайруевич – доктор технических наук, доцент заведующий кафедрой основ конструирования машин и материаловедения.

Ахмедпашаев Мурад Магомедпашаевич – инженер

Бегов Жамидин Баламирзаевич – старший преподаватель кафедры основ конструирования машин и материаловедения.

Information about the authors.

Magomedpasha U. Akhmedpashaev – Dr. Sc.(Technical), Assoc.Prof., Department of bases of constructing of machines and materials.

Murad M. Akhmedpashaev – Engineer.

Zhamidin B. Begov– Senior lecturer, Department of basic design and materials science.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 12.10.2016.

Принята в печать 20.12.2016.

Conflict of interest

Received 12.10.2016.

Accepted for publication 20.12.2016.

Для цитирования: Баранов А.Ю., Осина А.А., Синькова В.А. Энергетические и конструктивные условия эффективности аппаратов для общего криотерапевтического воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):25-33. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-25-33

For citation: Baranov A. Yu., Osina A.A., Sinkova V.A. Energy and construction conditions of the effectiveness of apparatus for general cryotherapeutic impact. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):25-33. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-25-33

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.593

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-25-33

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЩЕГО КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Баранов А.Ю.¹, Осина А.А.³, Синькова В.А.².

¹⁻³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49,
¹⁻³e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru

Резюме: Цель. Оценить соответствие конструкции и энерговооруженности криотерапевтических комплексов (КТК) технологическим условиям эффективности общего криотерапевтического воздействия (ОКВ). **Метод.** Использована методика анализа соответствия конструкции и энерговооруженности криотерапевтических комплексов (КТК) технологическим условиям эффективности общего криотерапевтического воздействия (ОКВ). **Результат.** Высказано предположение, что причиной расхождения наблюдений разных исследователей являются различия в конструкции и энерговооруженности КТК. Приведены технические характеристики действующих одноместных и многоместных КТК, проиллюстрированы существенные различия этих характеристик у аппаратов одинакового технологического назначения. Предложена система унифицированных удельных характеристик КТК. Вычисление удельных характеристик действующих комплексов показало, что между объектами одинакового назначения существуют качественные различия, которые могут быть причиной расхождений в их лечебной эффективности. Все действующие КТК имеют дефицит холодопроизводительности системы криостатирования от 8 до 75%. У многоместных КТК дефицит холодопроизводительности превышает 50 %, что исключает возможность получения существенного лечебного эффекта. Это подтверждается результатами независимых исследований, которые показывают, что процедуры в многоместных КТК обеспечивают переохлаждение кожи только до 14°С, в то время как для эффективного ОКВ необходимо переохладить поверхность кожи до температуры менее 2°С. До проведения исследований в области эффективности ОКВ необходимо оценить соответствие криотерапевтического оборудования требованиям по энерговооруженности. **Вывод.** Для успешного применения ОКВ в медицине и спорте необходимо повысить энерговооруженность и оптимизировать температурный режим криотерапевтических установок. Криотерапевтический комплекс должен обеспечить такие физические условия, чтобы поверхность тела переохлаждалась до температуры менее 2°С. Холодопроизводительность системы криостатирования кабины пациента должна обеспечивать отвод теплоты с поверхности кожи пациента с интенсивностью не ниже 3,35 кВт/м². Для интенсивного отвода теплоты с поверхности тела пациента температура охлаждающего газа не должна превышать уровень -130°С.

Ключевые слова: общее криотерапевтическое воздействие, криотерапевтический комплекс, энерговооруженность, холодопроизводительность, переохлаждение поверхности кожи

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY AND CONSTRUCTION CONDITIONS OF THE EFFECTIVENESS
OF APPAATUS FOR GENERAL CRYOTHERAPEUTIC IMPACT

Alexander U. Baranov¹, Anastasia A. Osina², Valentina A. Sinkova³

*¹⁻³St. Petersburg National Research University
of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO),
49 Kronverkskiy Ave., St. Petersburg 197101, Russia
e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru*

Abstract: Objectives. To evaluate the correspondence of construction and power consumption of Cryotherapeutic Complexes (CTC) with technological conditions of effectiveness of the General Cryotherapeutic Impact (GCI). **Methods.** The associated analysis method used Cryotherapeutic Complexes (CTC) construction and power consumption with technological conditions of effectiveness of the General Cryotherapeutic Impact (GCI). **Results.** An explanation for the discrepancy of observations of different researchers in differences in design and available power of the CTC is proposed. The technical operating characteristics of single-seat and multi-seat CTC are provided and these significant differences in apparatus of identical technological designation are illustrated. The proposed system of specific CTC characteristics is capable of unifying their basic structural and energy characteristics. Calculation of the specific characteristics of existing systems showed that between objects of the same designation, there are differences in value, which may be the cause of discrepancies in their therapeutic efficacy. All functional CPC have a cryostatting cooling capacity system deficit of between 8 and 75%. In multi-seat CPC cooling capacity deficit exceeds 50%, which excludes the possibility of obtaining a significant therapeutic effect, as is confirmed by the results of independent studies that show that the procedures in multi-seat CTC safeguards skin from frigorism only up to 14°C, while at the same time for effective OKV frigorism of the skin surface is necessary to a temperature of less than about 2°C. Prior to research on the effectiveness of OKV, it is necessary to assess the energy consumption conformity of cryotherapy equipment. **Conclusion.** For the successful implementation of OKV in medicine and sport, it is necessary to increase energy efficiency and optimise cryotherapeutic temperature control settings. A cryotherapeutic complex should safeguard such physical conditions in such a way that the body surface is frigerised to a temperature of less than about 2°C. The cryostatting patient cabin system cooling capacity should provide heat removal from the surface of the patient's skin with an intensity of no lower than 3.35 kW / m². For intensive heat removal from the patient's body surface the cooling gas temperature must not exceed -130°C.

Keywords: General cryotherapeutic impact, cryotherapeutic complex, power consumption, cooling capacity, frigorism of skin surface

Введение. Общая криогенная терапия (ОК) - эффективный метод немедикаментозного лечения ряда тяжелых заболеваний. ОК представляет собой физиотерапевтическую технологию, используемую для достижения лечебного эффекта охлаждения поверхности кожного покрова тела человека криогенным газом [1,2]. Целью криогенного воздействия является стимуляция холодовых рецепторов кожи, которая обеспечивает ряд позитивных сдвигов в деятельности важнейших систем организма. Общее криотерапевтическое воздействие (ОКВ) относится к неспецифическим лечебным процедурам, так как не оказывает на организм пациента направленного действия, а только оптимизирует деятельность иммунной, эндокринной, нервной и кровеносной системы. Наиболее востребованным эффектом ОКВ является длительное подавление болевых ощущений любого происхождения в течение 6-8 часов [2]. ОКВ реализуется в теплоизолированных кабинах, рассчитанных на размещение от 1 до 6 пациентов. Для поддержания криогенного уровня температуры теплоизолированная кабина (кабина пациента) снабжена системой охлаждения. Кабина и система охлаждения образуют устройство для проведения сеансов ОКВ или криотерапевтический комплекс (КТК) [1-8].

Криотерапевтические комплексы производятся с 80-х годов XX века и различаются по вместимости на одноместные и многоместные, а по принципу действия системы охлаждения - на азотные и компрессионные [7]. Азотные КТК поддерживают криогенную температуру в кабине пациента за счет теплоты парообразования жидкого азота. КТК использовались для реализации технологии ОКВ с момента изобретения этого физиотерапевтического метода. Первоначально использовались многоместные КТК с азотным охлаждением, в начале XX века широкое распространение получили одноместные кабины этого типа [2].

Многоместные КТК с компрессионным охлаждением были разработаны в Западной Европе в качестве альтернативы аппаратам с азотным охлаждением. Устройства этой группы используют для охлаждения кабины пациента паровые циклы [1]. Выбор способа охлаждения оказывает определяющее влияние на уровень температуры в кабине пациента. Криотерапевтические комплексы с азотным охлаждением способны поддерживать уровень температур до -180°C [8]. Рабочая температура в КТК с компрессионным охлаждением составляет не ниже -110°C [1,8].

Постановка задачи. В последние годы технологию ОКВ активно применяют для решения не только лечебных задач, но и для обслуживания спортсменов высшего уровня во время крупных соревнований и тренировок. Разработаны мобильные КТК, которые сопровождают сборные команды спортсменов на выездных соревнованиях. Спортивная практика ОКВ стала причиной многочисленных исследований, связанных с оценкой эффективности этого метода [1,3,4,5,6,7]. Результаты наблюдений разных авторов противоречивы и не позволяют составить однозначное мнение о целесообразности спортивного применения КТК. Необходимо определить причины противоречий в результатах наблюдений разных исследователей.

Методы исследования. Проведенный анализ литературных источников показал, что авторы рассматривают сеансы ОКВ как некую унифицированную методику, которая во всех случаях должна обеспечивать ожидаемые результаты. Только в отдельных случаях указывается уровень рабочей температуры в кабине пациента. При этом конструкция и энергооборуженность КТК не рассматриваются.

На наш взгляд, это является существенным упущением исследователей, так как выбор схемы проведения ОКВ оказывает определяющее влияние на достигаемые позитивные результаты. Выбор вместимости кабины пациента определяет схему проведения сеансов ОКВ. В многоместных и одноместных КТК температура газа, охлаждающего поверхность тела пациента, меняется по разным законам. В одноместных кабинах пациент погружается в газовую среду с номинальной температурой за 20-40 с. В многоместных комплексах температура охлаждающего газа снижается ступенчато и достигает номинального уровня только через 90 с [2]. Различия в графике изменения температуры охлаждающего газа связаны с особенностями конструкции кабин пациента разной вместимости. Многоместная кабина пациента отделена от окружающей среды одной или двумя шлюзовыми камерами. При перемещении из окружающей среды в зону ОКВ и обратно, пациент проходит низкотемпературные камеры с температурой -10 и -60°C . Из-за этого минимальный уровень температуры охлаждающего газа достигается только через 100 с. В одноместном криотерапевтическом комплексе пациент входит в кабину, заполненную атмосферным воздухом, которая во время сеанса ОКВ за 20-40 с заполняется криогенным газом (теплоносителем) с заданной температурой [2].

Номинальная температура основной процедурной кабины многоместного КТК составляет не менее -110°C , в одноместных КТК температура поддерживается температура не выше -130°C . Общее время пребывания пациента в многоместном КТК на 30 с больше [8,11]. Различия в конструкции комплексов отразились на значениях их технических характеристик (табл. 1). Например, значительно отличаются значения внутреннего объема кабины пациента. Значительное влияние на работу многоместных КТК оказывает наличие промежуточной кабины (шлюза), который защищает кабину пациента от прямого контакта с окружающей средой. Размеры шлюза аналогичны размерам кабины пациента, что существенно увеличивает размеры КТК и тепловую нагрузку на систему охлаждения [8,12,13].

Таблица 1. Технические характеристики исполнительных устройств действующих криотерапевтических комплексов
Table 1. Specifications of actuators operating cryotherapeutic systems

Параметры	Ед. изм.	Наименование КТК					
		КРИОН	Криомед-20/150	ICEQUEEN	Криослейскабин	Zimmer	KR-2005 N
Номер КТК		1	2	3	4	5	6
Параметры кабины пациента							
Вместимость КТК	чел	1	1	1	5	5	6
Температура	оС	-130	-120	-120	-110	-110	-120
Объем	м ³	0,5	1,0	1,0	8,4	8,8	15,6
Площадь поперечного сечения	м ²	0,4	0,65	0,65	4,0	4,0	6,25
Площадь теплового ограждения	м ²	3,2	6,2	6,2	24,8	25,6	37,5
Мощность системы охлаждения	кВт	-	-	-	20	25	-
Затраты жидкого азота	кг/мин	1,5	1,0	1,0	-	-	2,0

По данным производителей криотерапевтических систем (табл.1) оценить адекватность условий реализации технологии ОКВ достаточно трудно. Температура в кабине пациента различается незначительно. Зато размеры кабины пациента несопоставимы. Для размещения одного пациента в КТК «КРИОН» используется кабина объемом 0,5 м³, а в криотерапевтическом комплексе «KR-2005 N» кабина вместимостью 6 пациентов имеет объем 15,6 м³, т.е. в 30 раз больше. При этом расход жидкого азота в системах охлаждения этих КТК близок по значению [8,13].

Для предварительного анализа эффективности криотерапевтических аппаратов удобно использовать их удельные технические характеристики, т.е. параметры, отнесенные к единице объема кабины пациента. Работоспособность кабины пациента зависит от мощности теплового потока, который отводится из единицы ее объема. Исследования в области технологии ОКВ показали, что для достижения криотерапевтического эффекта необходимо за $\tau = 180$ с отвести от единицы поверхности тела пациента не менее 600 кДж теплоты [14]. При этом средняя за один цикл ОКВ интенсивность отвода теплоты составит:

$$q_s = Q_s / \tau \approx 3,3 \text{ кВт/м}^2 \quad (1)$$

Следует отметить, что величина удельного отвода теплоты от тела пациента не зависит от выбора конструкции КТК. Если достаточный отвод теплоты не будет обеспечен, температура поверхности кожи в зоне залегания холодовых рецепторов не достигнет уровня, обеспечивающего интенсивную стимуляцию системы терморегуляции, поэтому не удастся получить позитивный результат ОКВ [9-11].

Считается, что интенсивное раздражение холодовых рецепторов обеспечивается только в том случае, когда температура поверхности кожи к концу сеанса криотерапии удовлетворяет условию:

$$-2 < t_s < 2^\circ \text{C}. \quad (2)$$

По мере приближения температуры поверхности кожи к минимально допустимому значению, интенсивность сигналов холодовых рецепторов возрастает гиперболически [2]:

$$I_s = \frac{20}{[t_s - (t_{min} - 0,5)]^2} \quad (3)$$

Поток теплоты с поверхности тела пациента q_s является основным компонентом тепловой нагрузки на систему охлаждения. Кроме этого, система охлаждения отводит поток

теплоты от внутренней поверхности кабины пациента q_{in} . Важнейшими удельными характеристиками КТК являются площади поверхности пациента и тепловой изоляции:

$$f_s = \frac{F_s \cdot n}{V_c} \quad \text{и} \quad f_{in} = \frac{F_{in}}{V_c}, \quad (4)$$

где, V_c - объем кабины пациента, n - вместимость кабины пациента, F_s - площадь поверхности тепла пациента, $F_s=1,5 \text{ м}^2$, F_{in} - площадь поверхности тепловой изоляции кабины пациента.

Вход и выход пациента в кабину сопровождаются потерями криогенного газа в окружающую среду. В одноместных кабинах при выходе пациента теряется весь криогенный теплоноситель из объема кабины пациента. В многоместных кабинах потери теплоносителя ограничиваются за счет наличия шлюзовых камер.

Для оценки величины потерь теплоносителя целесообразно ввести в рассмотрение величину удельного свободного пространства процедурной кабины:

$$\varepsilon = \frac{V_c - V_s \cdot n}{V_c}, \quad (5)$$

где, V_s - средний объем тела пациента, $V_s \approx 0,08 \text{ м}^3$.

Не менее важно описать эффективность системы охлаждения КТК. Для КТК, использующих жидкий азот, энерговооруженность системы характеризуется величиной удельного расхода криоагента:

$$g_{NV} = \frac{g_N}{V_c}, \quad (6)$$

где, g_n - расход криоагента за единицу времени (табл.1).

Для комплексов с компрессионным охлаждением энерговооруженность характеризуется приведенной мощностью системы криостатирования:

$$N_V = \frac{N}{V_c}, \quad (7)$$

где, N - мощность привода системы охлаждения (табл.1).

Для сравнения энерговооруженности систем криостатирования азотного и компрессионного типа можно ввести в рассмотрение понятие удельной холодопроизводительности системы охлаждения. Для устройств компрессионного типа удельная холодопроизводительность рассчитывается с учетом значения холодильного коэффициента, который для диапазона температур от -130 до -110 °С, составляет от 0,25 до 0,35 [8].

Удельная холодопроизводительность компрессионной системы охлаждения составит:

$$\kappa = \eta N_V = \eta \frac{N}{V_c} \quad (8)$$

В случае использования жидкого азота удельная холодопроизводительность системы криостатирования процедурной кабины рассчитывается с учетом теплоотводящей способности жидкого азота на уровне рабочей температуры кабины пациента:

$$q_N = r'' + c_p(T_c - T'') \quad (9)$$

где r'' - теплота парообразования жидкого азота, $r''=199 \text{ кДж/кг}$, T_c - температура в кабине пациента (табл.1), T'' -температура кипения жидкого азота, c_p - теплоемкость паров азота в диапазоне температур от T'' до T_c .

Удельная холодопроизводительность системы криостатирования использующей жидкий азот составит:

$$\kappa = q_N g_{NV} = g_{NV} [r'' + c_p(T_c - T'')]. \quad (10)$$

Расчет удельных технических характеристик действующих КТК позволит получить данные, пригодные для сопоставительного анализа их эксплуатационных характеристик.

Обсуждение результатов. Приведенные в табл. 2 расчетные значения удельных характеристик действующих криотерапевтических систем иллюстрируют существенные различия между двумя группами криотерапевтического оборудования.

Таблица 2. Удельные характеристики действующих криотерапевтических комплексов
Table 2. Specific characteristics of acting cryotherapy complexes

Параметры	Ед. изм.	Номер КТК					
		1	2	3	4	5	6
Вместимость	чел/м ³	2,00	1,00	1,00	0,60	0,57	0,38
Площадь ограждения кабины	м ² /м ³	6,4	4,7	4,7	3,0	2,91	2,4
Площадь поверхности тела пациента	м ² /м ³	3,20	1,60	1,60	0,96	0,91	0,61
Свободное пространство	м ³ /м ³	0,84	0,92	0,92	0,95	0,96	0,97
Расход криоагента	кг/(м ³ ·мин)	3,00	1,00	1,00	-	-	0,13
Мощность системы охлаждения	кВт/м ³	-	-	-	2,38	2,84	-
Холодопроизводительность	кВт/м ³	13,05	4,52	4,52	0,83	0,99	0,59
Тепловыделение от пациента	кВт/м ³	10,66	3,33	3,33	2,00	1,90	1,27

Существенные различия одноместных и многоместных КТК выявлены в показателях компактности размещения пациента в кабине. В единице объема кабины КТК размещается до 2 пациентов, которые создают удельную тепловыделяющую поверхность площадью от 0,61 до 3,2 м²/м³. Низкая компактность размещения пациентов является неотъемлемым признаком конструкции многоместных КТК. Для того, чтобы пациенты могли переходить из одной низкотемпературной камеры комплекса в другую, необходимо достаточно большое свободное пространство, доля которого в многоместных криотерапевтических комплексах достигает 97%.

Большая величина удельного свободного пространства камеры пациента снижает энергоэффективность КТК, так как при входе (выходе) пациентов часть криогенного теплоносителя сбрасывается в смежный объем, например, в шлюзовую камеру, и замещается более теплым газом. На восстановление температуры газа в большом объеме затрачивается дополнительная энергия, возрастает суммарная тепловая нагрузка на систему криостатирования. Конструкция и принцип действия одноместных КТК позволяют снизить негативное влияние потерь теплоносителя в окружающую среду [15]. Это достигается за счет увеличения компактности размещения пациента в процедурной кабине, доля свободного пространства кабины сокращается до 84%. Учитывая то, что технология ОКВ основана на отводе с поверхности тела пациента определенного количества теплоты за ограниченное время, по удельным показателям энерговооруженности КТК можно оценить их способность обеспечить охлаждение поверхности тела пациента. Для этого достаточно сравнить удельную холодопроизводительность КТК с удельными тепловыделениями с поверхности тела пациента, которые определяются как произведение величины удельной теплопередающей поверхности тела пациента на среднюю интенсивность теплового потока:

$$q_{sv} = f_s \cdot q_s. \quad (11)$$

Из-за различий в компактности размещения пациента значения удельных тепловыделений варьируются от 1,27 до 10,66 кВт/м³. При этом только у одноместных КТК (№1, 2, 3) удельная холодопроизводительность системы криостатирования превышает удельное тепловыделение. У КТК № 4, 5, 6 дефицит холодопроизводительности составляет более 50%.

Следует отметить, что холодопроизводительность системы охлаждения затрачивается не только на покрытие тепловыделений от поверхности тела пациента. Теплота проникает в кабину пациента через теплоизоляцию и с потоками теплого газа при входе (выходе) пациентов. Показано, что доля холодопроизводительности, затрачиваемой на отвод теплоты от пациентов, в многоместных КТК не превышает 50% [13]. С учетом этой информации дефицит холодопроизводительности системы криостатирования КТК № 4, 5, 6 может достигать 75%, т.е. эти устройства не способны выполнять технологию ОКВ.

У одноместных КТК удельная холодопроизводительность системы охлаждения больше удельного отвода теплоты с поверхности тела пациента. Однако надо учитывать, что при доле свободного пространства 92 % доля полезной тепловой нагрузки на систему криостатирования одноместной кабины пациента составляет не более 50%, т.е. комплексы №2, 3 также имеют дефицит холодопроизводительности около 32%.

При таких показателях возможность выполнения эффективного криотерапевтического воздействия вызывает большие сомнения. Только у КТК №1 при удельном свободном пространстве кабины пациента 84%, доля полезной тепловой нагрузки на систему криостатирования возрастает до 75%. Расчетный дефицит холодопроизводительности системы криостатирования для КТК №1 составляет 8%.

Выполненный анализ энерговооруженности действующих криотерапевтических комплексов показывает, что в большинстве случаев система криостатирования кабины пациентов не обладает достаточной холодопроизводительностью. КТК не могут обеспечить переохлаждение поверхности кожи, достаточное для получения существенного криотерапевтического эффекта. Недостаточное переохлаждение поверхности кожи в многоместных КТК подтверждено физическими измерениями [1, 2].

Температура кожного покрова после процедуры ОКВ в многоместных криотерапевтических комплексах составляет от 12 до 18°C [2]. В отдельных случаях температура кожи понижается до уровня 4°C, но и этого недостаточно для интенсивной стимуляции холодовых рецепторов кожи [1]. Недостаточная мощность системы охлаждения, относительно высокая температура газа в основной кабине (-110°C) и сложный способ проведения ОКВ в многоместных кабинах снижают позитивные результаты криогенных процедур. Одноместные КТК с высокой компактностью размещения пациента в кабине ОКВ почти полностью выполняют требования по энерговооруженности, обеспечивают переохлаждение поверхности кожного покрова до уровня менее 2°C, обеспечивают оптимальный график изменения температуры охлаждающего газа. Лечебные эффекты, достигаемые при использовании одноместных КТК существенно выше, и это объясняет противоречия в данных, полученных разными авторами при использовании различных типов установок для общей криотерапии.

Вывод. Для успешного применения ОКВ в медицине и спорте необходимо повысить энерговооруженность и оптимизировать температурный режим криотерапевтических установок. Криотерапевтический комплекс должен обеспечить физические условия для того, чтобы поверхность тела переохлаждалась до температур менее 2°C.

Холодопроизводительность системы криостатирования кабины пациента должна обеспечивать отвод теплоты с поверхности кожи пациента с интенсивностью не ниже 3,35 кВт/м². Для интенсивного отвода теплоты с поверхности тела пациента температура охлаждающего газа не должна превышать уровень -130 °C.

Библиографический список:

1. Miroslav Savic, Borut Fonda, Nejc Sarabon, Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin//Journal of Thermal Biology 38 (2013), 186–191.
2. Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Экспериментальная проверка результатов измерения температуры поверхности кожного покрова пациента до и после общего криотерапевтического воздействия//Лечебная физкультура и спортивная медицина №4 (136) 2016, С. 40-46.
3. Amilton Vieira, Martim Bottaro, Joao B. Ferreira-Junior, Carlos Vieira, Vitor A. Cleto, Eduardo L. Cadore, Herbert G. Simões, Jake Do. Carmo, and Lee E Brown, Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout?// Open Access J Sports Med. 2015. P. 49–54.
4. Costello JT, Donnelly AE, Karki A, Selfe J. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. Int J Sports Med. 2014. P. 35–40.

5. Hausswirth C., Schaal K., Le Meur Y., Bieuzen F., Filliard J-R., Volondat M., Louis J. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation// PLoS One. 2013 Aug 22;8(8):e72658.
6. Chris M. Bleakley, François Bieuzen, Gareth W. Davison and Joseph T. Costello, Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives, Open Access J Sports Med. 2014. P. 25–36.
7. Cholewka A., Stanek A., Sieroń A., Drzazga Z. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *SkinResTechnol*. 2012. pp.180–187.
8. Баранов А.Ю., Баранов В.А., Малышева Т.А. Энергетические основы эффективности криотерапевтической аппаратуры//Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2005. №2, с. 29-31.
9. Miller E., Mrowicka M., Malinowska K., Mrowicki J., Saluk-Juszczak J. et al. (2011) Effects of whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of antioxidative enzymes in blood of depressive multiple sclerosis patients. *World J Biol Psychiatry* 12: 223-227.
10. Pournot H., Bieuzen F., Louis J., Mounier R., Fillard J.R. et al. (2011) Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLOS ONE* 6: e22748. doi:10.1371/journal.pone.0022748. PubMed: 21829501.
11. Lubkowska A., Szyguła Z. (2010) Changes in blood pressure with compensatory heart rate decrease and in the level of aerobic capacity in response to repeated whole-body cryostimulation in normotensive, young and physically active men. *Int J Occup Med Environ Health* 23: 367-375. PubMed: 21306982.
12. Маханёк А.А., Левин М.Л., Драгун В.Л. Теплофизические аспекты общей газовой криотерапии // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2011. № 3. С. 59–71.
13. Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Савельева А.В., Сидорова А.Ю. Выбор схемы общего криотерапевтического воздействия//Вестник Международной Академии Холода. 2012. Вып. 4, с. 40-44.
14. Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Савельева А.В., Сидорова А.Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия//Вестник Международной Академии Холода. 2012. Вып. 2, с.35-40.
15. Westerlund T., Oksa J., Smolander J., Mikkelsen M., Thermal responses during and after whole-body cryotherapy. *J Therm Biol*. 2003. pp.601–608.

References:

1. Savic M., Fonda B., Sarabon N. Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *Journal of Thermal Biology*. 2013;38:186–191.
2. Baranov A.Yu., Malysheva T.A. Eksperimentalnaya proverka rezultatov izmereniya teperatury poverkhnosti kozhnogo pokrova patsienta do i posle obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. *Lechebnaya fizkultura i sportivnaya meditsina*. 2016;4(136):40-46. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A. Experimental verification of patients' skin-surface temperature measurements before and after whole body cryotherapy. *Exercise Therapy and Sports Medicine*. 2016;4(136):40-46. (In Russ.)]
3. Vieira A., Bottaro M., Ferreira-Junior J., Vieira C., Cleto V., Cadore E. et al. Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access Journal of Sports Medicine*. 2015. 49–54.
4. Costello J.T., Donnelly A.E., Karki A., Selfe J. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *International Journal of Sports Medicine*. 2014. 35–40.
5. Hausswirth C., Schaal K., Le Meur Y., Bieuzen F., Filliard J-R., Volondat M. et al. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLOS ONE*. 2013 Aug 22;8(8):e72658.

6. Bleakley C.M., Bieuzen F., Davison G.W., Costello J.T. Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access Journal of Sports Medicine*. 2014. 25–36.
7. Cholewka A., Stanek A., Sieroń A., Drzazga Z. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Research and Technology*. 2012. 180–187.
8. Baranov A.Yu., Baranov V.A., Malysheva T.A. Energeticheskie osnovy effektivnosti krioterapevticheskoy apparatury. *Fizioterapiya, balneologiya i reabilitatsiya*. 2005;2:29-31. [Baranov A.Yu., Baranov V.A., Malysheva T.A. Energetic basis of efficiency of cryotherapeutic equipment. *Russian journal of phhysiotherapy, balneology and rehabilitation* 2005;2:29-31. (In Russ.)].
9. Miller E., Mrowicka M., Malinowska K., Mrowicki J., Saluk-Juszczak J. et al. Effects of whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of antioxidative enzymes in blood of depressive multiple sclerosis patients. *The World Journal of Biological Psychiatry*. 2011;12:223-227.
10. Pournot H., Bieuzen F., Louis J., Mounier R., Fillard J.R. et al. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLOS ONE*. 2011;6:e22748. DOI:10.1371/journal.pone.0022748. PubMed: 21829501.
11. Lubkowska A., Szyguła Z. Changes in blood pressure with compensatory heart rate decrease and in the level of aerobic capacity in response to repeated whole-body cryostimulation in normotensive, young and physically active men. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2010;23:367-375. PubMed: 21306982.
12. Makhanyok A.A., Levin M.L., Dragun V.L. Teplofizicheskie aspekty obshchey gazovoy krioterapii. *Vesti NAN Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. nauk*. 2011;3:59–71. [Makhanyok A.A., Levin M.L., Dragun V.L. Thermophysigal aspects of gas cryotherapy. *News of the National Academy of Sciences of Belarus, Physico-Technical Series*. 2011;3:59–71. (In Russ.)]
13. Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Savelyeva A.V., Sidorova A.Yu. Vybor skhemy obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. *Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Kholoda*. 2012;4:40-44. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Savelyeva A.V., Sidorova A.Yu. Selecting the general scheme of cryotherapeutic action. *Journal of IAR*. 2012;4:40-44. (In Russ.)]
14. Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Savelyeva A.V., Sidorova A.Yu. Perenos teploty v obekte obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. *Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Kholoda*. 2012;2:35-40. [Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Savelyeva A.V., Sidorova A.Yu. Heat transfer in the object of general cryotherapeutic action. *Journal of IAR*. 2012;2:35-40. (In Russ.)]
15. Westerlund T., Oksa J., Smolander J., Mikkelsen M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy. *Journal of Thermal Biology*. 2003. 601–608.

Сведения об авторах:

Баранов Александр Юрьевич – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой криогенной техники.

Осина Анастасия Алексеевна – магистрант.

Синькова Валентина Алексеевна – магистрант.

Information about the authors.

Alexander U. Baranov – Dr. Sc. (Technical), Prof., Assoc. Prof.

Anastasia A. Osina – Undergraduate.

Valentina A. Sinkova – Undergraduate.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 11.09.2016.

Received 11.09.2016.

Принята в печать 20.11.2016.

Accepted for publication 20.11.2016.

Для цитирования: Васильев Т.Р., Кокуев А.Г. Прибор для измерения расхода многофазного потока на основе оптико-акустического эффекта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4): 34-41 DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-34-41

For citation: Vasiliev T.R., Kokuev A.G. Aparatus for measuring multiphase current diffusion based on the optoacoustic effect. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):34-41. (IN RUSS.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-34-41

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.5.08

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-34-41

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Васильев Т.Р.¹, Кокуев А.Г.²

*Астраханский государственный технический университет,
414025, г. Астрахань, ул. Татищева, 16*

¹e-mail:vasilyev_tr@mail.ru, ²e-mail:kokuevag@gmail.com

Резюме: *Цель.* Цель исследования состоит в создании более совершенного многофазного расходомера, отвечающего метрологическим и техническим требованиям, в устройстве которого отсутствовали бы радиоактивные элементы. **Метод.** Вместо гамма-излучения в многофазном расходомере предлагается использовать оптико-акустический эффект. Приведена схема разрабатываемого расходомера и описание его работы. Рассматривается также возможность использования оптико-акустического эффекта для создания ультразвукового многофазного расходомера с излучателями высокой мощности. **Результат.** Проведен анализ современных многофазных расходомеров, в том числе самого популярного, в конструкции которого используются сопло Вентури и гамма-измеритель фракций. Определены преимущества и недостатки многофазных расходомеров. Предложено использовать вместо метода гамма-излучения оптико-акустический эффект. При облучении лазером среды образуются волны давления. По величине давления можно судить о параметрах среды: оптической плотности, плотности среды. **Вывод.** Главным требованием для многофазного расходомера является достижение точности уровня учета нефти при транспортировке. Многофазные расходомеры позволяют реализовать принцип раздельного учета добываемой газожидкостной смеси при разработке месторождений-спутников и скважин, принадлежащих разным владельцам, т. е. обеспечивают значительный экономический эффект. Доказано, что многофазный расходомер будет играть ключевую роль в оптимизации управления добычей на нефтяных и газовых месторождениях. Необходимо продолжить исследования и проведение ряда экспериментов в целях проверки его метрологических характеристик и возможности реализации.

Ключевые слова: *многофазные потоки, расход многофазного потока, многофазный расходомер, оптико-акустический эффект, трубопровод, экономический эффект*

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

APARATUS FOR MEASURING MULTIPHASE CURRENT DIFFUSION BASED ON THE OPTOACOUSTIC EFFECT

Timur R. Vasilyev¹, Andrey G. Kokuev².

Astrakhan State Technical University

16 Tatishcheva Str., Astrakhan 414025, Russia

¹e-mail:vasilyev_tr@mail.ru, ²e-mail:kokuevag@gmail.com

Abstract: Objectives. The purpose of the study is to provide an improved multiphase flow meter that meets the metrological and technical standards, the composition of which would exclude radioactive elements. **Method.** Instead of gamma radiation, the optoacoustic effect is proposed for use in the multiphase flow meter. The table shows the plan of the flow meter with a description of its assembly. The possibilities of using the optoacoustic effect for creating ultrasonic multiphase flow meter with high power emitters are also considered. **Results.** An analysis of modern multiphase flow meters, including the most popular, which utilise a nozzle within the design of the Venturi meter gamma densitometer. The advantages and disadvantages of the multiphase flow meters. Instead of the gamma ray method the use of the optical-acoustic effect is proposed. During laser irradiation of the medium, pressure wave were formed. Judging on the basis of pressure readings, the parameters of the medium can evaluated: optical density, medium density. **Conclusion.** The main requirement for a multi-phase flow meter is to achieve precision oil level readings during transport. Multiphase flow meters allow the principle implementation of the separate developed measure registering the quantity of produced gas-liquid mixture during the satellite fields development and wells belonging to different owners, i.e. offering a significant economic effect. It is evident that the multiphase flow meter will play a key role in optimising production control in oil and gas fields. It is necessary to continue research through series of experiments in order to verify the metrological characteristics and implementation possibilities of the technology.

Keywords: multi-phase current, flow rate of implementation multi-phase current, multi-phase flow meter, optical-acoustic effect, the pipeline, economic effect

Введение. Добываемое сырье из скважины является не только смесью жидких или газообразных углеводородов, а многофазовой смесью природного газа, нефти и пластовой воды с включениями твердой фазы (песок, гидраты и асфальтены), другими словами, многофазным потоком. Для измерения и учета нефти, газа и других компонентов используются многофазные расходомеры.

Многофазный расходомер - устройство, измеряющее скорость потока каждой фазы многофазного потока. Согласно данному определению к многофазным расходомерам можно отнести обычные системы с сепараторами (рис.1), в которых происходит полное разделение фаз, а затем измерение их расходов.



Рис.1. Трехфазный сепаратор фирмы Expro
Fig.1. Expro three-phase separator

Тем не менее, когда многофазный поток разделяется на два или более однофазных потоков, пропадает необходимость в использовании понятия многофазного потока. Поэтому сегодня многофазным расходомером называют устройство, которое измеряет скорость потока каждой фазы многофазного потока без какого-либо их разделения (рис.2).

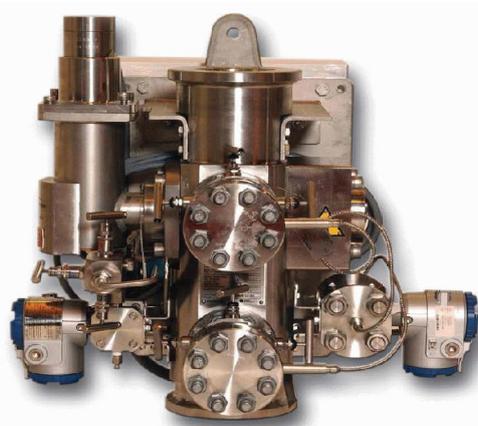


Рис. 2 Многофазный расходомер PhaseWatcher фирмы Schlumberger
Fig. 2 PhaseWatcher multiphase flow meter from Schlumberger

Постановка задачи. Цель нашего исследования заключается в создании многофазного расходомера, который бы отвечал метрологическим и техническим требованиям, и в устройстве прибора отсутствовали радиоактивные элементы.

Разработка многофазных расходомеров является одним из перспективных направлений в нефтяной и газовой промышленности. Если сравнивать с традиционными измерительными системами, включающими в себя сепараторы, то данный прибор имеет ряд преимуществ.

Компактные габариты. Обычные системы измерения с сепараторами с трубными обвязками и отдельными расходомерами для каждой фазы, являются громоздкими, массивными. Так габариты сепаратора, показанного на рис.1, составляют в длину 5,8 м, в ширину 2,4 м и в высоту 2,7 м без учета дополнительной трубной обвязки с однофазными расходомерами.

При выборе многофазных расходомеров освобождается пространство для других производственных нужд, снижается необходимость в дополнительном оборудовании, снижается себестоимость всего проекта. Размер многофазного расходомера PhaseWatcher фирмы Schlumberger: длина - 0,6м, высота – 0,5м, ширина 0,5м. Это важный фактор при создании объектов без обслуживающего персонала, глубоководных платформ. А в случаях, когда экономическая целесообразность стоит на первом месте, порой только установка многофазного расходомера – единственное решение, например, разработка небольшого месторождения на шельфе [1].

Применение многофазного расходомера позволяет упростить гидродинамические исследования скважин (ГДИС). Так как при ГДИС эксплуатация обычных сепараторов дорогостоящая, отнимающая много времени для необходимой стабилизации параметров потока. Для предотвращения остановки добычи тестовый сепаратор должен иметь отдельную линию, подключенную к подводному манифольду. В данном случае исследования проводятся циклично для каждой скважины отдельно, при этом добыча временно прекращается [2-5].

Многофазовый расходомер позволяет осуществлять постоянное измерение расхода фаз в режиме реального времени. Данное устройство будет играть ключевую роль в оптимизации управления добычей на нефтяных и газовых месторождениях.

У многофазных расходомеров существуют и недостатки. Измерение расхода многофазового потока является непростой задачей. Добываемое сырье из скважины является не только смесью жидких или газообразных углеводородов, а многофазовой смесью природно-

го газа и нефти, пластовой воды с включениями твердой фазы (песок, гидраты и асфальтены).

Такие параметры, как давление, температура, скорость потока, химический состав нефти и газа, плотности и вязкости фаз, тепловые параметры, минеральный состав воды, газонефтяной и газожидкостной факторы, влияют на смешивание или разделение газа, нефти и воды. И даже закачивание химических реагентов играет значительную роль в изменении режима потока и измерении его расхода в целом. Чтобы выбрать лучший для конкретного случая метод измерения, необходимо учитывать данные характеристики потока.

Методы исследования. Испытывалось множество методов и способов для измерения многофазного потока, таких как: объёмный расходомер, труба Вентури, расходомер вытеснительного типа, различные плотномеры, электромагнитные волны СВЧ диапазона, эффект Кориолиса, гамма-излучение, диэлектрическая проницаемость, радиоизотопный метод измерения, гомогенизаторы, статические смесители, кросскорреляционный метод, частичное разделение при большом содержании газа.

Самый популярный метод измерения многофазного потока, используемый в промышленных образцах – это гамма-излучение для определения объемной доли газа и воды в сочетании с соплом Вентури, предназначенного для вычисления массового потока.

Заявленные компанией-производителем показатели точности прибора приведены ниже:

1. Абсолютная ошибка измерения объемной доли воды составляет $\pm 2\%$ в диапазоне от 0 до 100% объемной доли воды.
2. Абсолютная ошибка измерения объемной доли газа составляет $\pm 2\%$ в диапазоне от 0 до 30% объемной доли газа, $\pm 5\%$ в диапазоне от 30 до 50%, $\pm 10\%$ в диапазоне от 50% и выше.
3. Измерение расхода жидкости – $\pm 5\%$; газа – $\pm 8\%$.

При объемной доли газа более 25% используется частичная сепарация, расход газа измеряется отдельно [6].

Преимущество данного расходомера заключается в его способности измерять соленость в режиме реального времени. Определение солености позволяет автоматически корректировать вычисление расхода без дополнительных калибровок прибора.

Соленость - один из показателей, контролируемый инженером при гидроразрыве пласта. Соленость также влияет на температурно-барический режим. Изменение режима может привести к закупорке трубопроводов [7-9].

Стоит отметить, что при использовании радиоактивных источников требуется выполнение дополнительных мер по защите окружающей среды: получение лицензии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору и ряд других разрешений [10-12]. Следовательно, применение гамма-излучения является конструктивным недостатком подобных расходомеров.

Описание физического эффекта. Оптико-акустический (ОА) эффект – возникновение пульсаций давления при облучении лазером газа или жидкости. Еще в 1881 году оптико-акустический эффект был открыт А.Беллом и описан также в трудах В.Рентгена и Д.Тиндаля, но вскоре был забыт на долгие годы. И только с открытием лазера был начат новый этап исследований.

Количественные характеристики эффекта весьма чувствительные к составу смеси. Применение оптико-акустического эффекта для анализаторов характеризуется простотой и надежностью, высокой избирательностью и широким диапазоном концентрации компонентов [13].

Фокус мощного лазерного луча используется в качестве импульсного лазерного источника интенсивных звуковых колебаний с высоким коэффициентом преобразования оптической энергии в звуковую. Уровень сигнала давления достигает свыше 0,1 Мпа [14], позволяя авторам исследовательских работ предлагать данный источник для технологических

приложений. На данный момент времени применение эффекта становится решением для разнообразных прикладных задач.

Исследования оптико-акустических эффектов представляют фундаментальный и прикладной интерес. Например, применительно к жидким средам выделяются две задачи, для решения которых применяется импульсный оптико-акустический эффект. Это – задача комплексной экспресс-диагностики разнообразных жидких образцов и задача создания мощного дистанционно возбуждаемого источника звука для океанографических, технологических, хирургических и других приложений. Например, лазерная оптико-акустическая томография, гидролокатор для оптико-акустического обследования подводного объекта, ОА- спектрометрия, ультразвуковой контроль, исследование композитных материалов.

Описание предлагаемого устройства. Многофазные расходомеры построены на основе нескольких физических эффектов, которые необходимы для измерения тех или иных параметров потока. С помощью метода гамма-излучения производят измерение плотности жидкой фазы, а также для определения массовых, объемных долей содержания нефти, воды и газа. Измерение объемного расхода методом переменного перепада давления реализовано с помощью трубы Вентури и датчика перепада давления. Комбинация этих приемов с математической моделью дает информацию о многофазном потоке.

Предлагаем использовать вместо метода гамма-излучения оптико-акустический эффект. При облучении лазером среды образуются волны давления. По величине давления можно судить о параметрах среды: оптической плотности, плотности среды. На данный момент ОА эффект применяется в спектроскопии. Представляем схему предполагаемого многофазного расходомера (рис.3).

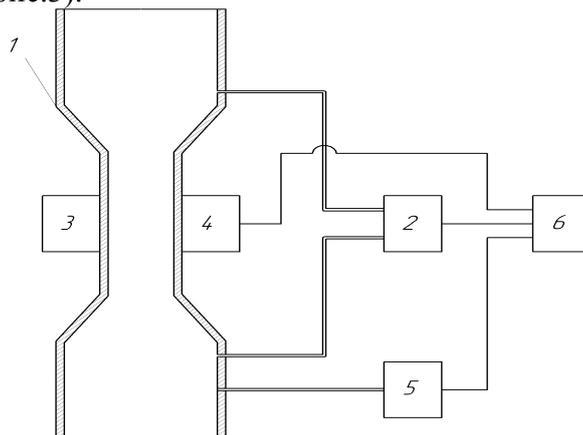


Рис. 3. Схема предлагаемого многофазного расходомера

Fig. 3. Schematic of the proposed multiphase flow meter

Труба Вентури 1, преобразователь перепада давления 2 являются элементами, предназначенными для измерения объемного расхода всей газожидкостной смеси. Излучатель 3, представляет собой лазер, облучающий среду для формирования волн давления. Приемник 4, устройство регистрации пульсации давления. Преобразователь температуры 5 измеряет температуру флюида. Вся информация с датчика перепада давления 2, приемника 4, преобразователя температуры 5 поступает в блок обработки информации 6, где происходит вычисление расхода потоков нефти, газа, воды.

Приведем описание работы данного прибора. Труба Вентури 1 является сужающим устройством, которое создает перепад давления в многофазном потоке. Преобразователь перепада давления 2 измеряет данную величину и формирует пропорциональный электрический сигнал, который поступает на входной канал блока обработки информации 6. Излучатель 3 является лазером. Фокус его мощного лазерного луча используется в качестве импульсного лазерного источника интенсивных звуковых колебаний с высоким коэффициентом преобразования оптической энергии в звуковую. Приемник 4 является преобразователем давления, способного измерять звуковые колебания, вызываемые лазером. Выходной электрический сигнал приемника 4 поступает в блок обработки информации 6.

Также к блоку обработки информации подключен преобразователь температуры 5, предназначенный для измерения температуры многофазного потока. На основе полученной информации от преобразователя перепада давления 2, приемника 4 и преобразователя температуры 5 и заложенной в памяти математической модели, блок обработки информации может производить расчет расходов каждой фазы многофазного потока.

Обсуждение результатов. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение возможности применения ОА эффекта в многофазном расходомере. В частности, необходимы: проведение экспериментов в газожидкостном потоке и измерение уровней сигнала при облучении потока лазером; создание математической модели процесса измерения; конструктивная разработка прибора; определение параметров лазера, устройства, принимающего сигнал; определение расположения излучателя и приемника; возможно, установка дополнительных излучателей и приемников. Все это требует дальнейшего изучения оптических свойств многофазного потока (газожидкостной смеси); проведение анализа метрологических характеристик прибора с целью их обоснования и выявления наилучших условий работоспособности прибора.

Также возможен второй вариант применения ОА эффекта. Существуют промышленные ультразвуковые многофазные расходомеры. Использование вместо пьезоэлектрических источников лазерно-ультразвуковых позволит улучшить измерение многофазного потока, так как пьезоэлектрические источники отличаются узкополосностью зондирующего сигнала.

Предлагаем организацию раздельного учета добываемой продукции. Многофазные расходомеры открывают новые возможности для нефтедобывающих компаний. Для удешевления разработки «месторождений-спутников» и скважин, которые принадлежат разным владельцам, происходит их объединение одним трубопроводом, по которому газожидкостная смесь поступает на первичный сепаратор и дальнейшую переработку (рис. 2).

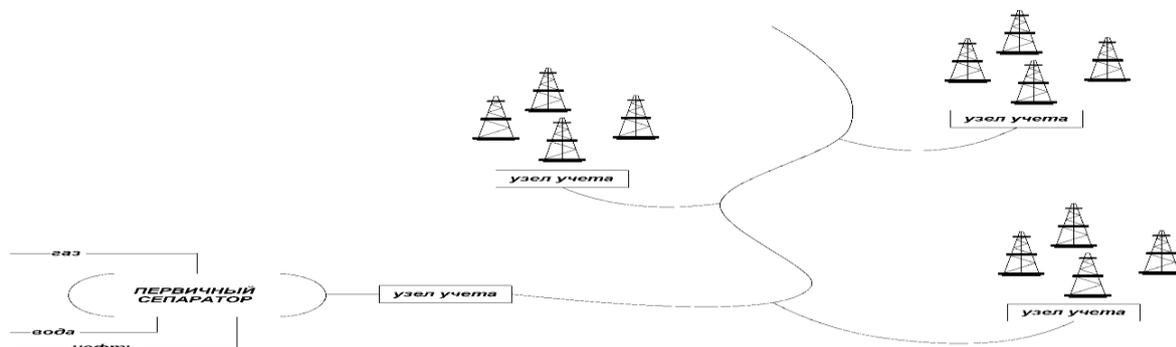


Рис. 4. Транспортировка газожидкостной смеси по общему трубопроводу от «месторождений-спутников»

Fig. 4. Transportation of a gas-liquid mixture through a common pipeline from «meta-satellite-satellites»

В данном случае выгода достигается за счет того, что не требуется закупка дополнительных сепараторов и прокладка дополнительных трубопроводов. Особенностью такой схемы является необходимость организации раздельного учета добываемой продукции и учета продукта перед началом его переработки, чтобы предотвращать спорные ситуации между владельцами.

Поставщики сырья и владельцы предприятий по переработке могут самостоятельно контролировать соответствие параметров продукта, поставляемого с «месторождений-спутников», нормам и правилам. Главным требованием для многофазного расходомера является достижение точности уровня учета нефти при транспортировке [15].

Без многофазных расходомеров сырье, добываемое из каждой скважины, должно проходить через тест-сепараторы до поступления его в общий трубопровод.

Это ведет к замедлению процесса добычи, общему удорожанию и потере целесообразности проекта.

Вывод. В результате проведенного исследования были составлены схемы прибора для измерения расхода многофазного потока, в котором применяется оптико-акустический эффект.

Рассмотрен принцип организации раздельного учета добываемой продукции для удешевления разработки «месторождений-спутников» и скважин, которые принадлежат разным владельцам. Необходимы дополнительные исследования и проведение ряда экспериментов для проверки возможности реализации прибора и определения его метрологических характеристик.

Библиографический список:

1. Falcone G., Hewitt G. F., Alimonti C. Multiphase flow metering. Principles and applications. Elsevier Science, 2009. 328 p.
2. Lanasa P. J., Upp E. L. Fluid Flow Measurement. Elsevier Inc., 2014. 280p.
3. Васильев Т.Р., Кокуев А. Г. Современные тенденции в развитии многофазных расходомеров // Научный обозреватель. 2014. № 7(43). С. 56–58.
4. Денисов С. Список физических явлений и эффектов: Справочник. Горький: ГНУНТТ, 1979. 166 с.
5. URL.: http://akin.ru/r_optoac.htm#top.
6. Falcimaigne J., Decarre S. Multiphase Production: Pipeline Transport, Pumping and Metering. Editions Technip, Paris, 2008. 153 p.
7. Handbook of multiphase flow metering. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, Revision 2, March 2005. 115 p.
8. Falcone G., Mehdizadeh P. Multiphase flow metering. Society of Petroleum Engineers, 2012. 129 p.
9. Vieugue V. The Growth of Multiphase Meters and the Key Challenges They Are Addressing. Rogtec Magazine Article. 2010. 98-104p.
10. Kari Johnson. Projects Proving Merits Of Multiphase. American Oil and Gas Reporter Magazine Article. June 2009.
11. Dr. Stuart L. Scott. Status Multiphase Metering. Rogtec Magazine Article. 2007. 32-47p.
12. Киясбейли А.Ш., Лифшиц Л.М. Счетчики и расходомеры жидкости с овальными шестернями. 1983. 144 с.
13. Лепявко А.П. Расходомеры и счётчики жидкости и газа. Поверка и калибровка. 2005. 98 с.
14. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Книга 22004. 412 с.
15. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. 1990. 287 с.

References:

1. Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C. Multiphase flow metering. Principles and applications. Elsevier Science. 2009. 328 p.
2. Lanasa P.J., Upp E.L. Fluid Flow Measurement. Elsevier Inc. 2014. 280 p.
3. Vasilyev T.R., Kokuev A.G. Sovremennyye tendentsii v razvitii mnogofaznykh raskhodomero. Nauchnyy obozrevatel. 2014;7(43):56–58. [Vasilyev T.R., Kokuev A.G. Present tendencies in the development of multiphase flow meters 2014;7(43):56–58. (In Russ).]
4. Denisov S. Spisok fizicheskikh yavleniy i effektov: Spravochnik. Gorky: GNUNTT; 1979. 166 s. [Denisov S. List of physical phenomena and effects: reference. Gorky: GNUNTT Publ.; 1979. 166 p. (In Russ).]
5. Available from: http://akin.ru/r_optoac.htm#top.
6. Falcimaigne J., Decarre S. Multiphase Production: Pipeline Transport, Pumping and Metering. Editions Technip, Paris; 2008. 153 p.

7. Handbook of multiphase flow metering. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, Revision 2. March 2005. 115 p.
8. Falcone G., Mehdizadeh P. Multiphase flow metering. Society of Petroleum Engineers. 2012. 129 p.
9. Vieugue V. The Growth of Multiphase Meters and the Key Challenges They Are Addressing. Rogtec Magazine Article. 2010. 98-104.
10. Johnson K. Projects Proving Merits Of Multiphase. American Oil and Gas Reporter Magazine Article. June 2009.
11. Dr. Stuart L. Scott. Status Multiphase Metering. Rogtec Magazine Article. 2007. 32-47.
12. Kiyasbeyli A.Sh., Lifshits L.M. Schyotchiki i raskhodomery zhidkosti s ovalnymi shesternyami. 1983.144 s. [Kiyasbeyli A.Sh., Lifshits L.M. Meters and liquid flow meters with oval gears. 1983.144 p. (In Russ).]
13. Lepyavko A.P. Raskhodomery i schyotchiki zhidkosti i gaza. Poverka i kalibrovka. 2005. 98 s. [Lepyavko A.P. Flow meters and counters of liquid and gas. Verification and calibration. 2005. 98 p. (In Russ).]
14. Kremlevskiy P.P. Raskhodomery i schetchiki kolichestva veshchestv: Spravochnik. Kniga. 2004. 412 s. [Kremlevskiy P.P. Flow meters and counters number of substances: Handbook. 2004. 412 p. (In Russ).]
15. Khansuvarov K.I., Tseytlin V.G. Tekhnika izmereniya davleniya, raskhoda, kolichestva i urovnya zhidkosti, gaza i para. 1990. 287 s. [Khansuvarov K.I., Tseytlin V.G. Technique of measuring pressure, flow, level of liquids, gas and steam. 1990. 287 p. (In Russ).]

Сведения об авторах.

Васильев Тимур Рафаэльевич - аспирант кафедры «Автоматика и управление»

Кокуев Андрей Геннадьевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление»

Information about the authors.

Timur R. Vasilyev - Postgraduate student, Department Automation and control

Andrey G. Kokuev – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., Department Automation and control.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 17.09.2016.

Conflict of interest

Received 17.09.2016.

Принята в печать 22.11.2016.

Accepted for publication 22.11.2016.

Для цитирования: Гайдаев А.А. Наклонное рассеяние радиоволн метеорными следами в импульсном режиме. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4): 42-52
DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

For citation: Gaydayev A. A. Transverse scattering of radio waves by meteor trails in pulsed mode. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):42-52 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 538.56: 621.396.2+523.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-42-52

НАКЛОННОЕ РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН МЕТЕОРНЫМИ СЛЕДАМИ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Гайдаев А. А.

Дагестанский государственный педагогический университет,
367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 57,
e-mail: aidislovo@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью данной работы является разработка математического аппарата для описания радиосигналов рассеянных метеорным следом при наклонном распространении радиоволн с учетом ряда ослабляющих факторов. **Метод.** Исследование проведено с использованием математического анализа в приложении к теории метеорного отражения радиоволн. **Результат.** Рассмотрены отдельные вопросы рассеяния радиоволны от недоуплотненных и переуплотненных метеорных следов при их радиозондировании в импульсном и непрерывном режиме. Рассмотрены механизмы, влияющие на формирования амплитуды радиосигнала, отраженного от метеорного следа. Получены математические выражения, позволяющие оценить величину мощности, начальной амплитуды сигналов, отраженных от недоуплотненных и переуплотненных метеорных следов в разных режимах работы радиопередающей станции. **Вывод.** Показано, что вытекающие из теории наклонного метеорного распространения радиоволн выкладки для радиолокационного способа зондирования метеорных следов совпадают с существующей теорией наклонного метеорного распространения радиоволн. Результаты исследования могут быть полезны для дальнейшего развития теории наклонного метеорного распространения радиоволн, и особенно, теории распределения амплитуд отраженных сигналов. Результаты исследования могут быть использованы как для описания наклонного рассеяния метеорными следами в непрерывном режиме, так и для радиолокационного зондирования метеорных следов в обоих режимах.

Ключевые слова: метеорный след, рассеяния, наклонное распространение, радиоволна, зона Френеля

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

TRANSVERSE SCATTERING OF RADIO WAVES BY METEOR TRAILS IN PULSED
MODE

Abidi A. Gaydaev

*Dagestan State Pedagogical University,
57 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367003, Russia
e-mail: aidislovo@mail.ru*

Abstract: Objectives. *The aim of this work is to develop a mathematical tool for describing the scattering of radio signals by meteor trails associated with radio wave dispersion taking into account a range of extenuatory factors. Method* The study was carried out using mathematical analysis in the application of meteorite radio wave reflection theory. **Results** *The questions of the scattering of radio waves from undercompacted and overcompacted meteor trails, as measured by radio sounding in a continuous pulse mode, are considered separately. The mechanisms that influence the formation of the amplitude of the RF signal reflected from a meteor trail are discussed in detail. The obtained mathematical expressions enable the initial reflected signal amplitudes from undercompacted and overcompacted meteor trails to be evaluated for power capacity in the different operation modes of radio transmitting stations. Conclusion* Following from the theory of the scattering of radiowaves by meteor trails, it is shown that the radiolocation calculation method for sounding meteor trails coincides with the existing theory. The results of the study may be useful for further development of transverse meteor wave propagation theory, especially for the theory of amplitude distribution reflection response. The results may also be used to describe transverse scattering of meteorite trails, as well as for radiolocalisation of meteor trails in both modes.

Keywords: *meteor trail, scattering, transverse propagation, radio waves, Fresnel zone*

Введение. Радиотехнические методы исследования метеорных следов позволили за последние годы существенно продвинуть направления изучения метеорного вещества в околоземном пространстве. В Казани такие исследования проводились в проблемной радиоастрономической лаборатории под руководством К.В. Костылева [19], О.И. Бельковича, В.В. Сидорова, Р.А. Курганова, а в Киеве была разработана метеорная автоматизированная радиолокационная система МАРС под руководством Б.Л. Кашеева, В.Н. Лебеденца, Ю.И. Волощука и др. За последние пятьдесят лет построена статистическая теория радиолокации метеоров [11,12]. Разработана компьютерная модель метеорного радиоканала связи «КАМЕТ» [17].

Вместе с тем рассеяние радиоволн от метеорных следов используется и в практических целях для передачи информации на расстояниях, достигающих до 2000 км. В США и Канаде метеорную радиосвязь используют для мониторинга окружающей среды [2,8]. Ее используют в Аргентине, Индонезии, Египте и других странах. В России и на Украине метеорная радиосвязь применяется в большинстве случаев для синхронизации разнесенных шкал времени [5,6,21,22].

Метеорная связь используется и в военных целях для передачи шифрованной информации на больших расстояниях в УКВ диапазоне [18]. На трассах, расположенных в полярных и субполярных областях, это - наиболее действенное средство связи.

Результаты радиолокационных исследований по изучению метеорных радиоэхо [3,7,23] позволяют повысить качество прогнозирования наклонного метеорного распространения. Большая работа по обобщению результатов экспериментального исследования наклонного метеорного распространения радиоволн проведена Р.А.Кургановым [20].

Вопросы выверки энергетических соотношений в метеорных радиолиниях изложены в работах [13,14,15] на базе статистической теории.

Постановка задачи. При использовании импульсного или непрерывного режима излучения при наклонном зондировании метеорных следов следует учесть ряд аспектов, влияющих на величину амплитуды сигнала, отраженного от метеорного следа, которые не были учтены в работах [14, 19, 20]. Решению этой задачи посвящена данная научная статья.

Методы исследования. Аналитические методы исследования источников литературы; критический анализ существующей теории; использование методов математического анализа для решения поставленной задачи.

Одной из основных характеристик сигнала, отраженного от метеорного следа, является его максимальная амплитуда. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованием рассеяния радиоволн на метеорных следах, характер и мощность отраженного сигнала существенно зависит от величины линейной электронной плотности в метеорном ионизированном следе (столбе) [4,9,10,16]. Согласно этой теории метеорные следы можно разделить в основном на два типа - недоуплотненные и переуплотненные. Это связано с механизмом рассеивания радиоволн метеорным следом.

При небольшой концентрации электронов в следе, т.е. для недоуплотненных следов предполагается, что рассеяние радиоволн происходит на свободных электронах, тогда как для переуплотненных следов рассеяние происходит как от металлического цилиндра, радиус которого определяется из условия равенства нулю диэлектрической проницаемости внутри следа [1].

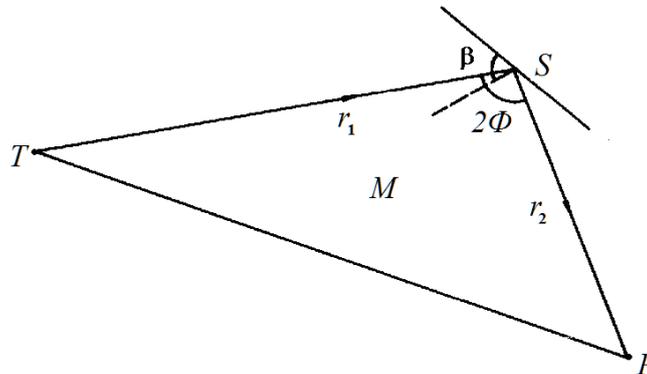


Рис.1. Геометрия отражения сигнала от метеорного следа при наклонном распространении радиоволн

Fig.1. The geometry of reflection of a signal from a meteor track with an oblique Propagation of radio waves

Принимая, что мощность при наклонном зондировании быстро возрастает в течение долей секунды нужных метеору для пересечения основной зоны, и достигает максимального значения доля рассеивания в тот момент времени, когда первая зона Френеля оказывается полностью сформированной, то мощность эхо-сигнала может быть определена:

$$P(0) = \frac{P_T}{16\pi^4} \frac{\lambda G_1 \cdot G_2 \cdot g \cdot \cos^2 \mu}{r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 + \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)} \quad (1)$$

Здесь P_T - излучаемая мощность, G_1 и G_2 - коэффициент усиления передающей и приемной антенн для направлений TS и SP соответственно, μ - угол между электрическим вектором падающей волны и той компонентой, которая принимается приемной антенной, λ - длина волны, g - коэффициент отражения, β - угол между метеорным следом и плоскостью, проведенной через пункты приема, передачи и отражающую точку метеорного следа; 2Φ - угол TSP (рис. 1).

Из (1) получим выражения для радиолокационного случая, полагая, что длина трассы равна нулю, тогда $r_1 = r_2 = d$, $\Phi = 0$, мощность эхо-сигнала равна:

$$P(0) = \frac{P_T G_1 G_2 \lambda^3}{32\pi^4 d^3} g^2 = F^2 d^{-3} g^2.$$

Здесь

$$F = \sqrt{\frac{P_T G_1 G_2 \lambda^3}{32\pi^4}}.$$

Представленное выражение совпадает с формулой, полученной Бельковичем О.И. [12]. Здесь и ниже все выкладки, вытекающие из наклонного распространения и относящиеся к радиолокационному случаю, представлены в тех же обозначениях, что и в работе [12]. Совпадения этих выкладок свидетельствует об общности данной теории, и ее правильности.

Амплитуду A зарегистрированного сигнала ко входу приемника в общем случае можно записать в виде

$$A = \sqrt{R_{ex} P(0)}, \quad (2)$$

где R_{ex} - входное сопротивление приемника.

В случае рассеивания вперед для недоуплотненных следов, если электрический вектор падающей волны параллелен оси следа [4,10], максимальный коэффициент отражения равен:

$$g_1 = \pi r_e e^{-(kr)^2 \cos^2 \Phi} \alpha = g_{01} e^{-(kr)^2 \cos^2 \Phi} \alpha. \quad (3)$$

Здесь $r_e = 2,81 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона, r - начальный радиус метеорного следа, α - линейная электронная плотность в точке отражения.

Для радиолокационного случая коэффициент отражения g равен:

$$g_1 = \pi r_e \cdot \exp\left\{- (kr)^2\right\} \alpha = g_{01} \cdot \exp\left\{- (kr)^2\right\} \alpha, \quad (4)$$

а для переуплотненных следов в обоих случаях

$$g_2 = 0,84 \left(\frac{\pi^2}{4} e^{-1} r_e \alpha \right)^{1/4} = g_{02} \cdot \alpha^{1/4}, \quad (5)$$

g_{01} и g_{02} введенные в формулах не зависят от параметров метеора и атмосферы:

$$g_{01} = \pi r_e, \quad (6)$$

$$g_{02} = 0,84 \left(\frac{\pi^2}{4} e^{-1} r_e \right)^{1/4}. \quad (7)$$

Коэффициент 0,84 в формулах (5) и (7) введен Маннингом [4] после учета ослабления сигнала за счет рефракции волны во внешних областях ионизированного следа [11,12].

При анализе распределения амплитуд метеорных сигналов считается, что для метеорных следов с α меньшей некоторой переходной α_c коэффициент отражения определяется по формуле (4), т.е. следы с $\alpha < \alpha_c$ считаются недоуплотненными. Для $\alpha > \alpha_c$ g определяется из (5) — переуплотненные следы. Величина α_c определяется из условия непрерывности амплитуды как функции электронной плотности α , т. е. из условия $g_1 = g_2$:

$$g_{01} e^{-(kr \cos \Phi)^2} \alpha_c = g_{02} \alpha_c^{1/4},$$

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr \cos \Phi)^2 \right\}, \quad (8)$$

где, $\alpha_{c0} = \left(\frac{g_{02}}{g_{01}} \right)^{4/3} = 6 \cdot 10^{13}$ эл/м - переходная линейная электронная плотность при условии $r = 0$, k – модуль волнового вектора.

Для радиолокационного случая, полагая $\cos \Phi = 1$, получим

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr)^2 \right\}.$$

Изменение линейной электронной плотности α вдоль метеорного следа, которая зависит от нормированной высоты [4,10,12], имеет вид:

$$\alpha = \alpha_m z(t'), \quad (9)$$

где, α_m - линейная электронная плотность в максимуме ионизации на следе,

$$z(t') = 2,25 e^{-t'} \left(1 - \frac{1}{3} e^{-t'} \right)^2. \quad (10)$$

Здесь, t' - нормированная высота с началом отсчета на высоте h_m максимума ионизации на данном следе:

$$t' = \frac{h - h_m}{H},$$

где, h – высота отражающей точки на метеорном следе, H – приведенная высота атмосферы.

С учетом (1) - (7), (10), запишем формулы амплитуды сигнала.

Для недоуплотненных следов амплитуда равна:

$$A = C \frac{\cos \mu \cdot g_{01} \alpha_m z(t') \cdot e^{-(kr \cos \Phi)^2}}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

где, $C = \sqrt{R_{\text{ex}}} F$.

Для случая радиолокационного зондирования, полагая $r_1 = r_2 = d$, $\Phi = 0$, получим

$$A = C d^{-3/2} g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr)^2 \right\} \alpha_m z(t').$$

Для переуплотненных следов амплитуда имеет следующий вид:

$$A = C \frac{g_{02} \alpha_m^{1/4} \cdot z^{1/4}(t') \cos \mu}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}, \quad (12)$$

и в радиолокационном случае:

$$A = C \cdot d^{-3/2} g_{02} \cdot \alpha_m^{1/4} z^{1/4}(t').$$

Дельностью T метеорного эхо-сигнала будем считать превышение сигналом порогового уровня U .

Изменение амплитуды A метеорного сигнала от недоуплотненного следа во времени можно записать в виде:

$$A = A_0 \cdot \exp(-T / \tau), \quad (13)$$

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)}, \quad (14)$$

здесь, A_0 — максимальная амплитуда сигнала в момент времен $T = 0$, τ — постоянная спада сигнала метеорного радиоотражения.

Для радио-эхо, приравнявая $\Phi = 0$, получим известную формулу:

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D}.$$

Если в выражение (13) вместо A_0 подставить значение пороговой амплитуды U , то есть минимальной регистрируемой амплитуды сигнала, то легко получить длительность радиоэхо от недоуплотненного следа:

$$T = \tau \ln \frac{A}{U}. \quad (15)$$

Для эхо-сигнала от переуплотненного метеорного следа характерно более медленное нарастание амплитуды, довольно пологая вершина и сравнительно крутой спад.

Время превышения таким сигналом порогового уровня имеет сложный характер, поэтому в данной статье не будем затрагивать этот вопрос.

Максимальная зарегистрированная амплитуда сигнала от недоуплотненного следа будет меньше, чем по формуле (11) за счет двух эффектов — диффузии следа за конечное время пролета метеорным телом первой зоны Френеля и за счет минимального времени, необходимого для регистрации метеорного следа соответствующей станцией [12]. График, приведенный на рис. 2, демонстрирует влияние этих эффектов на амплитуду сигнала.

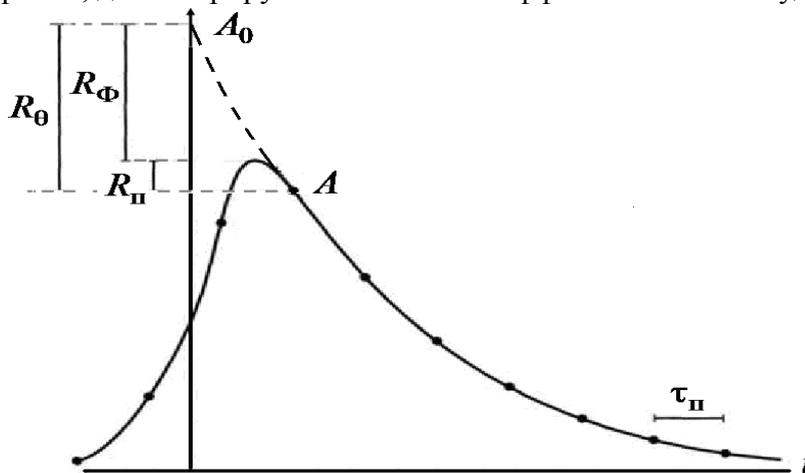


Рис. 2. Временная зависимость амплитуды радиосигнала $A(t)$, отраженного от недоуплотненного следа

Fig. 2. Time dependence of the amplitude of the radio signal of the reflected From an uncomplicated trace

Временная зависимость амплитуды $A(t)$ для радиосигнала, рассеянного недоуплотненным следом для идеального случая показана пунктирной линией ($v = \infty$, $r_0 = 0$), и для случая, когда метеороид движется с конечной скоростью и начальным радиусом - сплошной линией.

На рис.2 также представлены возможные поправки амплитуды сигнала R_{Φ} за счет диффузионного процесса в следе за время образования главной зоны Френеля, а также R_{Π} - поправка, вызванная импульсом сигнала передающей станции с периодом повторения τ_{Π} , который может не совпадать с моментом максимума амплитуды.

$$\text{Суммарный эффект} - R_{\theta} = R_{\Phi} + R_{\Pi}$$

Тогда амплитуда принимаемого сигнала уменьшится на эту величину $A = A_0 - R_{\theta}$. Учет этого эффекта в работе [12] представлен в более удобной форме для выкладок в виде множителя, который приведен ниже.

Зеркально отраженный от метеорного следа принимаемый сигнал проходит в основном от главной зоны Френеля L_{Φ} .

В случае наклонного зондирования она имеет центр в точке, расположенной на оси следа таким образом, что сумма ее расстояний r_1 от передатчика T и r_2 от приемника P представляет минимальный путь луча (рис. 1).

Величина этой зоны равна:

$$L_{\Phi} = 2 \left[\frac{\lambda r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi)} \right]^{1/2} \quad (16)$$

В случае возвратного зондирования $r_1 = r_2 = d$, $\beta = \pi/2$

$$L_{\Phi} = \sqrt{2d\lambda}.$$

Обозначим через τ_{Φ} — время пролета метеорным телом половины зоны Френеля, тогда

$$\tau_{\Phi} = \frac{L_{\Phi}}{2v}, \quad (17)$$

где, v — скорость метеорного тела.

В работе [12] получена функция Φ_{0c} , которая учитывает влияния ослабляющих факторов на амплитуду.

При этом учитывается высотную зависимость коэффициента диффузии

$$\tau = \tau_0 e^{-t}, \quad (18)$$

где, $t = \frac{h - h_0}{H}$. Здесь t - относительная высота с началом отсчета на характеристической высоте h_0 .

$$\Phi_{0c} = \begin{cases} \exp\{-\theta_0 e^{-t}\} & \text{при } \theta_0 \leq 1 \\ \frac{1}{2\theta_0} e^{-t} & \text{при } \theta_0 > 1 \end{cases}, \quad (19)$$

где, $\theta_0 = \frac{\tau_{\Phi} + \tau_{\Pi}}{2\tau_0}$.

В этом случае с учетом высотной зависимости начального радиуса $r = r_0 e^{at}$ и величины τ (18), формула (8) примет вид:

$$\alpha_c = \alpha_{co} \exp\left\{ \frac{4}{3} (kr_0)^2 \cdot e^{2at} \cdot \cos^2 \Phi + \theta_0 e^t \right\}, \quad (20)$$

для радиолокационного случая

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \exp \left\{ \frac{4}{3} (kr_0)^2 e^{2at} + \theta_0 e^t \right\}.$$

Здесь, r_0 - значение начального радиуса на характеристической высоте h_0 , a - постоянная.

На метеорных радиолокационных станциях непрерывного излучения роль τ_n выполняет постоянная времени приемной и регистрирующей аппаратуры, следовательно, полученные формулы приемлемы и для этого случая.

Принимая во внимание высотную зависимость начального радиуса для метеоров с одинаковыми скоростями (19) и формулу (11) можно переписать в виде:

$$A = C \frac{\cos \mu \cdot g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr_0)^2 e^{2at} \cos^2 \Phi \right\} \varphi_{0c} \alpha_m z(t')}{\left[r_1 r_2 (r_1 + r_2) (1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \Phi) \right]^{1/2}}. \quad (21)$$

Для радиолокационного случая получим:

$$A = C \cdot d^{-3/2} g_{01} \cdot \exp \left\{ - (kr_0)^2 e^{2at} \right\} \varphi_{0c} \alpha_m z(t').$$

Обсуждение результатов. Амплитуда сигнала, отраженного от недоуплотненных метеорных следов при наклонном метеорном распространении будет ослаблена за счет конечности времени пролета метеорным телом первой зоны Френеля и за счет минимального времени, необходимого для регистрации метеорного следа соответствующей станцией, как показано на рисунке 2.

Учет ослабляющего действия определяется множителем φ_{0c} . Влияние этой функции будет значительным, если передающая станция работает в импульсном режиме и время срабатывания приемного устройства будет заметным.

Формула для амплитуды радиосигнала рассеянного недоуплотненным следом (21), полученная в случае работы передатчика в импульсном режиме, может быть использована и для непрерывного излучения. При этом в ослабляющей функции φ_{0c} (19) не должна присутствовать τ_Φ , а роль τ_n выполняет постоянная задержка времени регистрирующей аппаратуры.

Вывод. Полученные выкладки в данной статье для наклонного зондирования метеорных следов позволяют по новому подойти к построению общей статистической теории метеорных радиоотражений, которая воплотила бы в себя и радиолокационную теорию.

Они также могут быть использованы, как для описания наклонного рассеяния метеорными следами в непрерывном режиме, так и для радиолокационного зондирования метеорных следов в обоих режимах.

Основные физические выражения, приведенные в данной статье, существенно повлияют на развитие ряда тем теории наклонного метеорного распространения радиоволн, и особенно на теорию распределения амплитуд отраженных сигналов, ранее опубликованной в работах [14,15,20].

Библиографический список:

1. Azarenko N. A, Galaydych V. K. Electromagnetic diffraction by metal cylinder coated with inhomogeneous magneto active plasma sheath. «Journal of Kharkov University», No. 808. – 2008. – P. 73-76.
2. Cannon P. S., Shukia A. K. Optimum antenna spacing for diversity in meteor burst communications systems. Report AGARD-CP-486. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development. – 1991. – P. 61.

3. Jones, J. & Collins, J. G. The mass distribution of radio meteors and the full-wave scattering theory. *Monthly of the Royal Astronomical Society*, Vol. 166. – 1974. – P. 529-542.
4. Manning L. A. The strength of meteoric echoes from dense columns. *Can. J. Phys.*, 4, 219, 1953.
5. Mathews J. Radio science aspects of radar meteor observations: where are we? /2013 US National Committee URSI National Radio Science Meeting. Boulder, Colorado, USA 9 - 12 January, 2013. – P. 45.
6. Yoshida H., Terasawa T. The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. /*Asteroids, Comets, Meteors*. – 2012. – P. 6187.
7. Антипов И. Е. Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации // *Радиотехника: Всеукр. межвел. науч.-техн. сб.* - 2012. - Вып. 169. - С. 55-59.
8. Антипов И. Е., Коваль Ю.А., Обельченко В.В. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации. – Харьков: Коллегиум. – 2006.–308 с.
9. Антипов. И. Е. Автоматизированный алгоритм распознавания и анализа метеорных АВХ // *Радиотехника: Всеукр. межвел. науч.-техн. сб.* – 2011. Вып. 165. – С. 56-62.
10. Байраченко И. В. О рассеянии радиоволн на недоуплотненных метеорных следах. /Сборник работ по международному геофизическому году. Вып 2. Киев: Изд-во киевского университета. – 1963. – С. 34.
11. Белькович О. И. Статистическая теория метеороидов. Казань: КГУ. –1988.– 301 с.
12. Белькович О. И. Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань: КГУ. – 1971. – 104 с.
13. Белькович О.И., Гайдаев А.А., Курганов Р.А., Лукин И.В. Определение энергетических потерь в метеорных линиях радиосвязи// Тез. докл. X Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. М.: – 1972. - С. 507-511.
14. Гайдаев А. А. Выверка энергетических соотношений в метеорных радиополосах. Махачкала: ДГПУ. – 2006. – 116 с.
15. Гайдаев А.А., Белькович О.И., Зуллийев А.М. Распределение амплитуд метеорных сигналов при наклонном распространении радиоволн. Известия НЦ СКВШ, Ростов-на-Дону, № 4. – 1983, – С. 44-48.
16. Д. Мак-Кинли. Методы метеорной астрономии. М.: Мир, 1964. 383 с.
17. Карпов А. В. Компьютерная модель метеорного радиоканала // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 38. – 1995. – С. 1177-1186.
18. Карпов А. В., Сидоров В. В., Сулимов А. И. Метеорная генерация секретных ключей шифрования для защиты открытых каналов связи. // *Информационные технологии и вычислительные системы*. № 3. – 2008. – С. 45-54.
19. Костылев К.В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань: КГУ. – 1970. – 142 с.
20. Курганов Р.А. Прогнозирование наклонного рассеивания радиоволн метеорными ионизациями. Казань: КГУ. – 1973. – 184 с.
21. Харченко Е. В. Метод расчета областей наиболее вероятного появления метеорных следов, имеющих точку зеркального отражения. // *Радиотехника*. – Харьков: ХНУРЭ, Вып. 166. – 2011. – С. 186-192.
22. Харченко Е. В. Рассеяние радиосигнала на метеорном следе. /*Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка*. № 966, випуск 18. – 2011. – С. 90-96.
23. Черкас Ю.В., Волощук Ю. И. Выявление метеорных потоков астероидного происхождения вместе с их родительскими телами // *Прикладная радиоэлектроника: Науч.-техн. журнал*. Том. 10, №1. – 2011. - С. 73-77.

References:

1. Azarenko N.A., Galaydych V.K. Electromagnetic diffraction by metal cylinder coated with inhomogeneous magneto active plasma sheath. *Journal of Kharkov University*. 2008;808:73-76.
2. Cannon P.S., Shukia A.K. Optimum antenna spacing for diversity in meteor burst communications systems. Report AGARD-CP-486. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development. 1991. 61 p.
3. Jones J., Collins J.G. The mass distribution of radio meteors and the full-wave scattering theory. *Monthly of the Royal Astronomical Society*. 1974;166:529-542.
4. Manning L.A. The strength of meteoric echoes from dense columns. *Canadian Journal of Physics* 1953;4:219.
5. Mathews J. Radio science aspects of radar meteor observations: where are we? 2013 US National Committee URSI National Radio Science Meeting. Boulder, Colorado, USA; 9–12 January, 2013. 45 p.
6. Yoshida H., Terasawa T. The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation Using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. *Asteroids, Comets, Meteors*. 2012. 6187 p.
7. Antipov I.E. Ob ispolzovanii vysokikh chastot v meteornoy radiolokatsii. *Radiotekhnika: Vseukr. mezhvel. nauch.-tekhn. sb.* 2012;169:55-59. [Antipov I.E. On the use of high frequencies in meteoric radiolocation. *Radiotechnics:All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. 2012;169:55-59. (In Russ.)]
8. Antipov I.E., Koval Yu.A., Obelchenko V.V. Razvitie teorii i sovershenstvovanie radiometeornykh sistem svyazi i sinkhronizatsii. *Kharkov: Kollegium*; 2006. 308 s. [Antipov I.E., Koval Yu.A., Obelchenko V.V. The development of theories and improvement of radio meteoric communications network and synchronizing. *Kharkov: Kollegium*; 2006. 308 p. (In Russ.)]
9. Antipov I.E. Avtomatizirovannyi algoritm raspoznavaniya i analiza meteornykh AVKh. *Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* 2011;165:56-62. [Antipov. I.E. The automated recognition algorithm and the analysis of meteoric amplitude-time characteristics. *Radiotechnics:All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. 2011;165:56-62. (In Russ.)]
10. Bayrachenko I.V. O rasseyanii radiovoln na nedouplotnennykh meteornykh sledakh. *Sbornik rabot po mezhdunarodnomu geofizicheskomu godu. Vyp 2. Kiev: Izd-vo kievskogo universiteta*; 1963. 34 s. [Bayrachenko I.V. About the radio scattering on undercompacted meteor trails. *Iss. 2. Kiev: Kiev University Publ.*; 1963. 34 p. (In Russ.)]
11. Belkovich O.I. *Statisticheskaya teoriya meteoroidov*. Kazan: KGU; 1988. 301 s. [Belkovich O.I. *Statistical theory of meteoroids*. Kazan: KSU; 1988. 301 p. (In Russ.)]
12. Belkovich O.I. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii meteorov*. Kazan: KGU; 1971. 104 s. [Belkovich O.I. *Statistical theory of meteor radar*. Kazan: KSU; 1971. 104 p. (In Russ.)]
13. Belkovich O.I., Gaydaev A.A., Kurganov P.A., Lukin I.V. *Opreделение energeticheskikh poter v meteornykh liniyakh radiosvyazi. Tez. dokl. X Vsesoyuznaya konferentsiya po rasprostraneniyu radiovoln. M.*; 1972. 507-511 s. [Belkovich O.I., Gaydaev A.A., Kurganov P.A., Lukin I.V. Power losses definition in meteor-burst links of radio communication. *Theses of 10th All-Union Conference on Radio-Wave Propagation. Moscow*; 1972. 507-511 s. (In Russ.)]
14. Gaydaev A.A. *Vyverka energeticheskikh sootnosheniy v meteornykh radioliniyakh. Makhachkala: DGPU*; 2006. 116 s. [Gaydaev A.A. *Regulation of energy relation in meteor radio links. Makhachkala: DSPU*; 2006. 116 p. (In Russ.)]
15. Gaydaev A.A., Belkovich O.I., Zulliev A.M. *Raspredelenie amplitud meteornykh signalov pri naklonnom rasprostranении radiovoln. Izvestiya NTs SKVSh. Rostov-na-Donu*; 1983;4:44-48. [Gaydaev A.A., Belkovich O.I., Zulliev A.M. Meteor signals amplitude distribution at oblique radio transmission. *News of Scientific Centre scientific SKVSh. Rostov-on-Don*; 1983;4:44-48. (In Russ.)]

16. D. Mak-Kinli. *Metody meteornoj astronomii*. M.: Mir; 1964. 383 s. [D. McKinley. *Methods of meteor astronomy*. Moscow: Mir; 1964. 383 p. (In Russ.)]
17. Karpov A.V. *Kompyuternaya model meteornogo radiokanala*. *Izv. vuzov. Radiofizika*. 1995;38;1177-1186. [Karpov A.V. *Computer model of a meteor radio channel*. *News of the Higher Institutions. Radiophysics*. 1995;38;1177-1186. (In Russ.)]
18. Karpov A.V., Sidorov V.V., Sulimov A.I. *Meteornaya generatsiya sekretnykh klyuchey shifrovaniya dlya zashchity otkrytykh kanalov svyazi*. *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitelnyye sistemy*. 2008;3:45-54. [Karpov A.V., Sidorov V.V., Sulimov A.I. *Meteor generation of secret encryption keys in the protection of open communication channels*. *Information technologies and computing systems*. 2008;3:45-54. (In Russ.)]
19. Kostylev K.V. *Astronomicheskie osnovy meteornoj radiosvyazi*. Kazan: KGU; 1970. 142 s. [Kostylev K.V. *Astronomical bases of meteor burst communications*. Kazan: KSU; 1970. 142 p. (In Russ.)]
20. Kurganov R.A. *Prognozirovaniye naklonnogo rasseivaniya radiovoln meteornymi ionizatsiyami*. Kazan: KGU; 1973. 184 s. [Kurganov R.A. *Forecast of inclined radio-wave scatter by meteoric ionization*. Kazan: KSU; 1973. 184 p. (In Russ.)]
21. Kharchenko E.V. *Metod rascheta oblastey naiboleye veroyatnogo poyavleniya meteornykh sledov, imeyushchikh tochku zerkalnogo otrazheniya*. *Radiotekhnika*. Kharkov: KhNURE; 2011;166:186-192. [Kharchenko E.V. *Method of calculating the areas of the most probable emergence of the meteor bursts with a specular point*. *Radiotechnics*. Kharkov: KNURE; 2011;166:186-192. (In Russ.)]
22. Kharchenko E.V. *Rasseyanie radiosignala na meteornom slede*. *Visnik Kharkivsskogo natsionalnogo universitetu imeni V. N. Karazishna. Radiofizika ta elektronika*. 2011;966(18):90-96. [Kharchenko E.V. *The radio signal dispersion on a meteor burst*. *News of V.N. Karazin Kharkiv National University. Radiophysics and electronics*. 2011;966(18):90-96. (In Russ.)]
23. Cherkas Yu.V., Voloshchuk Yu.I. *Vyavlenie meteornykh potokov asteroidnogo proiskhozhdeniya vmeste s ikh roditelskimi telami*. *Prikladnaya radioelektronika: Nauch.-tekhn. zhurnal*. 2011;10(1):73-77. [Cherkas Yu.V., Voloshchuk Yu.I. *Identification of meteor showers of an asteroid origin together with their parental bodies*. *Applied Radio Electronics: Research and Technology Journal*. 2011;10(1):73-77. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Гайдаев Абиди Абдулкадырович - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и методики преподавания.

Information about the author.

Abidi A. Gaydaev – Cand. Sc.(Phys.-Math.), Assoc. Prof.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.09.2016.

Received 30.09.2016.

Принята в печать 25.11.2016.

Accepted for publication 25.11.2016.

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Мироненко И.Г., Челушкина Т.А. Диагностирование групп электрорадиоизделий по переходным характеристикам для обнаружения дефектов на функциональных ячейках. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):53-62. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-53-62

For citation: Ismailov T. A., Hajiyev Kh. M., Mironenko I. G., Chelushkina T. A. Diagnosis of groups of electro-radio components according to the transient responses for the detection of defects on the functional cells. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43 (4):53-62. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-53-62

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК УДК 681.2.083

DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-53-62

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГРУПП ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЙКАХ

Исмаилов Т.А.¹, Гаджиев Х.М.³, Мироненко И.Г.², Челушкина Т.А.⁴.

¹³⁴Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

197376, г. Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5

¹e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail:frt@eltech.ru,

³e-mail:gadjiev.xad@mail.ru, ⁴e-mail:tatyana.cheluschkina@yandex.ru

Резюме: Цель. Разработка метода диагностирования электрорадиоустройств с минимальным усложнением контрольно-измерительной аппаратуры и возможностью получения информации с точек контроля внутри функционирующих устройств. **Методы.** Разработан метод контроля групп электрорадиоизделий, который предполагает прохождение контролирующего воздействия через пару контрольных точек, соединенных через несколько электрорадиоизделий. При этом каждое электрорадиоизделие вносит свою долю в преобразование выходного параметра, поэтому при несоответствии его допустимым значениям для идентификации дефектного электрорадиоизделия требуется оценить значения математического ожидания вероятного дефекта каждого электрорадиоизделия на схеме с целью фиксации. В качестве неисправного компонента в электронной схеме принимается тот, у которого будет минимальная дисперсия, причем величина дефекта будет соответствовать математическому ожиданию величины параметра этого электрорадиоизделия. **Результат.** В результате контроля не более десяти групп электрорадиоизделий на функциональных ячейках можно оценить дефектный элемент, сравнивая дисперсии рассчитанных значений каждого электрорадиоизделия и сам параметр соответствующего электрорадиоизделия. **Вывод.** Диагностирование групп электрорадиоизделий по переходным характеристикам для обнаружения дефектов на функциональных ячейках позволяет повысить эффективность контрольных операций и достоверность поиска неисправностей в современной электронной аппаратуре.

Ключевые слова: диагностирование, электрорадиоизделие, контрольная точка, переходные характеристики, функциональная ячейка

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

**DIAGNOSIS OF GROUPS OF ELECTRO-RADIO COMPONENTS ACCORDING
TO THE TRANSIENT RESPONSES FOR THE DETECTION OF DEFECTS ON THE
FUNCTIONAL CELLS**

Tagir A. Ismailov¹, **Igor G. Mironenko**², **Khadzhimurat M. Gajiyev**³, **Tatiana A. Chelushkina**⁴.

^{1,3,4}Dagestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

² Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,

5 Professor Popov Str., St. Petersburg 197376, Russia

¹e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail:frt@eltech.ru,

³e-mail:gadjiev.xad@mail.ru, ⁴e-mail:tatyana.chelushkina@yandex.ru

Abstract: Objectives. A method for diagnosing electronic components with minimally complicated control and measuring instrumentation and the ability to obtain information from internal control points of operating units is developed. **Methods.** The developed method for control of groups of electronic components presupposes the passage of a controllable influence through a few control points, connected via several electronic components. In addition, each electronic component contributes its share to the transformation of the parameter output, so the discrepancy of its allowable values for the identification of defective electronic component are required to assess the implication of the expected value of the probable defect of each electronic component in the schema with the aim of isolating it. The faulty component in the electronic circuit is identified by the minimum estimated variance, by which the magnitude of the defect will match the expected value of the electronic component parameter. **Results.** As a result of the control no more than ten groups of electrical components on functional cell matrices can be assessed as having a defective element by comparing the calculated variance values for each electrical component and the corresponding electrical component parameter itself. **Conclusion.** Diagnosing groups of electric components on transient characteristics for the detection of defects in the functional cell matrices enables efficiency control operations improvement and troubleshooting in the search for modern electronic equipment reliability.

Keywords: diagnostics, electrical components, control point, transient response, function cell matrices

Введение. Современная радиоэлектронная аппаратура имеет тенденцию к увеличению числа и типов электронных компонентов, применяемых в составе изделия, а также к возрастанию степени интеграции и применению сверхбольших интегральных схем (СБИС) [2,12]. Помимо компьютерных процессоров большое количество дефектов современной электронной аппаратуры приходится на мощные компоненты вычислительных систем с высокими тепловыделениями, для которых также необходимо организовывать высокоэффективные системы термостатирования для предотвращения термических ударов и тепловых пробоев [15,16,17].

Постановка задачи. Повышение степени интеграции электронных компонентов и возрастание количества дефектов приводит к резкому увеличению количества диагностических операций, усложнению контрольно-измерительной аппаратуры и возникновению проблем по получению информации с точек контроля внутри функционирующих устройств [8,13]. Существующая методика поэлементного диагностирования предполагает коммутирование каждого электрорадиоизделия (ЭРИ) и контроль его параметров при условии уменьшения шунтирующего влияния соседних ЭРИ. Однако такой метод недостаточно эффективен [9].

Методы исследования. В статье разработан метод контроля групп ЭРИ, который предполагает прохождение контролирующего воздействия через пару контрольных точек (КТ), соединенных через несколько ЭРИ. При этом каждое ЭРИ вносит свою долю в преобразование выходного параметра, поэтому при несоответствии его допустимым значениям возникает неопределенность при идентификации дефектного ЭРИ [11,14].

В качестве выходного параметра группы может быть выбран любой параметр, например, сопротивление, емкость, индуктивность между парой КТ. Однако в этом случае понадобятся специализированные измерители, кроме того, влияние некоторых ЭРИ будет в значительной степени зависеть от выбранного выходного параметра группы [1,18].

Например, если контролируется активное сопротивление между парой КТ выбранной группы, то влияние параметров резисторов будет превышать влияние конденсаторов и катушек индуктивности. Аналогичная ситуация возникает, если использовать в качестве выходного параметра емкость или индуктивность группы [3,20].

Дополнительным недостатком такого подхода является то, что эти параметры измеряются в статических режимах, поэтому требуется дополнительное время на завершение переходных процессов [4]. В то же время этот недостаток может быть использован в качестве основного преимущества, если применить переходную характеристику группы ЭРИ в качестве выходного совокупного параметра [6,7,8]. Это позволит уравнивать влияние разнотипных ЭРИ в группе, так как все они имеют определенные переходные характеристики вне зависимости от типа [19]. Причем возможен контроль дефектов не только пассивных (R,C,L) и активных (р-п-переходы диодов, стабилитронов, варикапов, транзисторов, тиристоров и т. д.) ЭРИ, но и обнаружение дефектов микросхем и микросборок, которые имеют для каждой пары КТ свои переходные характеристики [18]. В результате сравнения переходных характеристик эталонной и контролируемой функциональной ячейки (ФЯ) возможно обнаружение наличия дефекта.

Традиционные методики не позволяют с требуемой достоверностью провести определение дефектного ЭРИ, так как на выходной совокупный параметр группы может оказать влияние отклонение параметра любого ЭРИ этой группы, либо даже нескольких ЭРИ одновременно [10]. Причем весьма вероятна ситуация, при которой параметры ЭРИ не выходят за граничные значения допусков [13]. Однако их совокупное воздействие на выходной параметр группы вызывает значительное отклонение [11]. Поэтому возможна лишь констатация соответствия допустимым значениям выходного совокупного параметра группы.

В случае выхода за поле допуска выходного параметра осуществляется ориентировочное указание вида дефекта, вызвавшего соответствующее отклонение этого параметра [18]. Однако допустимо проведение диагностирования с точностью до отдельного ЭРИ в случае контроля нескольких групп, проверяемых ЭРИ на ФЯ с последующим анализом дефектов, вызывающих соответствующие отклонения выходных совокупных параметров для каждой группы.

Множество вероятных дефектных значений для каждого ЭРИ даст множество отклонений параметров для каждой группы [6]. Пользование такими таблицами соответствия невозможно для обнаружения дефектного ЭРИ из-за необходимости сравнения колоссальных массивов информации (требующих значительных объемов машинной памяти) для обнаружения искомого дефекта [7]. Поэтому требуется не табличное сравнение дефектов, а аналитическое вычисление дефектного ЭРИ [13].

На выходной параметр группы ЭРИ может оказать влияние любой ЭРИ этой группы, каждый в соответствии со своим коэффициентом влияния, но после контроля нескольких групп ЭРИ должны быть выявлены, как дефектные, только те ЭРИ, которые во всех этих случаях показали одинаковое отклонение ЭРИ от номинального значения, так как параметр дефектного ЭРИ не может менять своего значения в зависимости от изменения точек подключения к контролируемым группам ЭРИ.

Преимуществом такого подхода является также то, что возможно для определения работоспособности схемы отказаться от использования игольчатого контактирующего устройства (ИКУ) и осуществить проверку ФЯ через его разъем, контакты которого соединены через группы ЭРИ. Задача облегчается тем, что этап контроля ФЯ после сборочных операций необходим только для того, чтобы при передаче ФЯ на регулировку не произошло дополнительных отказов при подаче напряжения питания [5,7]. Опыт работы по контролю ФЯ показал, что такие отказы возможны только при наличии коротких замыканий и обрывов, а также отклонения некоторых параметров ЭРИ свыше 50% от номинального значения [5,11].

Таким образом, задача контроля упрощается, так как необходимо диагностирование значительного изменения параметров ЭРИ [19]. Однако диагностирование ЭРИ с погрешностью 10% требует применение ИКУ или щупов [20]. Поэтому целесообразно процедуру контроля дефектных ЭРИ в схемах устройств построить в два этапа.

На первом этапе все ФЯ после сборки контролируются через разъем для определения наличия значительных дефектов. При отсутствии таковых ФЯ передаются на регулировку. Если же на первом этапе выявлены отклонения контролируемых параметров, то схемы подключаются через ИКУ для локализации дефектных ЭРИ, а затем поступают на ремонт.

На примере построения математической модели (ММ) зависимости параметров ЭРИ и выходного совокупного параметра группы ЭРИ можно рассмотреть создание диагностического теста, процедуру поиска и нахождения дефектного ЭРИ методом группового контроля [6,7,10].

Необходимо установить зависимость между параметрами ЭРИ X_1, X_2, \dots, X_M и выходным совокупным параметром группы Y

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_M). \quad (1)$$

Обсуждение результатов. Для определения влияния параметров ЭРИ на выходной совокупный параметр было проведено исследование. Входным факторам было задано изменение во всем диапазоне допустимых значений. Параметры ЭРИ принимали следующие значения: короткое замыкание, -50%, -10%, номинальное значение, +10%, +50%, обрыв.

Варьирование параметров задавалось вначале поочередно для каждого фактора, а затем совместно для двух, трех и более факторов одновременно, при этом проводилось определение выходного совокупного параметра и расчет коэффициента влияния для каждого фактора в отдельности и коэффициентов совместного взаимовлияния нескольких факторов одновременно.

В результате проведенного исследования установлена линейная зависимость выходного параметра Y для каждого входного параметра X , варьируемого во всем диапазоне допустимых значений, причем корреляционная зависимость между факторами отсутствовала (очевидно, что параметр одного ЭРИ не оказывает влияния на параметр другого ЭРИ и влияние их на выходной параметр независимо).

Так как параметры ЭРИ в схемах не имеют корреляционной зависимости, то электронную схему можно выразить в виде уравнения гиперплоскости $(M+1)$ -мерном пространстве:

$$Y = A_{(0)} + A_{(1)}X_{(1)} + A_{(2)}X_{(2)} + \dots + A_{(M)}X_{(M)} + \dots, \quad (2)$$

где, $A_{(I)}$ - коэффициент влияния I -го фактора.

Такие ММ необходимо строить для подключения к каждой паре КТ на электронной схеме. Соответственно для каждого K -го подключения будет создана своя модель:

$$Y_{(K)} = A_{(0,K)} + A_{(1,K)}X_{(1)} + A_{(2,K)}X_{(2)} + \dots + A_{(I,K)}X_{(I)} + \dots, \quad (3)$$

где, $Y_{(K)}$ - совокупный выходной параметр при K -ом подключении, $A_{(I,K)}$ - коэффициент влияния I -го фактора при K -ом подключении.

Для сбора диагностического теста необходимо определить коэффициенты влияния каждой модели. Лучше всего использовать эталонную ФЯ, содержащую ЭРИ с номинальными значениями параметрами.

В этом случае, при каждом подключении к парам КТ, ФЯ будет иметь вид:

$$Y_{(K,N)} = A_{(0,K)} + A_{(1,K)}X_{(1,N)} + A_{(2,K)}X_{(2,N)} + \dots + A_{(I,K)}X_{(I,N)} + \dots, \quad (4)$$

где, $Y_{(K,N)}$ - номинальное значение совокупного выходного параметра при К-ом подключении; $X_{(I,N)}$ - номинальное значение I-го фактора.

Для определения коэффициентов влияния можно воспользоваться различными методами, однако, так как коэффициенты влияния достаточно детерминированы для случая влияния параметров ЭРИ на выходной совокупный параметр, можно перейти к относительным координатам, воспользовавшись разовыми значениями как самих параметров ЭРИ, так и выходного параметра группы из уравнения (3). Вычитая из уравнения (4) уравнение (3) получим:

$$Y_{(K)} - Y_{(K,N)} = A_{(1,K)} [(X)_{(1)} - X_{(1,N)}] + A_{(2,K)} (X_{(2)} - X_{(2,N)}) + \dots \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что можно определить коэффициенты влияния поочередно, задавая изменения каждого фактора в отдельности, сохраняя номинальные значения остальных ЭРИ, тем самым обнуляя соответствующие члены полинома. В этом случае уравнение (5) примет вид:

$$Y_{(K)} - Y_{(K,N)} = A_{(I,K)} [(X)_{(I)} - X_{(I,N)}] \quad (6)$$

Преобразовав, найдем коэффициент влияния:

$$A_{(I,K)} = \frac{Y_{(K)} - Y_{(K,N)}}{[(X)_{(I)} - X_{(I,N)}]} \quad (7)$$

Воспользовавшись уравнением (7) можно определить коэффициенты влияния для каждого фактора (параметра ЭРИ), для всех моделей (подключения соответствующей пары КТ).

После вычисления коэффициентов влияния каждого фактора будет построено множество ММ для каждой подключаемой пары КТ.

При диагностировании контролируемой схемы, содержащей дефектное ЭРИ, измеряя совокупный параметр каждой группы, можно получить различные значения отклонений этого параметра от номинального значения на эталонной схеме.

Преобразование уравнения (7) относительно параметра ЭРИ, приводит к уравнению:

$$X_{(I)} = \frac{Y_{(K)} - Y_{(K,N)}}{A_{(I,K)}} + X_{(I,N)} \quad (8)$$

Решая это уравнение, можно определить, какую величину отклонения должно иметь каждое ЭРИ для того, чтобы обеспечить измеренное отклонение совокупного выходного параметра. Для каждой группы будет получено свое значение величины параметра для каждого фактора при условии, что отклонение величины выходного параметра вызвано именно этим фактором. Естественно, что эти величины будут иметь случайный характер, поэтому необходимо вычислить оценки математического ожидания (9) и дисперсии (10):

$$M_{(I)} = \sum_{I=1}^N \frac{X_{(I,J)}}{N}, \quad (9)$$

$$D_{(I)} = \sum_{I=1}^N \frac{(X_{(I,J)} - M_{(I)})^2}{N}, \quad (10)$$

где, $M_{(i)}$ - оценка математического ожидания $X_{(i)}$ -го фактора; $D_{(i)}$ - оценка дисперсии $X_{(i)}$ -го фактора.

Для выявления закономерности влияния дефектного ЭРИ на выходные совокупные параметры каждой группы было проведено исследование. Каждому ЭРИ на ФЯ было задано отклонение параметра (короткое замыкание, -50%, -10%, номинальное значение, +10%, +50%, обрыв) с последующим контролем отклонений выходных совокупных параметров для каждой группы и вычислением по формуле (8) вероятного значения параметра для каждого ЭРИ при каждом подключении. Установлено, что тот параметр, отклонение которого имитировало дефект, имеет расчетные значения для каждого подключения наиболее близкие между собой и равные дефектному значению. Другие ЭРИ имеют расчетные значения для каждого подключения с большим разбросом, причем величина разброса существенно отличается от разброса дефектного ЭРИ (в 3 и более раза).

На рис.1 изображена зависимость величины дисперсии расчетного значения отклонения параметра дефектного ЭРИ от величины этого отклонения.

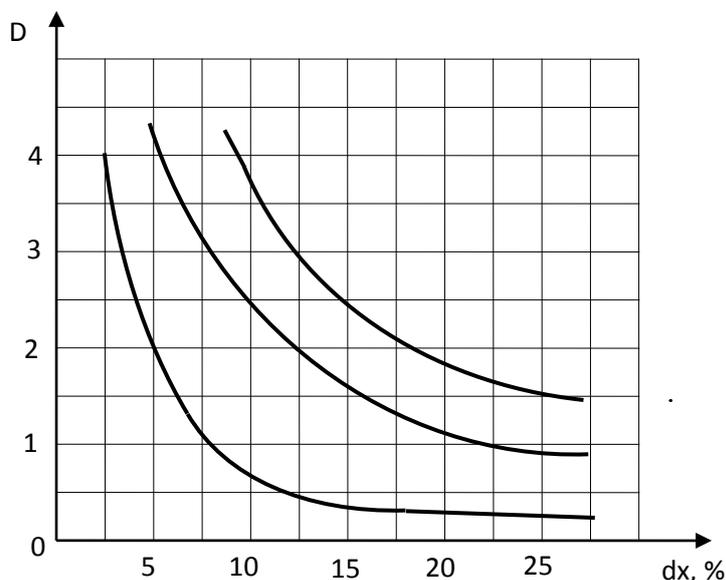


Рис.1. Зависимость величины дисперсии расчетных значений отклонения параметра ЭРИ от величины этого отклонения

Fig.1. Dependence of the variance of the calculated values of the deviation of the electronic product parameter from the value of this deviation

Разброс параметров семейства характеристик обусловлен статистическим рассеиванием значений параметров ЭРИ для различных групп ЭРИ и различных типов схем.

Физический смысл установленной закономерности заключается в том, что те ЭРИ, расчетные значения, оценки дисперсий которых минимальны, с большей вероятностью являются дефектными, так как параметры ЭРИ не могут меняться в процессе контроля.

Вероятность обнаружения дефектного ЭРИ зависит от количества проконтролированных групп: чем их больше, тем точнее осуществляется диагностирование проверяемого ЭРИ. На рисунке 2 изображена зависимость вероятности обнаружения дефектного ЭРИ на ФЯ от количества проконтролированных групп.

Исследование проводилось путем последовательного анализа партий, состоящих из тысячи схем каждого типа, на которых дефектные ЭРИ определялись в результате поочередного анализа 3-20 групп. Анализ зависимости, изображенной на рис. 2, позволяет сделать вывод, что увеличение числа контролируемых групп в электронных схемах свыше 10 практически не оказывает влияния на повышение вероятности обнаружения дефектных ЭРИ на ФЯ, которая определялась как:

$$P = \left(\frac{N}{M}\right) \cdot 100\% \quad (11)$$

где, P - вероятность обнаружения дефектного ЭРИ; N - количество обнаруженных дефектных ЭРИ во всей партии проверяемых ФЯ; M - общее число реально имеющихся дефектов в этой партии ФЯ.

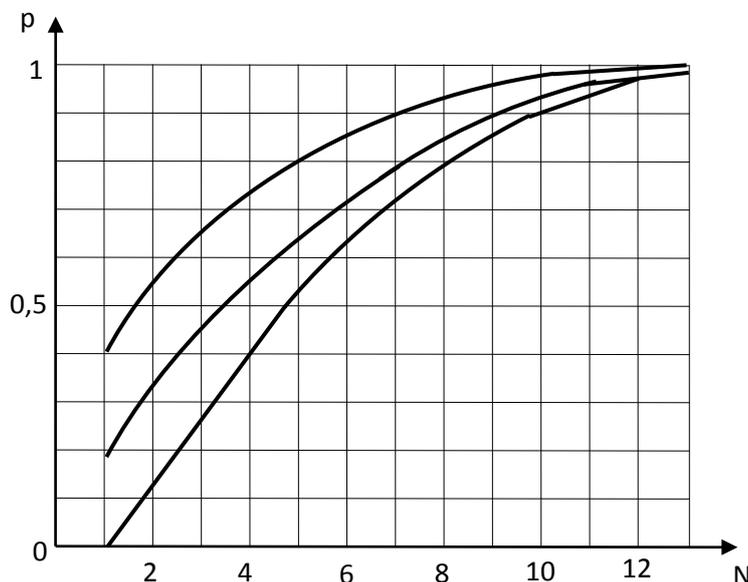


Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения дефектного ЭРИ в электронной схеме от количества протестированных групп ЭРИ
Fig. 2. Dependence of the probability of detection of defective electrical products in the electronic circuit from the number of monitored groups of electronic products

Вывод. В результате контроля не более десяти групп ЭРИ на ФЯ можно оценить дефектный элемент, сравнивая дисперсии рассчитанных значений каждого ЭРИ и сам параметр соответствующего ЭРИ (математическое ожидание). В случае если отклонение параметра ЭРИ от номинального значения менее 10%, такой элемент из рассмотрения исключается как исправный, а список подозреваемых дефектных ЭРИ выводится на печать в соответствии с вычисленным значением математического ожидания и величиной дисперсии этого значения.

Диагностирование групп ЭРИ по переходным характеристикам для обнаружения дефектов на ФЯ позволяет повысить эффективность контрольных операций и достоверность поиска неисправностей в современной электронной аппаратуре.

Библиографический список:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015, vol.60, no.6, pp.1653-1658, DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. *Informatsiyani tekhnologii ta kompyuterna inzheneriya*. 2015, no.3(34), pp. 9-12.
3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. *Active and Passive Electronic Components*. 2012, vol. 2012, pp. 908716, DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. *Journal europeen des Systemes Automatises*. 2012, vol.46, no.2-3, pp. 267-290, DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.

5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2016, no.2, pp. 65-69.
6. Wang L., Sun L., Hong J. Modified equations for weakly convergent stochastic symplectic schemes via their generating functions. *BIT Numerical Mathematics*. 2016, vol.56, no.3, pp.1131-1162, DOI: 10.1007/s10543-015-0583-8.
7. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности. – С.-Пб.: «Абрис», 2012. – 392 с.
8. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Схиртладзе А.Г. Диагностика и надежность автоматизированных систем. – Ст. Оскол: «ТНТ», 2013. – 352 с.
9. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. – М.: «Ленанд», 2016. – 256 с.
10. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – М.: «Либликом», 2013. – 584 с.
11. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – С.-Пб.: «Лань», 2011. – 352 с.
12. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Применение многокаскадных термоэлектрических модулей для охлаждения процессора компьютера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2004. - №7. – С. 25-29.
13. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. – М.: «Физматлит», 2010. – 608 с.
14. Оуэн Бишоп Электронные схемы и системы (ElectronicsCircuitsandSystems). – М.: «ДМК-Пресс», 2016. – 576 с.
15. Патент RU №2360380, МПК: H05K 7/20, G06F 1/20. Устройство для термостабилизации компьютерного процессора / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Оpubл. 27.06.2009. Бюл. №18.
16. Патент RU №2256946, МПК: G05D23/20, F25B21/02. Термоэлектрическое устройство терморегулирования компьютерного процессора с применением плавящегося вещества / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Гафуров К.А. // Оpubл. 20.07.2005. Бюл. №20.
17. Патент RU №2369894, МПК: G05D23/22, H01L35/28. Термоэлектрическое устройство термостабилизации компонентов вычислительных систем с высокими тепловыделениями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Оpubл. 27.03.2009. Бюл. №28.
18. Петров В.П. Регулировка, диагностика и мониторинг работоспособности смонтированных узлов, блоков и приборов радиоэлектронной аппаратуры, аппаратуры проводной связи, элементов узлов импульсной и вычислительной техники. Учебник. – М.: «Академия», 2016. – 224 с.
19. Шишмарев В.Ю. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Учебник. – Р.н/Д.: «Феникс», 2017. – 448 с.
20. Шишмарев В.Ю. Диагностика и надежность автоматизированных систем. - М.: «Академия», 2013. – 352 с.

References:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015;60(6):1653-1658. DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. *Informatsiyni tekhnologii ta komp'yuterna inzheneriya*. [Information technologies and computer engineering (In Ukr.)]. 2015; 3(34):9-12.

3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. Active and Passive Electronic Components. 2012. DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. Journal Europeen des Systemes Automatises. 2012;46(2-3):267-290. DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.
5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. 2016;2:65-69.
6. Wang L., Sun L., Hong J. Modified equations for weakly convergent stochastic symplectic schemes via their generating functions. BIT Numerical Mathematics. 2016;56(3):1131-1162. DOI: 10.1007/s10543-015-0583-8.
7. Antonov A.V., Nikulin M.S. Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti. S.-Pb.: Abris; 2012. 392 s. [Antonov A.V., Nikulin M.S. Statistical models in the reliability theory. St. Petersburg: Abris; 2012. 392 p. (In Russ.)]
8. Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. Diagnostika i nadezhnost avtomatizirovannykh sistem. St. Oskol: TNT; 2013. 352 s. [Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. Diagnostics and reliability of automated systems. Stary Oskol: TNT; 2013. 352 p. (In Russ.)]
9. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem. M.: Lenand; 2016. 256 s. [Viktorova V.S., Stepanyants A.S. Models and methods for calculating the reliability of technical systems. Moscow: Lenand; 2016. 256 p. (In Russ.)]
10. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnyye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz. M.: Librokom; 2013. 584 s. [Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Mathematical methods in reliability theory. The main characteristics of reliability and its statistical analysis. Moscow: Librokom; 2013. 584 p. (In Russ.)]
11. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem. S.-Pb.: Lan; 2011. 352 s. [Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. Ensuring the reliability of complex technical systems. St. Petersburg: Lan; 2011. 352 p. (In Russ.)]
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Primenenie mnogokaskadnykh termoelektricheskikh moduley dlya okhlazhdeniya protsessora kompyutera. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2004;7:25-29. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. The use of multi-stage thermoelectric modules for cooling computer processors. News of Higher Institutions. Instrument engineering. 2004;7:25-29. (In Russ.)]
13. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem. M.: Fizmatlit; 2010. 608 s. [Kashtanov V.A., Medvedev A.I. The theory of the complex systems reliability. Moscow: Fizmatlit; 2010. 608 p. (In Russ.)]
14. Owen Bishop Elektronnyye skhemy i sistemy (ElectronicsCircuitsandSystems). M.: DMK-Press; 2016. 576 s. [Owen Bishop. Electronic Circuits and Systems. Moscow: DMK-Press; 2016. 576 p. (In Russ.)]
15. Ismailov T.A., Gadjiyev Kh.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D. Ustroystvo dlya termostatirovaniya kompyuternogo protsessora. Patent RU №2360380, MPK: H05K 7/20, G06F 1/20. Byul. №18. Opubl. 27.06.2009. [Ismailov T.A., Gadjiyev Kh.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D. A device for temperature control of computer processor. Patent RU №2360380, IPC: H05K 7/20, G06F 1/20. Bull. №18. Publ. 27.06.2009. (In Russ.)]
16. Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. Termoelektricheskoye ustroystvo termoregulirovaniya kompyuternogo protsessora s primeneniem plavyashchegosya veshchestva. Patent RU №2256946, MPK: G05D23/20, F25B21/02. Byul. №20. Opubl. 20.07.2005. [Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. The thermoelectric device is a computer processor using thermal melting of

the substance. Patent RU №2256946, IPC: G05D23/20, F25B21/02. Bull. №20. Publ. 20.07.2005. (In Russ.)]

17. Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D. Termoelektricheskoye ustroystvo termotabilizatsii komponentov vychislitelnykh sistem s vysokimi teplovydeleniyami. Patent RU №2369894, MPK: G05D23/22, H01L35/28. Byul. №28. Opubl. 27.03.2009. [Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D. The thermoelectric device termotabilizatsii components of computer systems with high heat. Patent RU №2369894, IPC: G05D23/22, H01L35/28. Bull. №28. Publ. 27.03.2009. (In Russ.)]

18. Petrov V.P. Regulirovka, diagnostika i monitoring rabotosposobnosti smontirovannykh uzlov, blokov i priborov radioelektronnoy apparatury, apparatury provodnoy svyazi, elementov uzlov impulsnoy i vychislitelnoy tekhniki. Uchebnik. M.: Akademiya; 2016. 224 s. [Petrov V.P. Adjustment, diagnostics and monitoring of working capacity of installed nodes, blocks and devices of electronic equipment, wireless communication equipment, components and assemblies pulse computing. Textbook. Moscow: Akademiya; 2016. 224 p. (In Russ.)]

19. Shishmarev V.Yu. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Uchebnik. Rostov na Donu: Feniks; 2017. 448 s. [Shishmarev V.Yu. Automation of production processes in industry. Textbook. Rostov-on-Don: Feniks; 2017. 448 p. (In Russ.)]

20. Shishmarev V.Yu. Diagnostika i nadezhnost avtomatizirovannykh sistem. M.: Akademiya; 2013. 352 s. [Shishmarev V.Yu. Diagnostics and reliability of automated systems. Moscow: Akademiya; 2013. 352 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Исмаилов Тагир Абдурашидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники. Ректор Дагестанского государственного технического университета, Заслуженный деятель науки РФ.

Мироненко Игорь Германович – доктор технических наук, профессор.

Гаджиев Хаджимурат Магомедович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций.

Челушкина Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors.

Tagir A. Ismailov – Dr. Sc.(Technical), Prof., Department of theoretical and General electrical engineering. The rector Dagestan State Technical University. Honored worker of science of the Russian Federation.

Igor G. Mironenko – Dr. Sc.(Technical), Prof.

Khadzhimurat M. Gajiyev – Cand. Sc.(Technical), Assoc. Prof., Department of theoretical and General electrical engineering.

Tatiana A. Chelushkina – Cand.Sc.(Technical), Senior Lecturer, Department of theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 27.09.2016.

Принята в печать 01.12.2016.

Conflict of interest

Received 27.09.2016.

Accepted for publication 01.12.2016.

Для цитирования: Марченко А.С., Сулин А.Б. Эффективные решения теплообменников для термоэлектрических трансформаторов теплоты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):63-72 .DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

For citation: Marchenko A.S., Sulin A.B. Effective solutions for thermoelectric heat transformers using heat converters. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43(4):63-72 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.565.83

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-63-72

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛОТЫ

Марченко А.С.², Сулин А.Б.¹

^{1,2}Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский,
¹e-mail:miconta@rambler.ru, ²e-mail:mandserg@gmail.com

Резюме: Цель. В статье на основании анализа причин термодинамических потерь в термоэлектрических трансформаторах теплоты показано, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Внешние технические потери обусловлены необратимостью процессов в элементах системы. Они определяются ее техническим решением и могут быть снижены благодаря особым подходам к конструированию и проектированию. **Методы.** Приведены примеры эффективных технических решений термоэлектрических блоков типа «воздух-воздух» и «воздух-жидкость», в которых минимизированы внешние потери за счет применения теплообменников на базе двухфазных термосифонов специальной конфигурации. Для воздушных теплообменников с классическим цельнометаллическим оребрением на основании методики анализа чувствительности выполнены расчеты зависимости эффективности термоэлектрического блока от характеристик теплообменника. **Результаты.** По результатам расчетов построены зависимости холодопроизводительности термоэлектрического блока, коэффициента преобразования энергии, эксергетического коэффициента полезного действия (КПД) и относительного эксергетического КПД от характеристик геометрии воздушного канала теплообменника. Зависимости холодопроизводительности термоэлектрического блока и коэффициента преобразования приведены в функции от материала и толщины ребра, от межреберного расстояния и от высоты канала воздушного теплообменника. **Вывод.** В качестве примеров эффективных технических решений предложены тепловые схемы термоэлектрических трансформаторов теплоты с изменением направления тепловых потоков и с теплообменниками на базе двухфазных термосифонов. Классические решения цельнометаллических теплообменников также могут быть оптимизированы на основе методологии анализа чувствительности систем.

Ключевые слова: термоэлектрический блок, характеристики теплообменника, анализ чувствительности, двухфазный термосифон

TECHICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
EFFECTIVE SOLUTIONS FOR THERMOELECTRIC HEAT TRANSFORMERS
USING HEAT CONVERTERS

Andrey S. Marchenko², Alexander B. Sulin¹.

^{1,2}St. Petersburg National Research Institute

Mechanics and Optics Information Technologies,

49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

¹e-mail:miconta@rambler.ru, ²e-mail:mandserg@gmail.com

Abstract: Objectives. The present article is based on the examination of the causes of thermodynamic heat loss in thermoelectric heat transformers. It is shown that the external loss in a real system is comparable to the internal loss in thermoelements at the present stage of thermoelectric engineering instrument development. External technical losses are attributed to the irreversibility of processes in system elements. These are determined by their technical resolution and can be lowered by means of specific approaches to design and construction. **Methods.** Examples of effective technical solutions for thermoelectric units of the "air-to-air" and "air-to-liquid" types, in which external losses are minimised due to the application of heat exchangers based on two-phase thermosyphons of special configuration, are given. For air coolers with a classic all-metal fin design based on the sensitivity analysis method, the dependence of the thermoelectric unit efficiency on the heat exchanger characteristics was calculated. **Results.** As a result, calculations of the dependence of cooling unit refrigeration capacity on the energy transformation ratio, power transfer coefficient, energy conversion efficiency (ECE) and the relative energetic efficiency of ECE were performed based on the characteristic of the heat exchanger air passage geometry. There is a dependence relationship between the thermoelectric conversion cooling unit refrigeration capacity and transformation ratio within the function of material and thickness of the ribs on the intercostal distance and on the height of the air heat exchanger channel. **Conclusion.** Examples of the proposed effective thermal circuit technical solutions are based on thermoelectric heat transformers with heat flow direction change and with heat exchangers, which are based on two-phase thermosyphons. Classical solutions of all-metal heat exchangers can also be optimised on the basis of the sensitivity analysis methodology.

Keywords: thermoelectric unit, heat exchanger characteristics, sensitivity analysis, two-phase thermosyphon

Введение. Сфера практического применения эффекта Пельтье растет не только в традиционных его приложениях таких как космос, военная техника, теплофизическое приборостроение, но также и в медицине, биологии, промышленности, бытовой технике и др. [1,2]. Принято считать, что термоэлектрические системы начинают конкурировать с традиционными методами искусственного охлаждения в диапазоне холодопроизводительности до нескольких сотен ватт, а для объектов со специальными требованиями по массогабаритным, виброакустическим и надежностным характеристикам практически не имеют конкурентов [3].

Постановка задачи. В этой связи представляет интерес анализ причин, вызывающих термодинамические потери в термоэлектрических трансформаторах теплоты (ТТТ) для выявления путей повышения их эффективности. Анализ эффективности ТТТ, основанный на эксергетическом методе, позволяет выявить составляющие внутренних и внешних потерь эксергии в данных системах [4]. Внутренние потери, определяемые необратимыми процессами в полупроводниках при реализации эффектов Пельтье, Джоуля и Томсона, являются

функцией характеристик термоэлектрического вещества и в данной статье не рассматриваются. В то же время внешние (технические) потери эксергии в ТТТ обусловлены необратимостью процессов в элементах системы, определяются ее техническим решением и могут быть снижены благодаря особым подходам к конструированию и проектированию.

На рис. 1 приведена конфигурация реального и идеального ТТТ. В то время как реальная система, функционирующая в диапазоне температур сред T_1 и T_2 , в общем случае, состоит из термоэлектробатареи, теплообменных устройств и побудителей расхода.

Под идеальным термоэлектрическим трансформатором теплоты (ТТТ) понимается система с нулевыми внешними потерями, т.е. система без термических и гидравлических сопротивлений и с бесконечно большой теплоемкостью теплоносителей. Практически, идеальным ТТТ при данном подходе является термоэлектробатарея, у которой температуры теплопоглощающей и тепловыделяющей стороны постоянны и равны температурам теплоносителей на входе в систему.

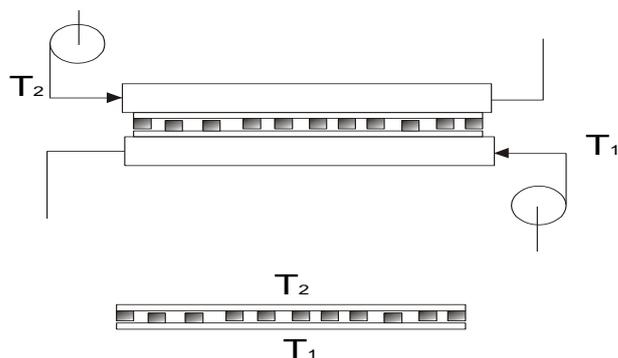


Рис.1. Конфигурация реального и идеального термоэлектрического трансформатора теплоты (ТТТ)

Fig.1. The configuration of a real and ideal thermoelectric heat transformer (ТТТ)

На рис. 2 приведен пример расчета относительного эксергетического к.п.д. η_e^* для некоторого реального ТТТ.

$$\eta_e^* = \eta_e^{(p)} / \eta_e^{(и)} = E''^{(p)} / E''^{(и)},$$

где $\eta_e^{(p)}$ – эксергетический к.п.д. реальной системы; $\eta_e^{(и)}$ – эксергетический к.п.д. идеальной системы; E'' – полезно используемая эксергия.

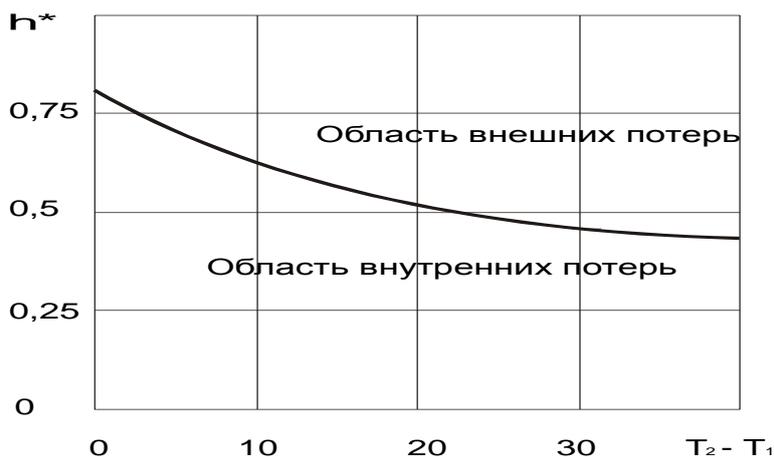


Рис. 2. Относительный эксергетический к.п.д. реального термоэлектрического трансформатора теплоты (ТТТ)

Fig. 2. Relative exergetic coefficient of efficiency real thermoelectric heat transformer (ТТТ)

Из приведенного примера видно, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери эксергии в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. В этой связи исследования, направленные на сни-

жение потерь, определяемых техническим решением ТТТ, так же актуальны, как и повышение параметра добротности.

Методы исследования. Результаты анализа технических потерь показывают, что они складываются из нескольких составляющих:

- Потери, определяемые контактными термическими сопротивлениями между термоэлектробатареей и теплообменниками.
- Теплоперетоки по элементам конструкции, обеспечивающим сборку устройства в единую конструкцию.
- Термические сопротивления тепловому потоку за счет теплопроводности в стенках теплообменников.
- Термические сопротивления теплоотдаче на поверхностях теплообмена.

В каждом ТТТ может быть выделена сборочная единица «теплопоглощающий теплообменник – термоэлектробатарея – тепловыделяющий теплообменник». Эффективность и надежность ТТТ в основном определяется конструктивным решением данной сборочной единицы.

В этой связи рассмотрим три основных подхода к проектированию термоэлектрического блока: схема с общими теплообменниками на теплопоглощающей и тепловыделяющей сторонах (рис. 3а); схема с индивидуальными теплообменниками на одной стороне и с общим теплообменником на другой (рис. 3б) и схема с индивидуальными теплообменниками как на теплопоглощающей, так и на тепловыделяющей стороне (рис. 3в).

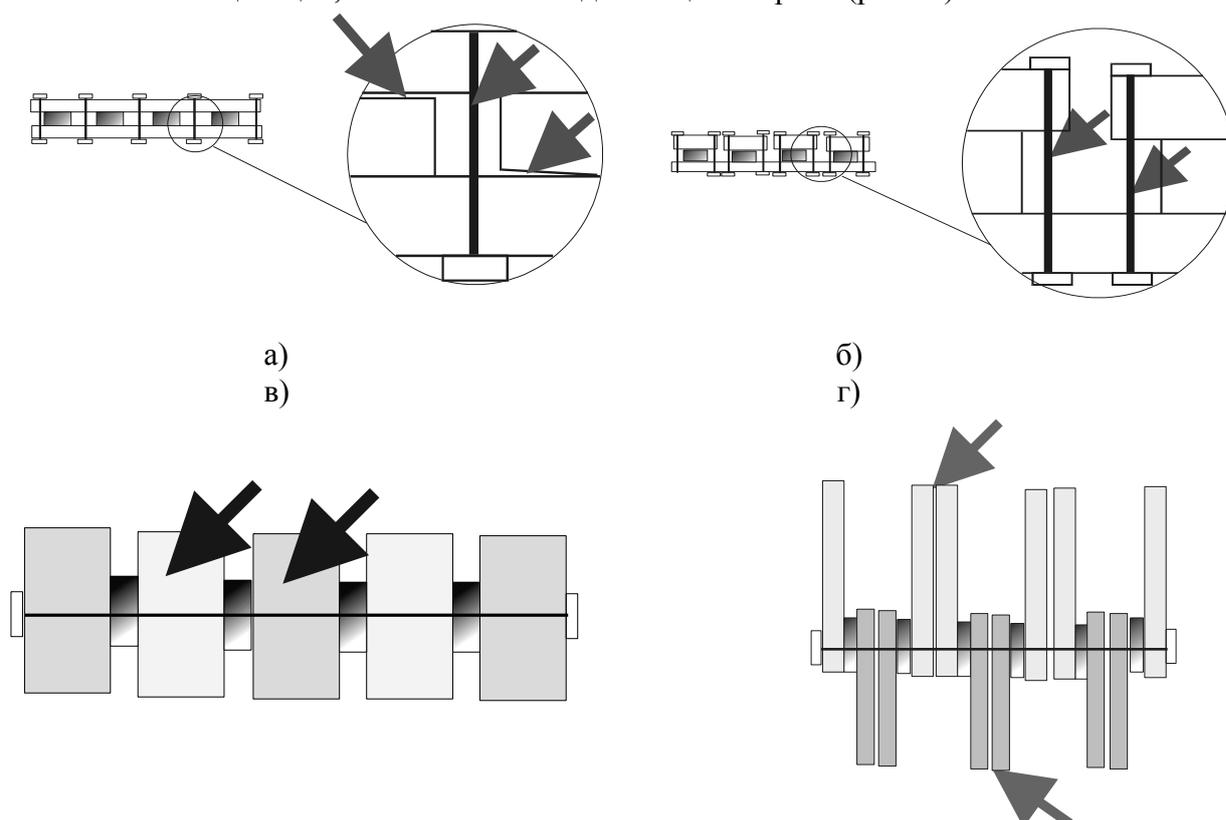


Рис. 3. Схемные решения сборочных единиц термоэлектрических блоков

Fig. 3. Circuit solutions of thermoelectric unit assemblies

Достоинством схемы, приведенной на рис. 3а, является относительная простота, технологичность изготовления теплообменников и обеспечение целостности устройства простыми средствами. К недостаткам этой схемы относятся: повышенные требования к плоскопараллельности поверхностей термоэлектробатарей; повышенные требования к унификации термоэлектробатарей по толщине; недостаточная надежность в части устойчивости к термическим напряжениям в термоэлементах и элементах конструкции; теплоперетоки по элементам крепления; низкая ремонтпригодность. Кроме указанного, наличие общих теп-

лообменников снижает эффективность термоэлектрического блока при противоточном движении теплоносителей в связи с увеличением рабочей разности температур из-за теплопередачи вдоль основания теплообменников.

Важным преимуществом компоновки блока с отдельными теплообменниками, приведенной на рис. 3б, являются менее жесткие требования к плоскопараллельности и унификации термоэлектробатарей по толщине, а также меньшая чувствительность к термическим напряжениям. Но при этом возникают новые конструктивные сложности в части обеспечения целостности устройства. Остается нерешенной также задача по снижению теплоперетоков через элементы крепления.

На рис. 3в показано, что использование общих теплообменников позволяет решить как задачу обеспечения целостности конструкции, так и задачу снижения теплоперетоков по элементам крепления, не выдвигая при этом повышенных требований к плоскопараллельности и толщине термоэлектробатарей. Данное схемное решение обладает при этом существенным недостатком, связанным с резким усложнением в организации движения охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей. Возникающие в этой связи конструктивные сложности практически исключают реализацию данного конструктивного решения.

Сохранение преимуществ схемного решения термоэлектрического блока, изображенного на рис. 3в, при упрощении организации движения теплоносителей возможно за счет изменения направления тепловых потоков в устройстве, которые предлагается подводить (отводить) от термоэлектробатарей не перпендикулярно, а параллельно теплопоглощающей и тепловыделяющей поверхностям (рис. 3г). При этом теплообменные устройства на теплопоглощающей и тепловыделяющей сторонах конструктивно разнесены друг от друга, что принципиально упрощает организацию движения теплоносителей. Однако, из рис. 3г видно, что без дополнительных конструктивных изменений невозможно обеспечить циркуляцию теплоносителей. Кроме того, необратимые кондуктивные потери в цельнометаллических теплообменниках при данном схемном решении будут весьма высоки.

На рис. 4 приведена схема термоэлектрического блока, которая свободна от перечисленных выше недостатков [5, 6]. Изменение геометрии теплообменников в данной схеме обеспечивает простую собираемость блока в единое целое, а применение теплообменных устройств с механизмом теплопереноса на основе двухфазного процесса (рис. 5) существенно снижают необратимые потери. Следует отметить, что фазовые переходы в теплообменниках ТТТ все чаще используются разработчиками как в тепловых насосах для задач охлаждения [7, 8] и нагрева [9], так и в генераторах электроэнергии [10, 11, 12].

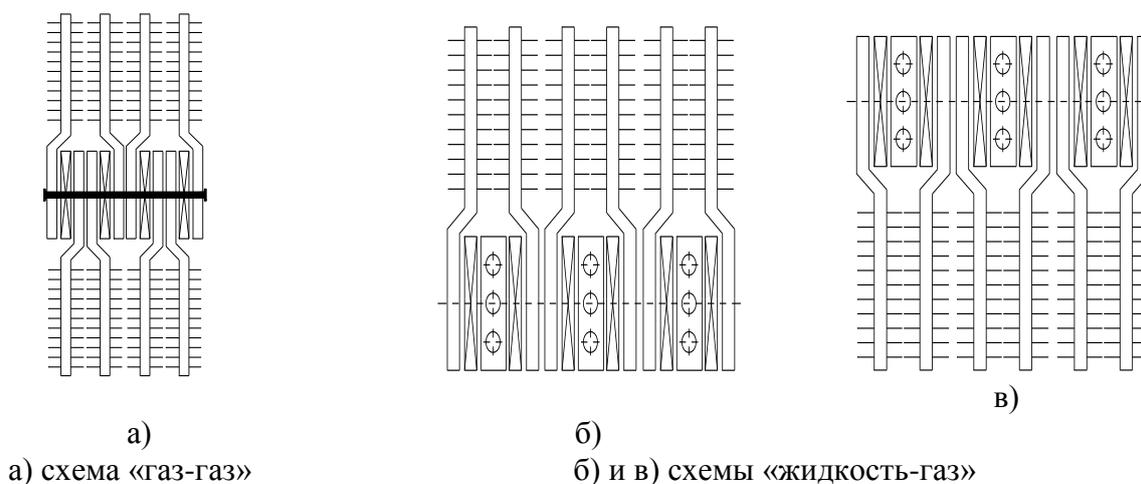


Рис. 4. Тепловые схемы ТТТ с минимизированными внешними потерями
Fig. 4. Thermal circuits TTT with minimized external losses

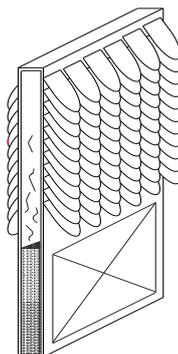


Рис. 5. Двухфазный теплообменник-термосифон на основе плоскоовальных алюминиевых трубок

Fig. 5. Two-phase heat exchanger-thermosiphon based on flat-oval aluminum tubes

Недостатки данного схемного решения характерны для теплообменных устройств с двухфазным процессом теплопереноса и связаны с рядом технологических сложностей при заправке теплоносителем термосифонов и тепловых труб. В то же время не исчерпаны способы повышения эффективности ТТТ с теплообменниками, использующими классическое цельнометаллическое оребрение [13 - 16].

Рассмотрим объект исследования, представляющий собой водовоздушный ТТТ. В рассматриваемую систему входят тангенциальный вентилятор, две термоэлектрические батареи и воздушный теплообменник, представляющий собой радиатор с плоскими ребрами (рис. 6).

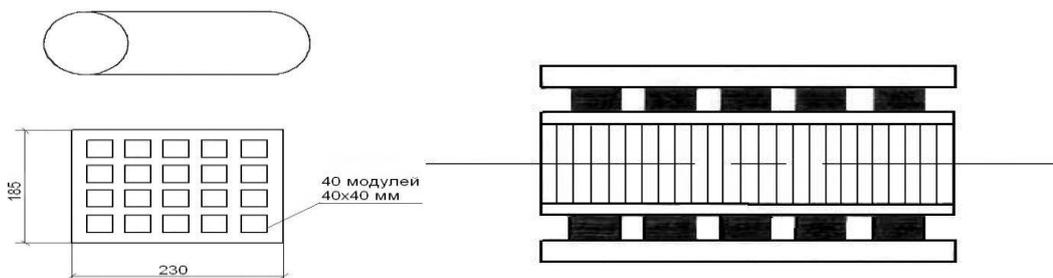


Рис. 6. Элементы термоэлектрического блока

Fig. 6. Elements of the thermoelectric unit

Анализ зависимости эффективности термоэлектрического блока от характеристик воздушного теплообменника проводился с использованием методики анализа чувствительности [17]. Под чувствительностью понимается свойство системы изменять характеристики функционирования под влиянием изменений собственных параметров системы и внешних возмущающих воздействий.

В работе были составлены три математические модели, описывающие процессы в данной системе теплообмена: математическая модель процессов теплопередачи в щелевых каналах теплообменника; математическая модель аэродинамических характеристик вентилятора и теплообменника; математическая модель процессов переноса теплоты в термоэлектрических модулях. В качестве характеристических критериев были выбраны коэффициент преобразования (COP), эксергетический КПД ($\eta_{\text{экс}}$) и относительный эксергетический КПД ($\eta_{\text{отн}}$).

В соответствии с методологией анализ выполнялся при фиксированном значении эксергии (в данном случае – потребляемой электрической мощности) на входе в систему. В процессе исследования подбирались такие параметры энергопитания системы «термоэлектрический блок – электровентилятор», при которых энергопотребление системы оставалось постоянным при изменении геометрических характеристик и материала воздушного теплообменника. По результатам вычислений построены графики зависимостей холодопроизводительности термоэлектрического блока, коэффициента преобразования энергии, эксергети-

ческого КПД и относительного эксергетического КПД от характеристик геометрии канала (рис. 7-10).

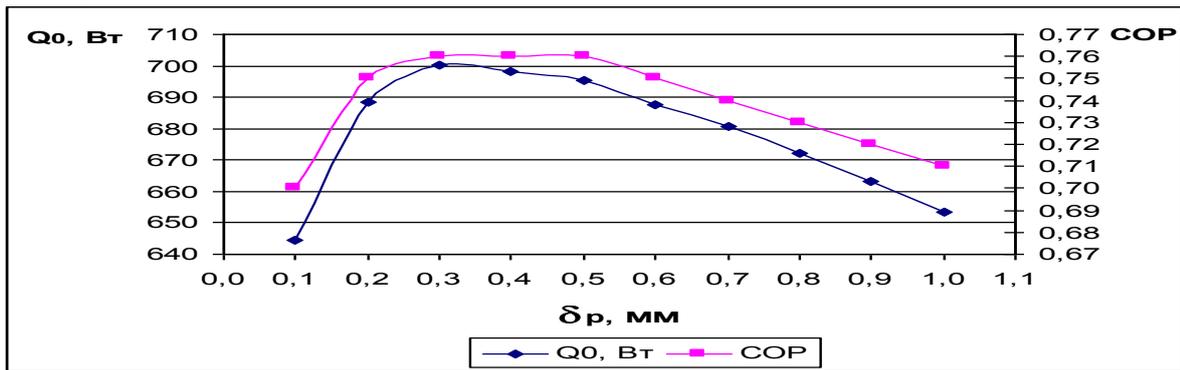


Рис. 7. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от толщины ребра. Высота канала 70 мм, температура воды 35 °С, материал ребра алюминий, межреберное расстояние 2 мм

Fig. 7. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the thickness of the rib. Channel height 70 mm, water temperature 35 °C, fin material aluminum, intercostal distance 2 mm

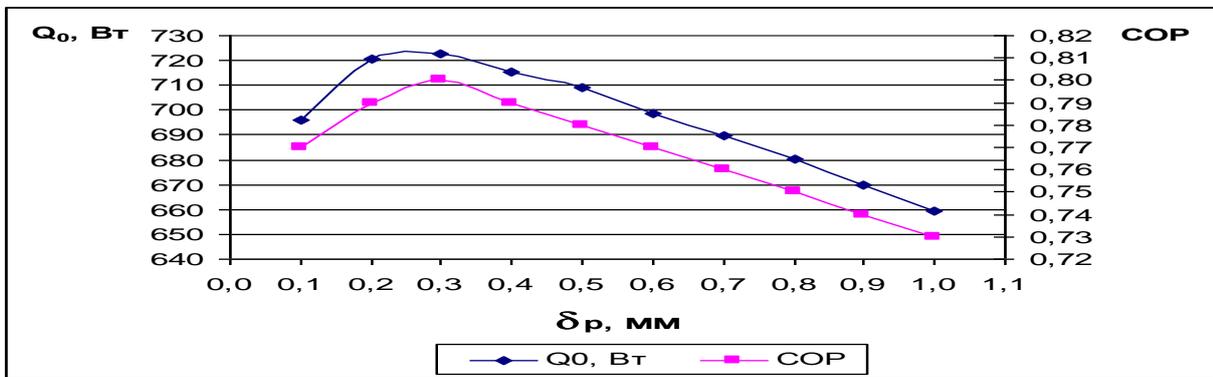


Рис.8. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от толщины ребра. Высота канала 70 мм, температура воды 35 °С, материал ребра медь, межреберное расстояние 2 мм

Fig.8. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the thickness of the rib. Channel height 70 mm, water temperature 35 °C, copper fin material, interturbid distance 2 mm

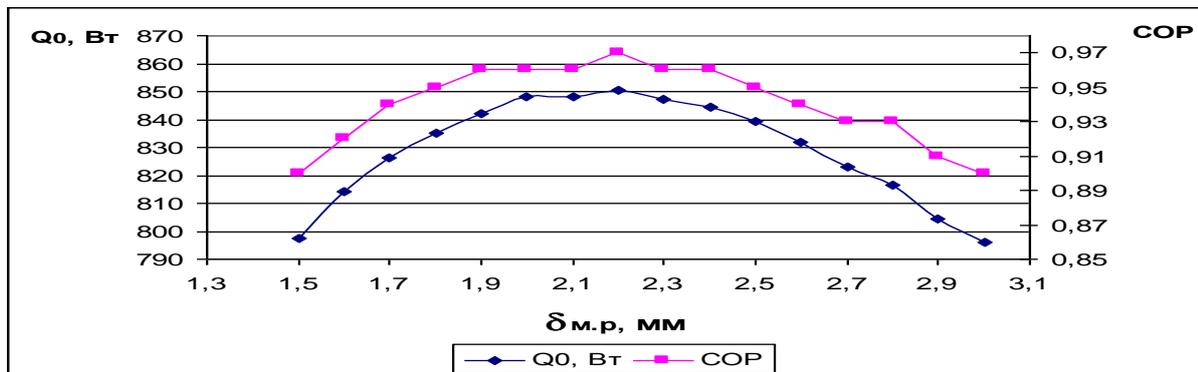


Рис. 9. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от межреберного расстояния. Высота канала 70 мм, температура воды 25 °С, материал ребра медь, толщина ребра 0,3 мм

Fig. 9. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the inter-edge distance. Channel height 70 mm, water temperature 25 °C, copper fin material, rib thickness 0,3 mm

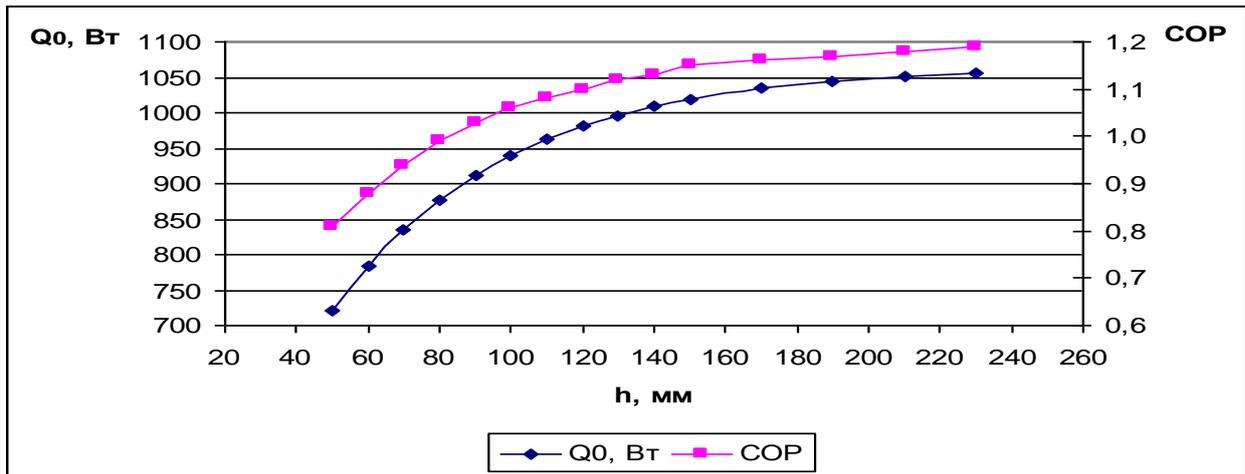


Рис.10. Зависимость холодопроизводительности и коэффициента преобразования от высоты ребра. Температура воды 25 °С, материал ребра медь, толщина ребра 0,5 мм, межреберное расстояние 2 мм

Fig.10. Dependence of the cooling capacity and the conversion coefficient on the height of the edge. Water temperature 25 °С, copper fin material, rib thickness 0,5 mm, interturbid distance 2 mm

Обсуждение результатов. Обобщая полученные в ходе анализа чувствительности результаты, можно определить область наиболее эффективной геометрии теплообменника для рассматриваемой системы.

Наиболее эффективной толщиной ребра из меди является толщина 0,3 ÷ 0,4 мм, при этом следует заметить, что по технологии изготовления ребер его минимальная толщина составляет 0,5 мм. Наиболее эффективным межреберным расстоянием является расстояние 2,2 ÷ 2,3 мм для толщины ребра 0,5 мм. В связи с тем, что при больших значениях высоты канала, рассмотренные характеристики теплообменника меняются незначительно, то в целях снижения металлоемкости и габаритов канала рекомендуется ограничить его высоту величиной 150 мм.

Вывод. Эксергетический анализ составляющих термодинамических потерь в термоэлектрических трансформаторах теплоты показывает, что на данном этапе развития термоэлектрического приборостроения внешние технические потери в реальной системе сопоставимы с внутренними потерями в термоэлементах. Поэтому исследования, направленные на снижение потерь, определяемых техническим решением устройства, не менее актуальны, чем повышение параметра добротности термоэлектрического материала.

В качестве примеров эффективных технических решений предложены тепловые схемы термоэлектрических трансформаторов теплоты с изменением направления тепловых потоков и с теплообменниками на базе двухфазных термосифонов. Классические решения цельнометаллических теплообменников также оптимизированы на основе методологии анализа чувствительности систем.

Библиографический список:

1. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications. Applied Thermal Engineering, Volume 66, Issues 1–2, May 2014, Pages 15-24.
2. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 38, October 2014, Pages 903-916.
3. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: Состояние и перспективы // Холодильная техника, №5, 1999, с. 12-14.
4. Бродянский В.М., Фратшер В, Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-288с.

5. Sulin A.B. New approach to thermoelectric air-cooled subunit configuration // 14th Int. Conf. on Thermoelectrics, St.Petersburg, 1995, pp.453-454.
6. Патент РФ 2112908//Термоэлектрический блок (варианты)//Сулина.Б., Емельянов А.Л., Мощенко В.И., Назарцев А.А. Оpubл. в БИ № 16. 10.06.98, с. 363.
7. Gang Tan, Dongliang Zhao. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material. *Applied Thermal Engineering*, Volume 86, 5 July 2015, Pages 187-198
8. Dongliang Zhao, Gang Tan. Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. *Energy*, Volume 68, Issuenu, Pages 658-666
9. Syed IhtshamulHaq Gilani, Muhammad Hammad Khan, William Pao. Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. *Energy Procedia*. Volume 75, August 2015, Pages 1373–1379
10. Steven P. Benn, Leonard M. Poplaski, Amir Faghri, Theodore L. Bergman. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. *Applied Thermal Engineering*, Volume 104, 5 July 2016, Pages 358-374
11. Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon, Aliakbar Akbarzadeh. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. *Solar Energy*, Volume 105, July 2014, Pages 656-668
12. Wei Jieting^{1,a}, Xiong Linchang^{2,b}, Wang Hao^{1,c}. The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems
13. Anjan Sarkar, Swarup K. Mahapatra. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. *Applied Thermal Engineering*, Volume 69, Issues 1–2, August 2014, Pages 39-45.
14. Xiao Wang, Jianlin Yu, Ming Ma. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric cooling system based on entropy generation analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 63. August 2013, Pages 361-365
15. Lin Zhu, Hongbo Tan, Jianlin Yu. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Conversion and Management*, Volume 76, December 2013, Pages 685-690.
16. Matthieu Cosnier, Gilles Fraisse, Lingai Luo. An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system. *International Journal of Refrigeration*, Volume 31, Issue 6, September 2008, Pages 1051-1062.
17. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

References:

1. Zhao D., Tan G. A review of thermoelectric cooling: materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering*. May 2014; 66(1–2):15-24.
2. Enescu D., Virjoghe E.O. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:903-916.
3. Bulat L.P. Termoelektricheskoye okhlazhdenie: Sostoyanie i perspektivy. *Kholodilnaya tekhnika*. 1999;5:12-14. [Bulat L.P. Thermoelectric cooling: status and prospects. *Refrigerating Engineering*. 1999;5:12-14. (In Russ.)]
4. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya. М.: Energoatomizdat; 1988. 288 s. [Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. Exergic method and its application. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 288 p. (In Russ.)]
5. Sulin A.B. New approach to thermoelectric air-cooled subunit configuration. 14th Int. Conf. On Thermoelectrics, St.Petersburg, 1995. 453-454.

6. Sulin A.B., Emelyanov A.L., Moshchenko V.I., Nazartsev A.A. Termoelektricheskiy blok (varianty). Patent RF 2112908. Opubl. V BI №16. 10.06.98, 363. [Sulin A.B., Emelyanov A.L., Moshchenko V.I., Nazartsev A.A. The thermoelectric unit (options). Patent Russia №2112908. Publ. №16. 10.06.98, 363. (In Russ.)]
7. Tan G., Zhao D. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material. Applied Thermal Engineering. 5 July 2015;86:187-198.
8. Zhao D., Tan G. Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. Energy. 68:658-666.
9. Gilani S.I.H., Khan M.H., Pao W. Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. Energy Procedia. August 2015;75:1373-1379.
10. Benn S.P., Poplaski L.M., Faghri A., Bergman T.L. Analysis of thermosyphon/heat pipe integration for feasibility of dry cooling for thermoelectric power generation. Applied Thermal Engineering. 5 July 2016;104:358-374.
11. Date A., Date A., Dixon C., Akbarzadeh A. Theoretical and experimental study on heat pipe cooled thermoelectric generators with water heating using concentrated solar thermal energy. Solar Energy. July 2014;105:656-668.
12. Jieting W., Linchang X., Hao W. The Study of Thermoelectric Power Generation in The Cooling of Fin and Vibration Heat Pipe. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems
13. Sarkar A., Mahapatra S.K. Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink. Applied Thermal Engineering. August 2014;69(1-2):39-45.
14. Wang X., Yu J., Ma M.. Optimization of heat sink configuration for thermoelectric coolingsystem based on entropy generation analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer. August 2013;63:361-365.
15. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. Energy Conversion and Management. December 2013;76:685-690.
16. Cosnier M., Fraisse G., Luo L. An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system. International Journal of Refrigeration. September 2008;31(6):1051-1062.
17. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Guryeva L.V. Optimizatsiya teploobmennykh protsessov i sistem. M.: Energoatomizdat; 1988. 192 s. [Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Guryeva L.V. Optimization of heat transfer processes and systems. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 192 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Сулин Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры кондиционирования воздуха.

Марченко Андрей Сергеевич – аспирант кафедры кондиционирования воздуха.

Information about the authors.

Alexander B. Sulin – Dr. Sc. (Technical), Prof., Department of air-conditioning.

Andrei S. Marchenko - Graduate student.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 27.09.2016.

Принята в печать 05.11.2016.

Conflict of interest

Received 27.09.2016.

Accepted for publication 05.11.2016.

Для цитирования: 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

For citation: Aslanov T. G., Magomedov Kh. D., Musaeva U. A., Tagirov H. Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic detectors on the accuracy of earthquake hypocentre determination. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):73-84. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕЙСМОДАТЧИКОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИПОЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Асланов Т.Г.¹, Магомедов Х.Д.², Мусаева У.А.³, Тагиров Х.Ю.⁴

¹Северо-Кавказский институт (филиал)

«Всероссийский государственный университет юстиции»,

¹367008, г. Махачкала, ул. Агасиева, 87,

²Дагестанский филиал геофизической службы РАН.

²367008, г. Махачкала, ул. Белинского, 16,

^{3,4}Дагестанский государственный технический университет,

^{3,4}367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70

¹e-mail: tabasik@gmail.com, ²e-mail: dfgsran@mail.ru,

³e-mail: uma9@list.ru, ⁴e-mail: halipa92@yandex.ru

Резюме: Цель. Определить координаты очага землетрясения с минимально возможной ошибкой за счет оптимального выбора сейсмодатчиков. **Метод.** Для нахождения ошибок в определении гипоцентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения трех сейсмодатчиков используются данные скоростей сейсмических волн, разности времен прихода сейсмических волн на сейсмодатчик и заданная ошибка в определении разности времен. По данным с ошибкой и без нее определяются два гипоцентра, разности которых и дают информацию об ошибке определения гипоцентра. Проведен анализ влияния взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения на точность определения координат очага. **Результат.** Установлено, что для повышения точности определения координат эпицентра и гипоцентра землетрясения желательно использовать разные комбинации сейсмодатчиков. Даны рекомендации по их выбору с целью уменьшения ошибки в определении координат очага землетрясения. Получены зависимости ошибки в определении координат гипоцентра от взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения в пространстве, при наличии ошибок в определении расстояния до гипоцентра землетрясения, как в сторону увеличения расстояния, так и в сторону уменьшения для всех сейсмодатчиков в различных вариациях. Для определения зависимости ошибки в определении координат очага от взаимного расположения трех сейсмодатчиков произведено перемещение третьего сейсмодатчика на горизонтальной плоскости по окружности с центром в начале координат. **Вывод.** При выборе сейсмодатчиков необходимо чтобы один из них был перпендикулярным центру отрезка, образованного между двумя другими сейсмодатчиками. Вероятность разнонаправленной ошибки измерения времени прихода волн тем выше, чем ближе расположены сейсмодатчики друг к другу и обусловлена тем, что сейсмические волны проходят близкие по расположению трассы.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмодатчик, сфера, ошибка, уравнение

TECHICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

INFLUENCE OF THE SPATIAL ARRANGEMENT OF SEISMIC DETECTORS ON
THE ACCURACY OF EARTHQUAKE HYPOCENTRE DETERMINATION

Tagirbek G. Aslanov¹, Khaskil J. Magomedov², Uma A. Musayeva³, Khalipa Y. Tagirov⁴.

¹Northern Caucasian Institute (branch) All-Russian State University of Justice,

¹87 Agasiyeva Str, Makhachkala 367008, Russia,

²Dagestan branch of the geophysical service, Russian Academy of Sciences,

²16 Belinsky Str., Makhachkala 367008, Russia,

^{3,4}Dagestan State Technical University,

^{3,4}70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

¹e-mail: tabasik@gmail.com, ²e-mail: dfgsran@mail.ru,

³e-mail: uma9@list.ru, ⁴e-mail: halipa92@yandex.ru

Abstract: Objectives. To determine the coordinates of the seismic focus of an earthquake with a minimum margin of error with the use of an optimal selection of seismic sensors. **Method.** Seismic wave velocity data, relying on the time discrepancies between the registering of seismic waves on the seismic sensor and the defined error in determining the time difference, were used to identify errors in the location of an earthquake's hypocenter depending on the respective positions of three seismic sensors. Discrepancies between data containing an error and those without it used to determine two hypocenters provide information about the hypocenter locating error. An analysis of the influence of the respective arrangements of the seismic sensors and the earthquake epicentre on the accuracy of determination of epicentre coordinates was carried out. **Results.** It is established that, in order to improve the accuracy of epicenter and hypocenter earthquake coordinate determination, it is preferable to use different combinations of seismic sensors. The present recommendations are based on the desire to reduce errors in determining the earthquake source coordinates. Due to earthquake epicenter distance determination errors found in different seismic sensors both with increasing and decreasing distance, the hypocenter coordinate determining error has been found to depend on the respective arrangement of seismic sensors and on the earthquake source's geographical location. In order to determine the dependence of the source coordinate determining error on the relative position of three seismic sensors, the third seismic sensor was displaced on a horizontal plane at the location centered at the coordinate of the origin. **Conclusion.** When selecting seismic sensors it is essential that one of them be located perpendicular to the center of the segment formed by the other two seismic sensors. The probability of a multidirectional error of measurement at the moment of arrival of seismic wave is higher the closer the seismic sensors are to one another; this is due to the fact that seismic waves pass close by the trajectory layout.

Keywords: earthquake, seismic sensor, scope, error, equation

Введение. В настоящее время разработаны программы [1, 2, 3, 4], позволяющие по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек [5, 6, 7], времени суток и т.д. оценить людские потери [8], что способствует оперативному решению вопроса о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов. Однако оценка потерь иногда не соответствуют действительности, в основном, из-за неверного определения глубины очага и эпицентра землетрясения [9-15].

Определение координат очага землетрясения чаще всего производится по разности времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн на разнесенные в пространстве сейсмодатчики [16, 17]. При этом основную ошибку в определении координат очага землетрясения вносит неверный выбор сейсмодатчиков [15, 18, 19], а также разная структура земли на пути прохождения сейсмических волн [20-22].

Постановка задачи. Для нахождения ошибок в определении гипоцентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения трех сейсмодатчиков используются данные скоростей сейсмических волн, разности времен прихода сейсмических волн на сейсмодатчик и заданная ошибка в определении разности времени. По данным с ошибкой и без нее определяются два гипоцентра, разности которых и дают информацию об ошибке определения гипоцентра. С учетом этого в статье приводится метод, позволяющий определить координаты очага землетрясения с минимально возможной ошибкой за счет оптимального выбора сейсмодатчиков.

Методы исследования. Рассмотрим причины возникновения ошибок в определении координат очага землетрясения в случае, когда два сейсмодатчика и очаг расположены на вертикальной плоскости. Пусть сейсмодатчики 1 и 2 (рис. 1) расположены в точках S_1 и S_2 на удалениях R_1 и R_2 от истинного очага землетрясения $O_{и}$. O_p – расчетные координаты очага землетрясения. Δ_1 и Δ_2 – ошибки в определении удалений сейсмодатчиков от очага землетрясения.

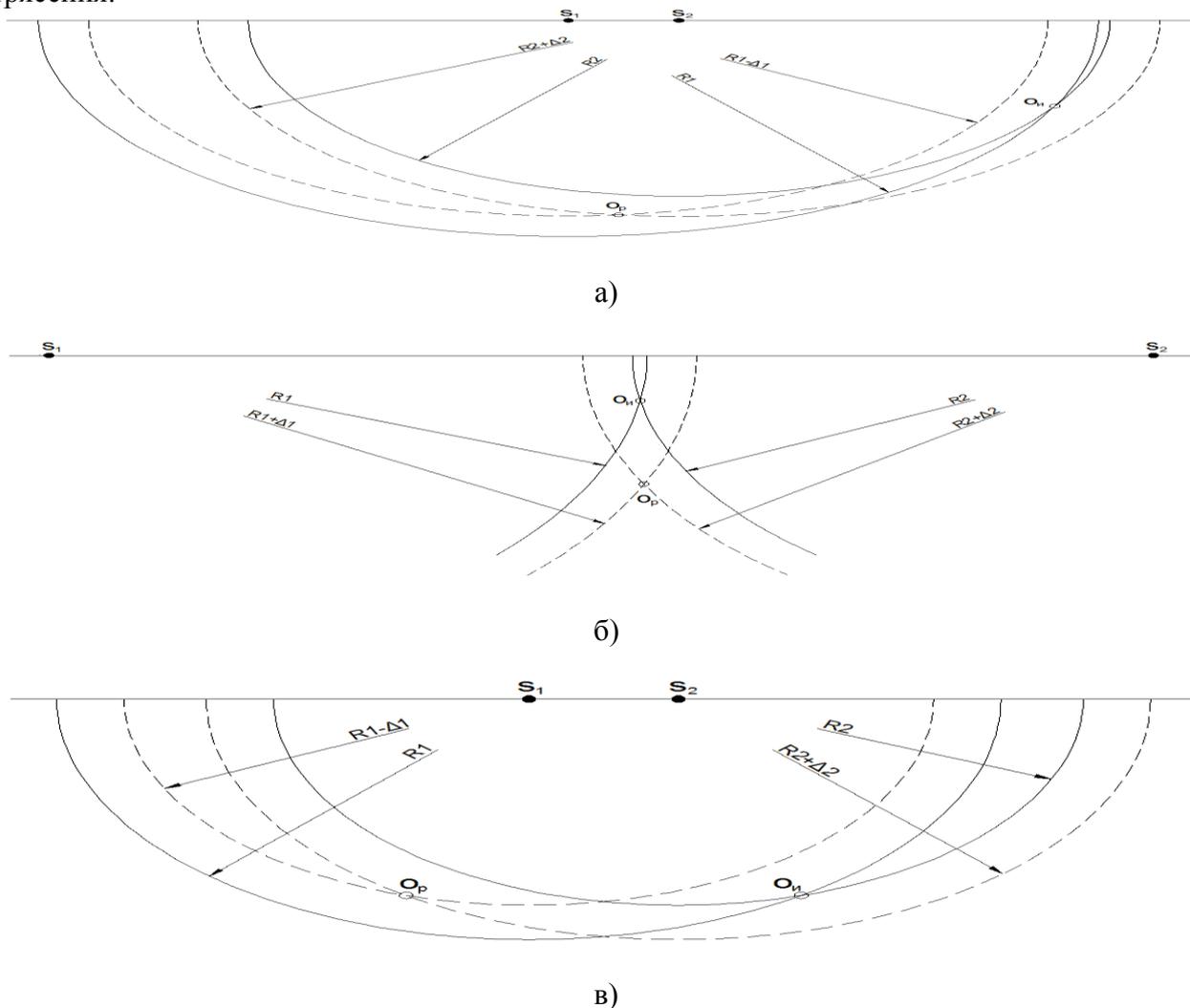


Рис.1. Взаимное расположение сейсмодатчиков и очага землетрясения на плоскости
Fig.1. Mutual arrangement of seismic sensors and earthquake focus in the plane

Анализ рис. 1 показывает, что, когда сейсмодатчики расположены по одну сторону от очага землетрясения (рис. 1а), возникает наибольшая ошибка в определении гипоцентра.

На рис. 1б приведен случай, когда сейсмодатчики расположены по разные стороны от очага землетрясения и значительно удалены друг от друга. В таком случае возникает наибольшая ошибка в определении глубины очага. На рис. 1в приведен случай, когда сейсмодатчики мало удалены друг от друга и от эпицентра, что приводит к возникновению значительной ошибки в определении координат эпицентра землетрясения.

Исходя из изложенного, для повышения точности определения координат очага землетрясения необходимо при расчете глубины очага землетрясения использовать одну комбинацию сейсмодатчиков, а для эпицентра – другую комбинацию.

Для удобства расчетов сейсмодатчик S_1 расположим в начале координат и примем его за опорный. Тогда по теореме Пифагора:

$$\begin{cases} x_0^2 + z_0^2 = R_1^2; \\ (x_2 - x_0)^2 + z_0^2 = R_2^2. \end{cases}$$

где, R_i – расстояние от i -го сейсмодатчика до очага землетрясения, вычисляется по формуле [23];

x_2 – координаты на горизонтальной плоскости второго сейсмодатчика;

V_1, V_2 – соответственно скорости продольной, поперечных волн;

t_i – разность времен прихода продольной и поперечной волн на i -ый сейсмодатчик.

После подстановки z_0 из первого уравнения системы во второе получим

$$\begin{cases} z_0^2 = R_1^2 - x_0^2; \\ x_0 = \frac{x_2^2 + R_1^2 - R_2^2}{2x_2}. \end{cases} \quad (1)$$

Пусть ошибки в показаниях сейсмодатчиков приводят к увеличению расстояния до очага землетрясения (рис. 1б)

$$\begin{cases} z_0^{*2} = R_1^{*2} - x_0^{*2}; \\ x_0^* = \frac{x_2^2 + R_1^{*2} - R_2^{*2}}{2x_2}. \end{cases} \quad (2)$$

где, $R_i^* = R_i + \Delta_i$; x_0^* и z_0^* – вычисленные с ошибкой координаты землетрясения.

Вычтя из первого уравнения системы (1) первое уравнение системы (2) и подставив в них вторые уравнения систем (1) и (2), получим

$$\Delta z_0 = \left| \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{x_2^2 + R_1^2 - R_2^2}{2x_2} \right)^2} - \sqrt{R_1^{*2} - \left(\frac{x_2^2 + R_1^{*2} - R_2^{*2}}{2x_2} \right)^2} \right|. \quad (3)$$

Соответственно, вычтя из второго уравнения системы (1) второе уравнение системы (2), получим

$$\Delta x_0 = \left| \frac{2R_2\Delta_2 - 2R_1\Delta_1 + \Delta_2^2 - \Delta_1^2}{2x_2} \right|. \quad (4)$$

Таким образом, получены математические соотношения, позволяющие вычислять точность определения координат очага землетрясения, при расположении двух сейсмодатчиков и очага землетрясения на вертикальной плоскости, в зависимости от перемещения одного из сейсмодатчиков по оси x .

На рис. 2 приведены графические зависимости, полученные моделированием в среде MatLab уравнений (3) и (4).

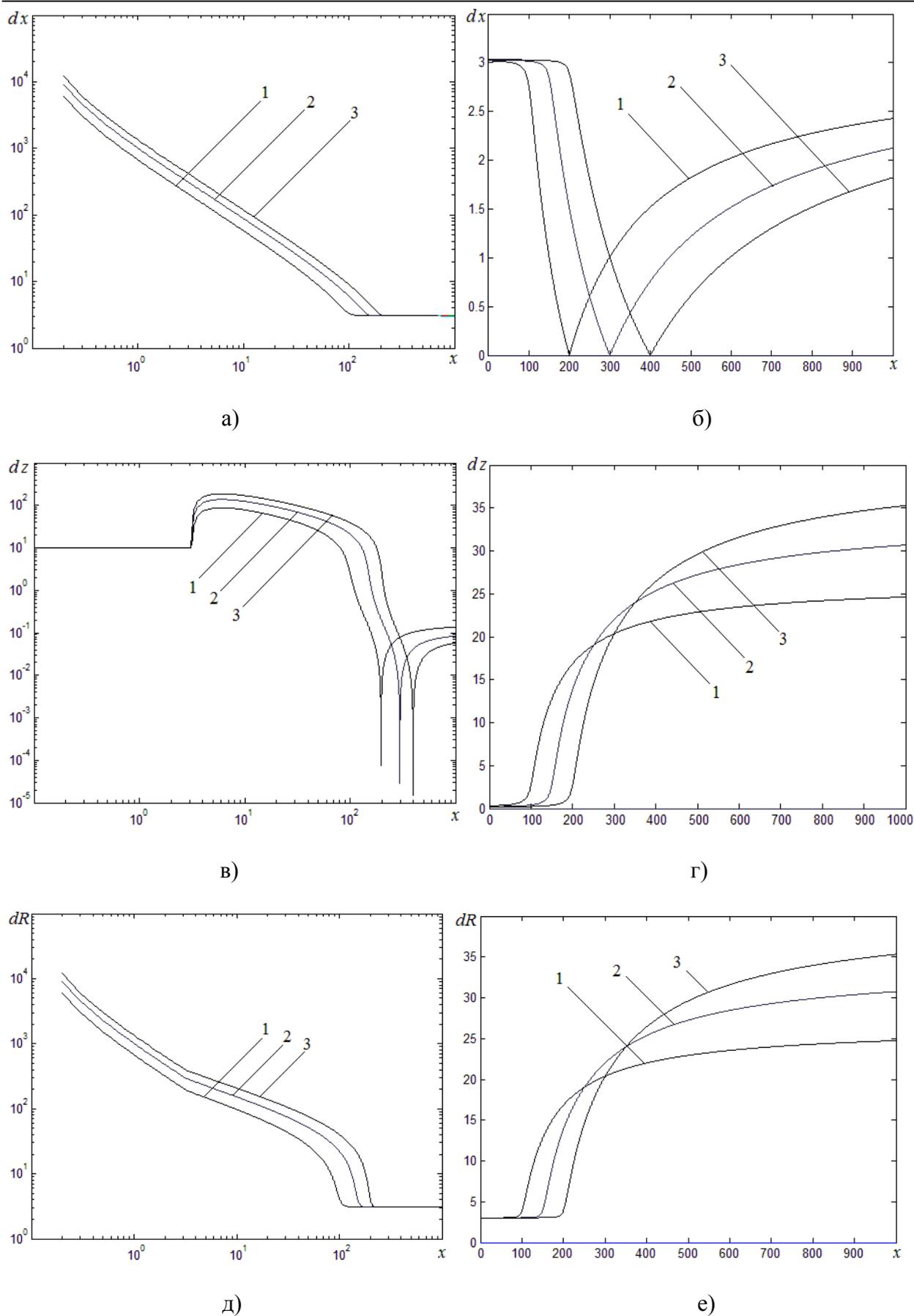


Рис. 2. Ошибки в определении координат очага землетрясения в плоскости
Fig. 2. Errors in determining the coordinates of the earthquake focus in the plane

На рис. 2 (а, в, д) приведены случаи, когда знаки ошибок измерений сейсмодатчиков противоположны, а на рис.2 (б, г, е) соответствуют ошибки, направленные в сторону увеличения расстояния от сейсмодатчиков до очага землетрясения.

При моделировании ошибка измерения разности времен пробега сейсмических волн сейсмодатчиками была принята равной 0,5 с. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют удалениям эпицентра землетрясения от опорного сейсмодатчика на расстоянии 100, 150 и 200 км, соответственно. При этом глубина очага землетрясения принята равной 10 км.

Рассмотрим причины возникновения ошибок в определении координат очага землетрясения с помощью трех сейсмодатчиков. Геометрическим местом положения очага по данным двух сейсмодатчиков будет окружность, полученная пересечением двух сфер с радиусами, равными расстоянию от очага землетрясения до сейсмодатчиков. Если сейсмодатчики произвольно перемещать относительно очага землетрясения по прямой, проходящей через точки расположения сейсмодатчиков, то радиус и положение окружности на этой прямой будут оставаться неизменными.

Ранее нами для удобства рассматривался случай расположения двух сейсмодатчиков и очага землетрясения на вертикальной плоскости.

Полученные выше выводы также справедливы при любом расположении двух сейсмодатчиков и очага землетрясения. В дальнейшем примем центр окружности, полученный при пересечении двух сфер, за начало трехмерной прямоугольной системы координат.

Тогда, в соответствии с пространственной теоремой Пифагора, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} x_0^2 + z_0^2 = R_1^2; \\ (\alpha_2 - x_0)^2 + y_2^2 + z_0^2 = R_2^2. \end{cases} \quad (5)$$

После подстановки z_0 из первого уравнения системы (5) во второе получим:

$$\begin{cases} z_0^2 = R_1^2 - x_0^2; \\ x_0 = \frac{x_2^2 + y_2^2 + R_1^2 - R_2^2}{2x_2}. \end{cases}$$

Выразим декартовы координаты x_2 и y_2 в полярных с началом системы координат в центре окружности через азимут α и полярный радиус R_3 . Азимут α это угол, на который нужно повернуть полярный радиус в плоскости XY по часовой стрелке. Угол α равный нулю, соответствует перпендикуляру, проходящему через окружность в ее центре.

$$\begin{cases} z_0^2 = R_1^2 - x_0^2; \\ x_0 = \frac{R_3^2 + R_1^2 - R_2^2}{2R_3 \cos \alpha}. \end{cases}$$

Как и в случае решения задачи на плоскости, предположим, что определение расстояния от очага землетрясения до сейсмодатчика производится с ошибкой. Тогда получим математические соотношения, определяющие точность нахождения координат очага землетрясения в пространстве

$$\begin{cases} \Delta x = \left| \frac{2R_2 \Delta_2 - 2R_1 \Delta_1 + \Delta_2^2 - \Delta_1^2}{2R_3 \cos \alpha} \right|; \\ \Delta z = \left| \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_3^2 + R_1^2 - R_2^2}{2R_3 \cos \alpha} \right)^2} - \sqrt{R_1^{*2} - \left(\frac{R_3^2 + R_1^{*2} - R_2^{*2}}{2R_3 \cos \alpha} \right)^2} \right|. \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 3 приведены зависимости, полученные в результате моделирования в среде MatLab системы уравнений (6).

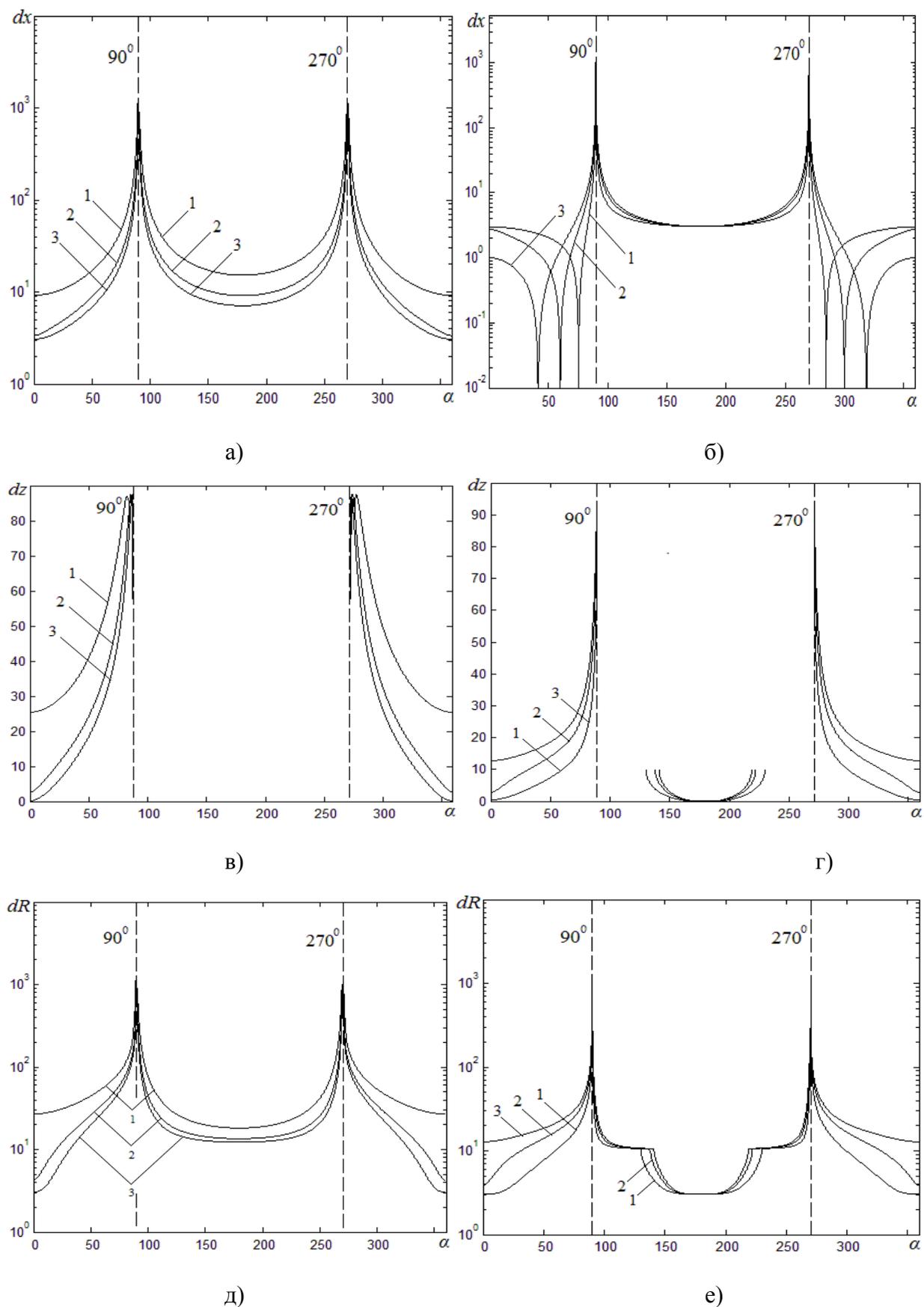


Рис. 3. Ошибки в определении координат очага землетрясения
Fig. 3. Errors in determining the coordinates of the source of the earthquake

Рисункам 3 (а, в, д) соответствует случай, когда ошибки вычисления окружности, полученной по данным двух сейсмодатчиков и третьего сейсмодатчика противоположны, а рисункам 3 (б, г, е) – случай, когда ошибки направлены в сторону увеличения расстояния от сейсмодатчика до очага землетрясения.

Ошибка измерения времени была принята равной 0,5 с, кривые 1, 2 и 3 соответствуют случаям отдаленности эпицентра землетрясения от опорного сейсмодатчика на 50, 100, 150 км соответственно при глубине очага землетрясения 10 км.

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы предложен способ и алгоритм для уточнения координат очага землетрясения выбора сейсмодатчиков с целью повышения точности определения глубины очага и эпицентра землетрясения.

Применение методики на практике позволит повысить точность определения координат очага землетрясения, что даст возможность оперативно решать вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов.

Следует также отметить, что эта задача решается методами комбинаторики, что может потребовать больших временных затрат.

В связи с этим следует автоматизировать процесс выбора сейсмодатчиков для нахождения координат очага землетрясения.

Вывод. По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы и комментарии:

1. По рисункам 2в, 3д и 3е часть графика отсутствует в связи с его комплексным значением, что обусловлено отсутствием пересечения окружностей (или окружности и сферы).

2. Целесообразно выбирать один из сейсмодатчиков вблизи эпицентра землетрясения, либо чтобы угол между двумя сейсмодатчиками и очагом землетрясения был близким к прямому, в последнем случае, величина ошибки равна корню квадратному из суммы квадратов приращений ошибок в определении расстояний от сейсмодатчиков до очага землетрясения.

3. При выборе сейсмодатчиков необходимо, чтобы один из них был перпендикулярным центру отрезка, образованного между двумя другими сейсмодатчиками.

4. Вероятность разнонаправленной ошибки измерения времени прихода волн тем выше, чем ближе расположены сейсмодатчики друг к другу и обусловлена тем, что сейсмические волны проходят близко по расположению трассы.

Библиографический список:

1. Шахриманьян М.А., Нигметов Г.М., Сосунов И.В. Математическое моделирование как способ поддержки принятия решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций // Каталог «Пожарная безопасность» - 2003. – С. 240-241.

2. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике / В.Г. Гитис, Б.В. Ермаков — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.— 256 с.

3. Jing Z., Laurie G. B., Magaly K.. 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

4. Rui J., Shuanggen J. Ionospheric acoustic 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

5. 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

6. 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
7. 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
8. 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
9. 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.
10. 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
11. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. / И.П. Добровольский— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. —240 с.
12. Гуревич П.С. Психология чрезвычайных ситуаций учебное пособие/ П.С. Гуревич — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012.— 495 с.
13. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография/ О.В. Мкртычев — М.: МГСУ, 2010.— 152 с.
14. 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
15. 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.
16. 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
17. 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
18. Асланов Т.Г., Алимерденов В.Ш. Определение структуры земли по статистическим данным времен прихода сейсмических волн произошедших землетрясений // Старт в будущее – 2013. Труды III научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург.
19. Асланов Г.К., Гаджиев М.М., Исмаилов Т.А., Магомедов Х.Д. О землетрясениях (прошлое и современность). – Махачкала, Информационно полиграфический центр ДГТУ. 2001.
20. Быстрицкая Ю.В. Соотношение и сопоставление макросейсмических и инструментальных данных (дагестанские землетрясения). Сборник «Сейсмичность и гидрогеогазохимия территории Дагестана. Вып. 2 (17).- Махачкала 1978.
21. Асланов Г.К., Гаджиев М.М., Исмаилов Т.А., Магомедов Х.Д. О землетрясениях. (Прошлое, современность, прогноз). – Махачкала, ИПЦ ДГТУ, 2001. - 98 стр.
22. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли / [А.С. Алексеев и др.] ; отв. ред. Б. Г. Михайленко, М. И. Эпов ;

Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Институт вычислительной математики и математической геофизики [и др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 310 с.

23. 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.

References:

1. Shakhrimanyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoye modelirovanie kak sposob podderzhki prinyatiya resheniy v sluchaye vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy. Katalog "Pozharnaya bezopasnost". 2003. 240-241. [Shakhrimanyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way of decision support in case of emergencies. Catalogue "Fire Safety". 2003. 240-241.(In Russ.)]

2. Gitis V.G., Ermakov B.V. Osnovy prostranstvenno-vremennogo prognozirovaniya v geoinformatike. M.: FIZMATLIT, 2004. 256 s. [Gitis V.G., Ermakov B.V. Fundamentals of space-time forecasting in geoinformatics. Moscow: Fizmatlit; 2004. 256 p. (In Russ.)]

3. Jing Z., Laurie G. B., Magaly K. Mapping earthquake induced liquefaction surface effects from the 2011 Tohoku earthquake using satellite imagery. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. 2328-2331.

4. Rui J., Shuanggen J. Ionospheric acousitic 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. 3956-3959.

5. 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 Geo-science and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. 4255-4258.

6. 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. 7338-7341.

7. 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. 4742-4745.

8. 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). 2016.1-4.

9. Radoutskiy V.Yu. Vetrova Yu.V., Vasyutkina D.I. Opasnyye prirodnyye protsessy: ucheb. posobie. Pod red. V.Yu. Radoutskogo. Belgorod: Izd-vo BGTU; 2013. 206 s. [Radoutskiy V.Yu. Vetrova Yu.V., Vasyutkina D.I. Dangerous natural processes: study guide. In: V.Yu. Radoutsky (Ed.).Belgorod: BSTU Publ.; 2013. 206 p. (In Russ.)]

10. Arkhangelskiy 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. [Arkhangelskiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Guidelines for the production and processing of observations at seismic stations of the USSR. Academy of Sciences of the USSR. Council on Seismology. Moscow: Acad. of Sciences of the USSR Publ; 1954. (In Russ.)]

11. Dobrovolskiy I.P. Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya. M.: FIZMATLIT; 2009. 240 s. [Dobrovolskiy I.P. The mathematical theory of training and tectonic earthquake prediction. Moscow: Fizmatlit; 2009. 240 p. (In Russ.)]

12. Gurevich P.S. Psikhologiya chrezvychaynykh situatsiy: uchebnoye posobie. M.: YuNITI-DANA; 2012. 495 s. [Gurevich P.S. Psychology of emergencies: Tutorial. Moscow: Yuniti-Dana; 2012. 495 p. (In Russ.)]

13. Mkrtychev O.V. Bezopasnost zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynykh vozdeystviyakh: monografiya. M.: MGSU; 2010. 152 s. [Mkrtychev O.V. Safety of buildings and structures under seismic and emergency actions: Monograph. Moscow: MSUCE; 2010. 152 p. (In Russ.)]
14. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Aslanov G.K., Alimerdenov V.Sh. Matematicheskaya model rascheta energeticheskogo klassa, intensivnosti i magnitudy zemletryaseniya v realnom masshtabe vremeni. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Makhachkala: DGTU; 2015;2(37):66-71. [Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Aslanov G.K., Alimerdenov V.Sh. A mathematical model for calculating energy class, intensity and magnitude of the earthquake in real time. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. Makhachkala: DSTU; 2015;2(37):66-71. (In Russ.)]
15. Aslanov T.G. Razrabotka algoritma opredeleniya koordinat ochaga zemletryaseniya, s odnovremennym opredeleniem skorostey seysmicheskikh voln. Nauchnyye trudy molodykh issledovateley programmy "Shag v budushcheye". Tom 8. "Professional". Moskva; 2005. 32-34. [Aslanov T.G. Development of the algorithm for determining the coordinates of earthquake with simultaneous determination of seismic velocities. Proceedings of Young Researchers Program "Step into the Future". Part 8. "Professional". Moscow; 2005. 32-34. (In Russ.)]
16. 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, 109-112.
17. 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. 1201-1205.
18. Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Opredelenie struktury zemli po statisticheskim dannym vremen prikhoda seysmicheskikh voln proizoshedshikh zemletryaseniyy. Start v budushchee – 2013. Trudy III nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov. Sankt-Peterburg. [Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Determining the structure of the Earth according to the statistics of arrival times of seismic waves of occurred earthquakes. Start the future – 2013. III Proceedings of the Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists. St. Petersburg. (In Russ.)]
19. Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. O zemletryasenyakh (proshloye i sovremennost). Makhachkala: Informatsionno poligraficheskiiy tsentr DGTU; 2001. [Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. About earthquakes (past and present). Makhachkala: Dagestan State Technical University Informational Publishing Center; 2001. (In Russ.)]
20. Bystritskaya Yu.V. Sootnoshenie i sopostavlenie makroseysmicheskikh i instrumentalnykh dannykh (dagestanskiiye zemletryaseniya). Sbornik "Seysmichnost i gidrogeogazokhimiya territorii Dagestana". Makhachkala; 1978;2(17). [Bystritskaya Yu.V. Correlation and comparison of macroseismic and instrumental data (Dagestan earthquake). Seismicity and gidrogeogazokhimiya Dagestan. Makhachkala; 1978;2(17). (In Russ.)]
21. Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. O zemletryasenyakh. (Proshloye, sovremennost, prognoz). Makhachkala: IPTs DGTU; 2001. 98 p. [Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. About earthquakes. (Past, present, forecast). Makhachkala: Dagestan State Technical University CPI; 2001. 98 p. (In Russ.)]
22. Alekseev, A.S. i dr. Metody resheniya pryamykh i obratnykh zadach seysmologii, elektromagnetizma i eksperimentalnyye issledovaniya v problemakh izucheniya geodinamicheskikh protsessov v kore i verkhney mantii Zemli. Otv. red. B. G. Mikhaylenko, M. I. Epov; Ros. akad. nauk, Sib. otdelenie, Institut vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy geofiziki [i dr.]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN; 2010. 310 s. [Alekseev, A.S. et al. Methods for solving the direct and inverse problems of seismology, electromagnetism and experimental research in the study of the problems of geodynamic processes in the crust and upper mantle of the Earth. In: B.G. Mikhailen-

ko, M.I. Epov (Eds.); Ros. Acad. Sciences, Sib. Branch, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics et al. Novosibirsk: Publishing House of the SB RA; 2010. 310 p. (In Russ.)]

23. Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniem skorostey seismicheskikh voln. Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN, Materialy. Makhachkala: Izdatelstvo DNTs RAN; 2010. 54-59. [Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. About the method of seismic center determination with simultaneous understanding of speeds of seismic waves. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Makhachkala: DSCRASPubl.; 2010. 54-59. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Северо-Кавказский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Всероссийский государственный университет юстиции».

Магомедов Хаскил Джарулаевич - заместитель директора Дагестанского филиала Геофизической службы РАН.

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

Тагиров Халипа Юсупович – аспирант.

Information about the authors.

Tagirbek G. Aslanov – Cand. Sc. (Technical), Deputy Director for Research, North Caucasus Institute (branch «All-Russian State University of Justice»).

Khaskil J. Magomedov - Deputy Director, Dagestan Branch of the Geophysical Service, Russian Academy of Sciences.

Uma A. Musaeva – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., Department of management and informatici tehnicheskikh systems and computing.

Khalipa Y.Tagirov – Postgraduate student.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 12.10.2016.

Принята в печать 20.12.2016.

Conflict of interest

Received 12.10.2016.

Accepted for publication 20.12.2016.

Для цитирования: Баламирзоев А.Г., Баламирзоева Э.Р., Магомедова М.Р. Математическое моделирование процесса растворения и выноса солей при фильтрации в трещиноватых породах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):85-94. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-85-94

For citation: Balamirzoev A.G., Balamirzoeva E.R., Magomedova M.R. Mathematical modeling of the process of resorption and salt depletion by filtration in fissured rock strata. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43(4):85-94. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-85-94

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 624.131.54

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-85-94

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТВОРЕНИЯ И ВЫНОСА СОЛЕЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ

Баламирзоев А.Г.¹, Баламирзоева Э.Р.², Магомедова М.Р.³.

¹⁻³Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,

¹e-mail: abdul2000@yandex.ru, ²e-mail: b.esmira@yandex.ru, ³e-mail n-guseinova@mail.ru

Резюме: Цель. Применить методы математического моделирования процесса растворения и выноса солей при фильтрации в трещиноватых загипсованных породах. Поскольку увеличение раскрытия трещин за счет растворения их стенок происходит при движении воды по трещинам пород, содержащих растворимые включения, то за счет изменения пористости и трещиноватости пород увеличиваются фильтрационные расходы и скорость фильтрации, что может привести к просадкам оснований. **Метод.** Рассмотрен процесс для наиболее простой схемы одиночной заполненной дисперсным материалом трещины длиной l и шириной $2h$; скорость фильтрации считается постоянной и равной v . Для решения полученного параболического уравнения используется экономичная разностная схема переменных направлений (продольно-поперечная схема), которая является абсолютно устойчивой и требует на каждом временном шаге решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с трехдиагональной матрицей. **Результат.** Приведен алгоритм, составлена и отлажена программа для расчета распределения концентраций по трещине в среде DELFI. Обобщены численные результаты расчета распределений концентраций раствора в заполненной трещине. **Вывод.** Наряду с известными методами, приведенный алгоритм может быть использован при моделировании процесса растворения и выноса солей при фильтрации в трещиноватых породах.

Ключевые слова: фильтрация, трещина, диффузия, математическая модель, расчетная схема, устойчивость

TECHICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF RESORPTION AND
SALT DEPLETION BY FILTRATION IN FISSURED ROCK STRATA

Abdul G. Balamirzoev¹, Esmira R. Balamirzoeva², Milada R. Magomedova³

¹⁻³ Daghestan State Technical University,

¹⁻³ 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

¹ e-mail abdul2000@yandex.ru, ² e-mail b.esmira@yandex.ru, ³ e-mail n-guseinova@mail.ru

Abstract: Objectives. A mathematical modeling method is used to describe the process of resorption and salt depletion by filtration through fractured gypsified rock strata. Since the increase in the opening of crevasses due to resorption of their walls from water percolating through rock fractures containing soluble contaminants, a change in the porosity and fracturing of rocks increases filtration rate and Darcy flux leading to foundation subsidence. **Method.** A process for the simplest schema with a single particulate material filling a fissure of length l and width $2h$ is examined; the filtration rate is considered constant and equal to v . To solve the resulting parabolic equation the economical difference scheme of alternating directions (convergence formula) is used; this is totally stable and requires simultaneous linear algebraic equations (SLAE) equations with a tridiagonal matrix at each stage of the solution. **Results.** An algorithm, compiled and programmed to calculate the distribution of concentrations in the fissure using DELPHI programming language, is proposed. Numerical results are summarised due to dissolution concentration distinction in the filled fissure. **Conclusion.** Using a modified algorithm, the compiled and debugged program using DELPHI programming language allows the distribution of concentrations to be calculated.

Keywords: filtering, fissure, diffusion, mathematical model, formula, stability

Введение. При строительстве плотин на гипсоносных породах необходимо проводить тщательные инженерно-геологические изыскания, в том числе, предусматривающие математическое моделирование обоснования противофильтрационных мероприятий и необходимость защиты основания гидротехнического сооружения.

Постановка задачи. Возникает объективная потребность в постановке новых или совершенствовании известных методов математического моделирования гидрогеологии при оценке структуры и геометрических особенностей трещиноватости скальных пород.

Методы исследования. В данное время математическое моделирование является основным инструментом для поиска оптимального сценария эксплуатации гидротехнических сооружений на различных этапах проектирования. Это связано с дороговизной проведения натуральных экспериментов, а также большим количеством факторов, которые влияют на результат [1,5,6,13,14].

Увеличение раскрытия трещин за счет растворения их стенок происходит при движении воды по трещинам пород, содержащих растворимые включения. При этом за счет изменения пористости и трещиноватости пород увеличиваются фильтрационные расходы и скорость фильтрации, что может привести к просадкам оснований.

Рассмотрим процесс для наиболее простой схемы одиночной, заполненной дисперсным материалом, трещины длиной l и шириной $2h$; скорость фильтрации считается постоянной и равной v [2,3]. В прямоугольной области описывается уравнением нестационарной конвективной диффузии процесс растворения и выноса солей из трещины в имеющихся условиях [4,7,9]:

$$D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$C(x, y, 0) = C(x, 0, t) = C_0, \quad (2)$$

$$C(0, y, t) = \partial C(l, y, t) / \partial x = 0, \quad (3)$$

$$\partial C(x, h, t) / \partial y = 0 \quad (4)$$

Применяя к (1) интегральное преобразование Лапласа по переменной t и учитывая начальное условие (2), будем иметь

$$D_1 \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} - v \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - n_0 p \left(\bar{c} - \frac{c_0}{p} \right) = 0, \quad (5)$$

причем $\bar{c}(x, y, p) = \int_0^\infty c(x, y, t) e^{-pt} dt$; p — параметр преобразования.

Граничные условия (2)-(4) также могут быть представлены в форме изображений:

$$\bar{c}(0, y, p) = \bar{c}(l, y, p) = 0; \quad (6)$$

$$\bar{c}(x, 0, p) = c_0 / p; \quad \partial \bar{c}(x, h, p) / \partial y = 0 \quad (7)$$

Последующее упрощение хода решения задачи может быть достигнуто при помощи конечного синус-преобразования Фурье по переменной y в форме

$$u(x, \lambda_n, p) = \int_0^h u(\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi.$$

В то же время, параметр преобразования может принимать ряд значений, которые определяются из уравнения $\cos \lambda_n h = 0$, т. е.

$$\lambda_n = \frac{2n-1}{h} \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Определив изображения постоянной $n_0 c_0 \div n_0 c_0 / \lambda_n$ и второй производной $\partial^2 \bar{c} / \partial y^2 \div -\lambda_n^2 u(\lambda_n) + c_0 \lambda_n / p$, которые включают граничные условия (6), получим следующее одномерное уравнение для $u(x, \lambda_n, p)$:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{v}{D_1} \frac{du}{dx} - \frac{n_0}{D_1} \left(p + \frac{D_2}{h_0} \lambda_n^2 \right) \left(u - \frac{c_0}{p \lambda_n} \right) = 0 \quad (9)$$

Данное выражение должно решаться при следующих граничных условиях

$$u(0, \lambda_n, p) = u(l, \lambda_n, p = 0). \quad (10)$$

Общее решение (9) представим в следующем виде

$$u - \frac{c_0}{p \lambda_n} = A_1 e^{\eta_1 x} + A_2 e^{-\eta_2 x}, \quad (11)$$

где,
$$\eta_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{4n_0}{D_1} \left(p + \frac{D_2}{n_0} \lambda_n^2 \right) + \frac{v^2}{D_1^2}} \pm \frac{v}{D_1} \right].$$

Подстановка (11) в условия (10) дает возможность определить постоянные

$$A_1 = -\frac{c_0}{p\lambda_n} \frac{1 - e^{-\eta_2 l}}{e^{\eta_1 l} - e^{-\eta_2 l}}; \quad A_2 = \frac{c_0}{p\lambda_n} \frac{1 - e^{-\eta_1 l}}{e^{\eta_1 l} - e^{-\eta_2 l}}.$$

С учетом имеющихся значений постоянных, частное решение (9) представляется в виде

$$u = \frac{c_0}{p\lambda_n} \left[1 - e^{-v(l-x)/2D_1} \frac{\text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}x}{\text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}l} - e^{vx/2D_1} \frac{\text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}(l-x)}{\text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}l} \right], \quad (12)$$

где, $a = \frac{D_2}{n_0} \lambda_n^2 + \frac{v^2}{4D_1 n_0}$.

Обратный переход к функции c осуществляется по формуле обращения

$$\bar{c}(x, y, p) = \frac{2}{h} \sum_{n=1}^{\infty} u(\lambda_n) \sin \lambda_n y$$

Считаем, что $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n y}{\lambda_n} = \frac{h}{2}$,

тогда, имеем

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = \frac{1}{p} - \frac{2}{h} e^{vx/2D_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[e^{-v(l-x)/2D_1} \text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}x + \text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}(l-x) \right] \sin \lambda_n y}{p\lambda_n \text{sh}\sqrt{n_0(p+a)/D_1}l} \quad (13)$$

Благодаря теореме разложения можно перейти к оригиналу в последнем выражении, что дает окончательное решение для распределения концентраций в сечении трещины.

Опуская промежуточные выкладки, представим это выражение в следующем виде [10,11,12,15]:

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} = & 1 - \frac{2}{h^0} e^{\xi x^0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\text{sh}v_n x^0 e^{-\xi} + \text{sh}v_n(1-x^0)] \sin \zeta_n h^0 y^0}{\zeta_n \text{sh}v_n} - \\ & - \frac{4}{h^0} e^{\xi x^0} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} \mu_k [\sin \mu_k x^0 e + \sin \mu_k(1-x^0)] \sin \zeta_n h^0 y^0}{\zeta_n (\mu_n^2 + v_n^2)} \times \\ & \times \exp \left[\frac{1}{2} (\mu_k^2 + v_n^2) \frac{\mathcal{G}}{\xi} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь,

$$\zeta_n = \frac{2n-1}{2h^0} \pi; \quad v_n = \sqrt{D^0 \zeta_n^2 + \xi}; \quad \mu_k = k\pi; \quad h^0 = h/l; \quad x^0 = x/l; \quad y^0 = y/h;$$

$D^0 = D_2/D_1$; $\xi = vl/2D_1$ – критерий Пекле; $\mathcal{G} = vt/l n_0$ – критерий Струхаля или

кратность обмена жидкости в трещине.

Обсуждение результатов. Для построения расчетной схемы выполним «обезразмеривание» уравнения (1). Связь между размерными и безразмерными величинами зададим в виде:

$$\bar{x} = x/l, \quad \bar{y} = y/h, \quad \bar{t} = t/t_0, \quad \bar{C} = C/C_0$$

где l, h, t_0, C_0 - характерные масштабы. В новых «безразмерных» переменных уравнение (1) примет вид:

$$\frac{n_0 C_0}{t_0} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} = \frac{D_1 C_0}{l^2} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{D_2 C_0}{h^2} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} - \frac{\nu C_0}{l} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} \quad (15)$$

Его решение мы ищем в квадратной области $0 \leq \bar{x} \leq 1, 0 \leq \bar{y} \leq 1$.

Преобразуем (15), умножив на $\frac{t_0}{n_0 C_0}$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} = \frac{D_1 t_0}{n_0 l^2} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{D_2 t_0}{n_0 h^2} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} - \frac{\nu t_0}{n_0 l} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}}$$

Масштаб по времени t_0 определим из дополнительного условия: $\frac{D_1 t_0}{n_0 l^2} = 1$.

Откуда $t_0 = \frac{n_0 l^2}{D_1}$. С учетом этого, имеем:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + D_0 \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} - \nu_0 \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}}, \quad (16)$$

где, $D_0 = \frac{D_2 l^2}{D_1 h^2}, \nu_0 = \frac{l \nu}{D_1}$.

Начальное условие в «безразмерных» переменных принимает вид:

$$\bar{C}(\bar{x}, \bar{y}, 0) = 1 \quad (17a)$$

А краевые условия:

$$\bar{C}(0, \bar{y}, \bar{t}) = 0 \quad (17б)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}}(1, \bar{y}, \bar{t}) = 0 \quad (17в)$$

$$\bar{C}(\bar{x}, 0, \bar{t}) = 1 \quad (17г)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{y}}(\bar{x}, 1, \bar{t}) = 0 \quad (17д)$$

При выборе схемы решения (16),(17) будем исходить из следующих соображений:

- устойчивость расчетной схемы;
- вычислительная эффективность;
- простота алгоритма.

Поскольку в «безразмерных» переменных расчетная область имеет вид параллелепипеда $1 \times 1 \times T$, естественным является использование метода сеток.

Как известно из литературы [8], явная схема для параболического уравнения (16) устойчива при ограничении на шаг по времени $\tau \leq \frac{\max(h_x^2, h_y^2)}{2 \max(D_0, 1)}$, а неявная схема – абсолютно устойчива, но требует на каждом временном шаге решения системы из $N_x \times N_y$ линейных алгебраических уравнений. Что при использовании метода Гаусса требует $O((N_x N_y)^3)$ шагов. Выходом является использование экономичной разностной схемы переменных направлений (продольно-поперечная схема), которая является абсолютно устойчивой и требует на каждом временном шаге решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с трехдиагональной матрицей.

Для его применения к нашей задаче построим в расчетной области равномерную сетку:

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= ih_x, \quad i = 0, \dots, N_x, \quad h_x = \frac{1}{N_x} \\ \bar{y}_j &= jh_y, \quad j = 0, \dots, N_y, \quad h_y = \frac{1}{N_y} \\ \bar{t}_k &= k\tau, \quad k = 0, \dots, N_t, \quad \tau = \frac{t_{end}}{N_t} \end{aligned}$$

Запишем на данной сетке аппроксимацию производных по координатам на k -м временном слое:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial \bar{x}} &= \frac{\bar{C}_{i+1,j}^k - \bar{C}_{i-1,j}^k}{2h_x} \\ \frac{\partial^2 \bar{C}^k}{\partial \bar{x}^2} &= \frac{\bar{C}_{i+1,j}^k - 2\bar{C}_{i,j}^k + \bar{C}_{i-1,j}^k}{h_x^2} \\ \frac{\partial^2 \bar{C}^k}{\partial \bar{y}^2} &= \frac{\bar{C}_{i,j+1}^k - 2\bar{C}_{i,j}^k + \bar{C}_{i,j-1}^k}{h_y^2} \end{aligned}$$

Следуя [1] проведем декомпозицию дифференциального оператора в правой части к двум операторам $\Delta_x = \frac{\partial^2}{\partial \bar{x}^2} - \nu_0 \frac{\partial}{\partial \bar{x}}$ и $\Delta_y = D_0 \frac{\partial^2}{\partial \bar{y}^2}$ и будем осуществлять переход от k -го временного слоя к $k+1$ через промежуточный слой $k + \frac{1}{2}$:

$$\frac{\bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{ij}^k}{0,5\tau} = \frac{\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}} + \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} - \nu_0 \frac{\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2h_x} + D_0 \frac{\bar{C}_{ij+1}^k - 2\bar{C}_{ij}^k + \bar{C}_{ij-1}^k}{h_y^2} \quad (18a)$$

$$\frac{\bar{C}_{ij}^{k+1} - \bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}}}{0,5\tau} = \frac{\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}} + \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{h_x^2} - \nu_0 \frac{\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2h_x} + D_0 \frac{\bar{C}_{ij+1}^{k+1} - 2\bar{C}_{ij}^{k+1} + \bar{C}_{ij-1}^{k+1}}{h_y^2} \quad (18б)$$

Перегруппировав слагаемые получаем две СЛАУ с трехдиагональной матрицей:

$$\left(\frac{\nu_0 \tau}{4h_x} + \frac{\tau}{2h_x^2} \right) \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \left(1 + \frac{\tau}{h_x^2} \right) \bar{C}_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \left(\frac{\tau}{2h_x^2} - \frac{\nu_0 \tau}{4h_x} \right) \bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} = -\bar{C}_{ij}^k - \frac{D_0 \tau}{2h_y^2} (\bar{C}_{i,j+1}^k - 2\bar{C}_{i,j}^k + \bar{C}_{i,j-1}^k) \quad (19a)$$

$$\frac{D_0\tau}{2h_y^2} \bar{C}_{i,j-1}^{k+1} - \left(1 + \frac{D_0\tau}{h_y^2}\right) \bar{C}_{i,j}^{k+1} + \frac{D_0\tau}{2h_y^2} \bar{C}_{i,j+1}^{k+1} = -\bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{\tau}{2h_x^2} \left(\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - 2\bar{C}_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + \frac{v_0\tau}{4h_x} \left(\bar{C}_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \quad (19б)$$

С краевыми условиями

$$\bar{C}_{0,j}^{k+\frac{1}{2}} = 0 \quad \bar{C}_{N_x,j}^{k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{N_x-1,j}^{k+\frac{1}{2}} = 0, \quad (20а)$$

$$\bar{C}_{i,0}^{k+1} = 1 \quad \bar{C}_{i,N_y}^{k+1} - \bar{C}_{i,N_y-1}^{k+1} = 0 \quad (20б)$$

Для решения СЛАУ с трехдиагональной матрицей наиболее экономичным является метод прогонки [8], который требует $O(N)$ действий для нахождения решения. Для сравнения, метод Гаусса требует $O(N^3)$ действий, а различные итерационные методы, как то метод Зейделя или метод верхних релаксаций требуют $O(N^2)$ действий.

Алгоритм метода прогонки для трехточечного разностного уравнения вида

$$A_i y_{i-1} - C_i y_i + B_i y_{i+1} = -F_i \quad (21)$$

с краевыми условиями

$$y_0 = \chi_1 y_1 + \lambda_1, \quad y_N = \chi_2 y_{N-1} + \lambda_2 \quad (22)$$

имеет вид:

1. Задаем начальные значения прогоночных коэффициентов

$$а. \quad \alpha_1 = \chi_1, \quad \beta_1 = \lambda_1.$$

2. Определяем прогоночные коэффициенты из рекуррентных соотношений

$$а. \quad \alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad \beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 0, \dots, N-1.$$

3. Определяем $y_N = \frac{\lambda_2 + \xi_2 \beta_N}{1 - \xi_2 \alpha_N}$.

4. Выполняем обратную прогонку и находим

$$y_i = \alpha_{i+1} y_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad i = N-1, \dots, 0.$$

Общий алгоритм решения (19)-(20) имеет вид:

Шаг 1. Задаем начальные условия $\bar{C}_{ij}^0 = 1$

Шаг 2. Находим $\bar{C}_{ij}^{k+\frac{1}{2}}$, решая (19а) и (20а) методом прогонки.

Коэффициенты для уравнений (21), (22) имеют вид

$$A_i = \left(\frac{\tau}{2h_x^2} + \frac{v_0\tau}{4h_x} \right), \quad B_i = \left(\frac{\tau}{2h_x^2} - \frac{v_0\tau}{4h_x} \right), \quad C_i = \left(1 + \frac{\tau}{h_x^2} \right), \quad F_i = \bar{C}_{ij}^k + \frac{D_0\tau}{2h_y^2} (\bar{C}_{ij+1}^k - 2\bar{C}_{ij}^k + \bar{C}_{ij-1}^k),$$

$$\chi_1 = 0, \quad \lambda_1 = 0, \quad \chi_2 = 1, \quad \lambda_2 = 0.$$

Шаг 3. Находим \bar{C}_{ij}^{k+1} , решая (19б) и (20б) методом прогонки.

Коэффициенты для уравнений (21), (22) имеют вид

$$A_j = \frac{D_0 \tau}{2h_y^2}, \quad B_j = \frac{D_0 \tau}{2h_y^2}, \quad C_j = \left(1 + \frac{D_0 \tau}{h_y^2}\right), \quad \chi_1 = 0, \quad \lambda_1 = 1, \quad \chi_2 = 1,$$

$$\lambda_2 = 0, \quad F_j = \bar{C}_{ij}^{-k+\frac{1}{2}} + \frac{\tau}{2h_x^2} \left(\bar{C}_{i+1j}^{-k+\frac{1}{2}} - 2\bar{C}_{ij}^{-k+\frac{1}{2}} + \bar{C}_{i-1j}^{-k+\frac{1}{2}} \right) - \frac{v_0 \tau}{4h_x} \left(\bar{C}_{i+1j}^{-k+\frac{1}{2}} - \bar{C}_{i-1j}^{-k+\frac{1}{2}} \right)$$

Шаг 4. Увеличиваем k на 1 и повторяем с шага 2.

Вывод: По приведенному алгоритму составлена и отлажена программа для определения распределения концентраций по трещине в среде DELFI.

В таблице 1 приведены численные результаты расчета распределений концентраций раствора в заполненной трещине по упомянутой программе в сопоставлении с численными результатами, которые были найдены по методу А.С.Мальшева [9].

Таблица1. Распределение концентраций раствора в заполненной трещине при $h^0=0.1$, $D^0=0.1$, $\xi=1$.

Table 1. The concentration of the concrencancies in the fractured cracks at $h^0=0.1$, $D^0=0.1$, $\xi=1$.

$\begin{matrix} x_0 \\ y_0 \end{matrix}$	По методу А.С.Мальшева					По предлагаемому методу				
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.2	0.0	0.896	0.935	0.927	0.831	0.0	0.795	0.943	0.891	0.827
0.4	0.0	0.658	0.857	0.869	0.695	0.0	0.646	0.866	0.786	0.712
0.6	0.0	0.591	0.805	0.810	0.603	0.0	0.614	0.794	0.715	0.660

Результатом сравнительного анализа является удовлетворительное соответствие численных результатов, полученных по приведенной программе, с результатами, которые были определены по методу А.С. Мальшева.

Библиографический список:

1. Баламирзоев А.Г. Развитие теории и методов прогнозирования суффозионных деформации при фильтрации в трещиноватых основаниях гидротехнических сооружений//дис. докт. техн. наук (05.23.07): защищена 25.05.06: утв.13.10.06/ Баламирзоев Абдул Гаджибалаевич.-Махачкала, 2006.-409 с.
2. Баламирзоев А.Г., Агаханов С.А., Азизова Л.Н., Гаджиагаев Ш.С. Задачи нестационарной концентрации солей в трещине произвольного сечения// Фундаментальные исследования – 2014. –№11(12) - С.2575-2579;
 URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004817 (дата обращения: 14.09.2016).
3. Жиленков В.Н., Магомедов К.Г. Гидравлические факторы суффозии трещиноватого песчаника на гипсовом цементе./Гидротехн.стр-во.-1991.- N 10.- с.49-54.
4. Магомедова А.В., Иванов В.В.Численное решение уравнений растворения и выноса солей при фильтрации в трещиноватых породах// Фундаментальные исследования, № 6, 2013, С.546-550.
5. Мамедов К.М., Исмаилов Ф.М. Об одном методе решения уравнений конвективной диффузии для случая фильтрации в пористой среде ограниченной мощности —Учен. зап. вузов МВиССО АзербССР Сер. X, 1973, с. 41— 47

6. Мустафаев А.А., Крупник М.Я., Асланов Г.К., Исмаилов Ф.М. О моделировании процесса растворения и вымывания солей из грунтов – Вопросы механики грунтов и фундаментостроения – Учен. зап. /АзПИ, Баку, 1972, с 186–190.
7. Нумеров С.Н. Приближенный способ расчета напорной фильтрации в основании гидротехнический сооружений. //Изв.ВНИИГ, 1953, т.50, с.71–90.
8. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем, М.Наука, 1988.
9. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод – М.: Наука, 1977. – 676с.
10. Harleman D.R. P., Rumer R.R., The dynamics of Salt-Water Intrusion in porous media. Rept. Mass. Inst. Techn. Hydrov. Lab. Dept. Civil. Eng 1962, № 55.
11. Hoopes John A., Harleman Donald R. F. Dispersion in Radial Flow from a Recharge Well. J. of Geophysical Research, Vol.72, N 14, July 15, 1967.
12. Houben, G. Regenerierung und sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. – Munchen: Oldenbourg industrier, 2003. – 280 s.
13. James A.N., Lupton A.R.R. Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic Structures-Geotechnique.1978.28,N 3.
14. James A.N., Kirpatrick I.M. Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils-Quart J.Eng.Ge-ol.,1980.13.N 3.
15. Ogata Akio. Theory of Dispersion in a Granular Medium.— Geological Survey Professional, paper 411—1, 1970, p. 1—34.

References:

1. Balamirzoev A.G. Razvitie teorii i metodov prognozirovaniya suffozionnykh deformatsii pri filtratsii v treshchinovykh osnovaniyakh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Dis. dokt. tekhn. nauk. Makhachkala; 2006. 409 s. [Balamirzoev A.G. Development of the theory and forecasting the suffosion deformation at deep seepage of hydrotechnical constructions. Doctoral dissertation. Makhachkala; 2006. 409 p. (In Russ.)]
2. Balamirzoev A.G., Agakhanov S.A., Azizova L.N., Gadzhiagaev Sh.S. Zadachi nestatsiarnoy kontsentratsii soley v treshchine proizvodnogo secheniya. Fundamentalnyye issledovaniya. 2014;11(12):2575-2579. [cited: 14.09.2016]. [Balamirzoev A.G., Agakhanov S.A., Azizova L.N., Gadzhiagaev Sh.S. Problems of temporary consistence of salts in a crack of random section. Basic research. 2014;11(12):2575-2579. [cited: 14.09.2016]. (In Russ.)] Available from: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004817.
3. Zhilenkov B.H., Magomedov K.G. Gidravlicheskie faktory suffozii treshchinovatogo peschanika na gipsovom tsemente. Gidrotekhn. str-vo. 1991;10:49-54. [Zhilenkov B.H., Magomedov K.G. Hydraulic factors of a suffosion of fissured sandstone on plaster cement. Hydrotechnical construction. 1991;10:49-54. (In Russ.)]
4. Magomedova A.B., Ivanov B.B. Chislennoye reshenie uravneniy rastvoreniya i vynosa soley pri filtratsii v treshchinovykh porodakh. Fundamentalnyye issledovaniya. 2013;6:546-550. [Magomedova A.B., Ivanov B.B. The numerical solution of the equations of dissolution and carrying out of salts at filtration in fissured ground. Fundamental research. 2013;6:546-550. (In Russ.)]
5. Mamedov K.M., Ismailov F.M. Ob odnom metode pesheniya uravneniy konvektivnoy difuzii dlya sluchaya filtratsii v poristoy crede ogranichennoy moshchnosti. Uchen. zap. vuzov MBiSSO AzerbCCP. 1973;10. 41-47. [Mamedov K.M., Ismailov F.M. About the solution method of the diffusion-convection equation for a filtration case in the porous environment of limited power. Proceedings of MBiSSO Higher Institutions. Azeyrbadzhn SSR. 1973;10:41-47. (In Russ.)]
6. Mustafaev A.A., Krupnik M.Ya., Aslanov G.K., Ismailov F.M. O modelirovani protsessa rastvoreniya i vymyvaniya soley iz gruntov. Voprosy mekhaniki gruntov i fundamentostroeniya. Uchen. zap. Baku: AzPI; 1972. 186-190. [Mustafaev A.A., Krupnik M.Ya., Asla-

- nov G.K., Ismailov F.M. About the modeling of solution process and washing of salts from soil. Questions of soil mechanics and foundation engineering. Proceedings. Baku: AzPI; 1972. 186-190. (In Russ.)]
7. Numerov C. H. Priblizhennyuy sposob podcheta napornooy filtratsii v osnovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Izv. BNIIG. 1953;50:71–90. [Numerov, C. H. Approximate way of pressure filtration calculation in the structure base of the hydraulic constructions. News of All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering. 1953;50:71–90. (In Russ.)]
 8. Samarskiy A.A. Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem. M: Nauka; 1988. [Samarskiy A.A. Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Nauka; 1988. (In Russ.)]
 9. Polubapinova-Kochina P.Ya. Teopiya dvizheniya gpuntovykh vod. M.: Nauka; 1977. 676 s. [Polubapinova-Kochina P.Ya. Theory of ground water motion. Moscow: Nauka; 1977. 676 p. (In Russ.)]
 10. Harleman D.R.P., Rumer R.R. The dynamics of Salt-Water Intrusion in Porous Media. Rept. Mass. Inst. Techn. Hydrodvn. Lab. Dept. Civil. Eng. 1962;55.
 11. Hoopes J.A., Harleman D.R.F. Dispersion in Radial Flow from a Recharge Well. Journal of Geophysical Research. 15 July 1967;72(14,15).
 12. Houben G., Treskatis C. Regenerierung und sanierung von Brunnen. Munchen: Oldenbourg industriever; 2003. 280 p.
 13. James A.N., Lupton A.R.R. Gypsum and anhydrite in foundtions of hydraulic structures. Geotekhnique. 1978;28(3).
 14. James A.N., Kirpatrich I.M. Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 1980;13(3).
 15. Akio O. Theory of Dispersion in a Granular Medium. Geological Survey Profesional. 1970; (411-1):1-34.

Сведения об авторах.

Баламирзоев Абдул Гаджибалаевич – доктор технических наук, профессор.

Баламирзоева Эсмירה Рамизовна – магистрант

Магомедова Милада Руслановна – кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства, докторант кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений архитектурно-строительного факультета.

Information about the authors.

Abdul G. Balamirzoev – Dr. Sc. (Technical), Prof.

Esmira R. Balamirzoeva – Graduate student.

Milada R. Magomedova – Cand. Sc. (Technical), Dean.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 30.09.2016.

Принята в печать 30.11.2016.

Conflict of interest

Received 30.09.2016.

Accepted for publication 30.11.2016.

Для цитирования: Ибрагимов С.А., Кадиев. П.А. Обеспечение надежности однородных регистровых сред с программируемой структурой скользящим резервированием. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):95-103. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-95-103.

For citation: Ibragimov S.A., Kadiyev. P.A. Provision of reliability of homogeneous register media with programmed sliding redundancy structure. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):95-103 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-95-103

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 62.5.681.3

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-95-103

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОДНОРОДНЫХ РЕГИСТРОВЫХ СРЕД С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Ибрагимов С.А.², Кадиев. П.А.¹

^{1,2}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2}367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,

¹e-mail:islam-kadi@mail.ru, ²e-mail: sylvansaid@mail.ru

Резюме: Цель. Целью работы является решение проблемы повышения надежности однородных линейных нейроподобных сред методом скользящего структурного резервирования. **Метод.** В ходе исследования применен наиболее эффективный метод обеспечения надежности изделий - структурное резервирование, при этом в состав структуры изделия, наряду с «основными» элементами, включены дополнительные, которые берут на себя функции отказавших. **Результат.** Предложены функциональные модели элементов сред, ориентированные на наличие в них резервных элементов. Установлена функциональная зависимость числа внешних связей элементов резервированных сред с числом в ней резервных элементов. Приведены расчеты надежности резервированных сред, подтверждающие улучшение показателей надежности. Проведен сравнительный анализ существующего функционального и разработанного элементов. Приведен расчет надежности для однородных линейных нейроподобных сред без резервируемых элементов и с наличием таких элементов в структуре, что наглядно демонстрирует преимущество однородных линейных нейроподобных сред с резервируемыми элементами. Так же установлена зависимость изменения информационных связей между элементами среды при изменении кратности резервирования. **Вывод.** Предложенный подход к повышению надежности среды за счет построения из элементов, имеющих связи с большим числом элементов в среде, с возможностью «информационного обхода» отказавшего элемента и резервными элементами в ее составе, позволяет создавать однородные среды повышенной надежности. Предложенный элемент, позволяет строить среды, обеспечивающие возможность «обхода» двух отказавших элементов, что и предполагает наличие в среде 2-х резервных элементов, которые могут заменить при отказах любую пару основных элементов.

Ключевые слова: надежность, однородная среда, резервирование, настройка среды работоспособность

TECHICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

PROVISION OF RELIABILITY OF HOMOGENEOUS REGISTER MEDIA WITH
PROGRAMMED SLIDING REDUNDANCY STRUCTURE

Syltansaid A. Ibragimov², Pasay A. Kadiev¹

^{1,2}Dagestan State Technical University,

^{1,2}70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

¹e-mail:islam-kadi@mail.ru, ²e-mail: syltansaid@mail.ru

Abstract: Objectives. The aim of the work is to solve reliability problems associated with the improvement of neural linear homogeneous media by means of the sliding structural redundancy method. **Method.** In the course of the study the most effective method of ensuring product reliability structural redundancy, while in the structure of the product, along with the “basic” elements, additional elements are included, which substitute for the function in cases where others have failed. **Results.** It is proposed that functional models of media elements be oriented towards the presence of their internal redundant elements; on the basis of the established functional dependence of the number of external redundant elements with the number of internal redundant elements, we calculated the reliability of redundant media, thus confirming reliability improvement. A comparative analysis of the existing functional element and their development is presented. A reliability calculation for homogeneous linear neural environments both with and without the presence of redundant components clearly demonstrates the numerous advantage of homogeneous linear neural environments with redundant elements. The necessity of the information exchange of connections among the elements of the environment when changing the redundancy ratio are also shown. **Conclusion.** The approach proposes to improve the reliability of media using elements which have existing connections with numerous other elements in the media, using “informational redundancy” and the redundant elements within the structure, enabling the creation of homogeneous high reliability media with the possibility of “information control”. The proposed element enables the construction of media providing the ability to “control” two failed elements, which implies the presence in the environment of two redundant elements that can be replaced in the case of the failure of any pair of key elements.

Keywords: reliable, homogeneous media, redundancy, media performance tuning

Введение. Известно, что надежность является одним из важнейших свойств технических систем, характеризующих ее качество. Так как надежность сама является сложным свойством, то определяется она через ряд относительно простых свойств, таких как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость. [5]

Выбор свойств, используемых для характеристики надежности системы или устройства, зависит от целого ряда факторов, анализируемых с точки зрения теории надежности, учитывающих специфику системы или ее компонентов, требования, предъявляемые к ним, условий их эксплуатации и ряда других факторов. Чаще других системы характеризуются свойствами безотказности и ремонтпригодности. При этом выбирают из числа имеющихся те показатели, характеризующие эти свойства, которые в наибольшей степени соответствуют особенностям функционирования систем и их компонентов. [2]

Современные аппаратные решения средств обработки информации все больше ориентируются на однородные среды. Преобладающими решениями при этом выступают аппаратные средства, реализованные в виде программируемых однородных сред, технических аналогов сетей биологических нейронов, клеток, имеющих назначением обработку информации [1,12].

Характерным для любых однородных сред является наличие множества связей элементов этих сред друг с другом, как по входам, так и по выходам (рис. 1).

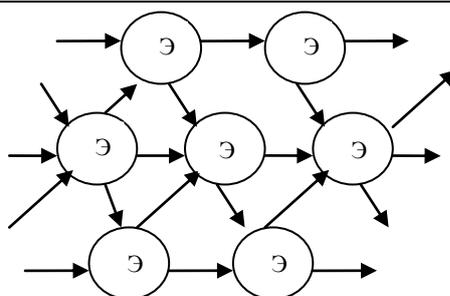


Рис.1. Схема связей элементов среды в структуре

Fig.1. Diagram of connections between elements of the environment in the structure

Именно благодаря этим связям биологические среды обладают повышенной живучестью. Связи позволяют организовать множество путей распространения сигналов в этих средах, которые используются при необходимости. [14]

Исследованию однородных сред, а точнее вопросу повышения надежности функционирования такого типа структур, посвящен ряд работ [6, 7, 8, 9, 11, 15]. Наиболее известной техникой корректировки ошибок функционирования таких систем является метод Нишио-Кобуши, основная идея которого состоит в симулировании работы каждого единичного автомата реальной ОС-модели тремя соседними автоматами. В этом случае симулирующая реальную ОС-модель классическая структура на основе информации о соседях трех соседних автоматов в момент времени $t > 0$ безошибочно определяет состояние искомого единичного автомата в следующий момент $t+1$ времени. Однако функция выбора состояния в этом случае также должна выполняться вполне безошибочно [10].

Постановка задачи. Обзор и анализ существующих методов резервирования, учет особенностей структуры однородных сред, а именно использование для их построения одинаковых функциональных элементов-ячеек, позволяет сделать выбор метода скользящего резервирования.

Для скользящего резервирования характерно наличие в структуре резервных элементов, которые могут «заменить» любой из отказавших основных элементов [13,14].

Это обстоятельство в данной статье явилось базовой посылкой для постановки задачи. Обзор состояния вопросов обеспечения надежности нейроподобных однородных сред показал, что им не уделено достаточного внимания. Именно поэтому авторами поставлена задача исследования вопросов обеспечения надежности однородных сред методами скользящего структурного резервирования.

При решении вопросов обеспечения надежности однородных программируемых сред следует учесть следующие их особенности: объект состоит из одинаковых элементов; элементы имеют настраиваемые входы и выходы; элементы имеют между собой множество связей (прямых и обратных).

В качестве примера на рис. 2 показана схема существующего элемента однородной регистровой среды. При выборе показателя надежности принято учитывать такие особенности как восстановление, или не восстановление изделия после потери им работоспособности. В зависимости от этого для характеристики надежности используются различные показатели.

Однородные среды можно отнести к невосстанавливаемым системам, так как они чаще всего реализованы в виде интегральных схем. В связи с этим следует принять меры по обеспечению достаточной надежности, предусмотреть резервирование, которое позволит среде выполнять возложенные на устройство и реализованные в ней функции.

При этом для оценки надежности следует использовать показатели надежности невосстанавливаемых изделий. Из отмеченного выше следует, что структурное резервирование таких элементов может быть только внутренним.

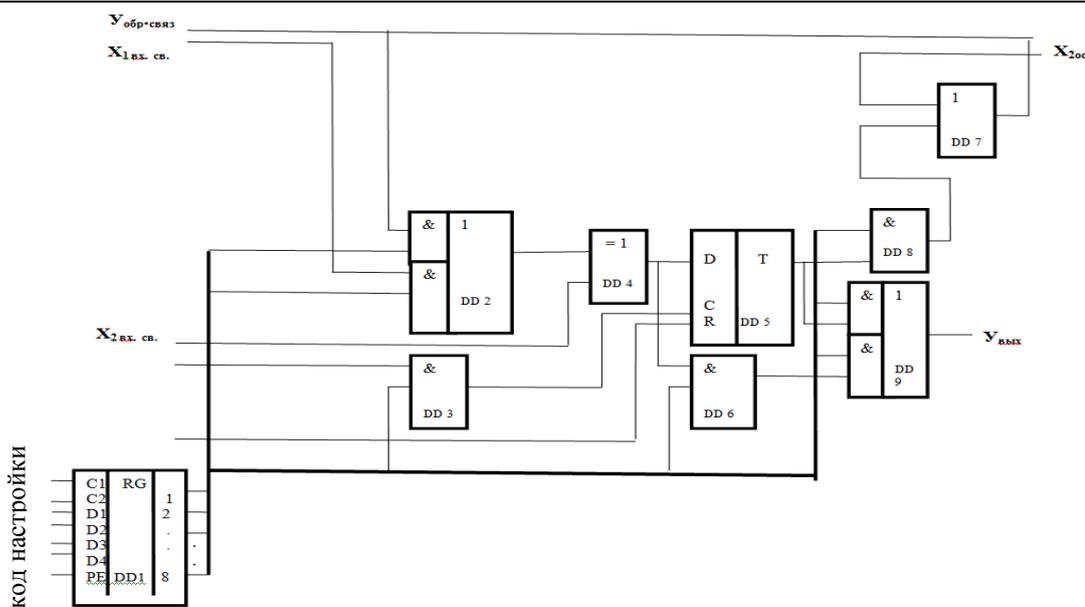


Рис.2. Схема элемента однородной регистровой среды
Fig.2. The scheme of an element of a homogeneous register medium

Для этого должна быть обеспечена возможность восстановления отказавшей микросхемы за счет внутренних резервных элементов. При этом для того чтобы включить резервные элементы необходимо перенастроить среду.

Методы исследования. Одним из наиболее эффективных и распространенных методов обеспечения надежности изделий является структурное резервирование. При этом в состав структуры изделия, наряду с «основными» элементами, включаются дополнительные, которые берут на себя функции отказавших.

Способы включения дополнительных элементов разнообразны: отдельное, общее, скользящее; холодное, теплое, горячее.

Для однородных сред, при соответствующем построении элементов, наиболее эффективным является скользящее резервирование с холодным резервом, когда перед настройкой среды тестируется состояние каждого элемента, с организацией ее «обхода» при отказе.

Проведенный анализ показал, что для реализации предложения организации «информационного обхода» элементов необходимо увеличить число связей между элементами. Вход и выход каждого функционального элемента должен быть связан не только с выходом и входом элемента, расположенного рядом. Должна быть связь входа и выхода с последующими и предшествующими соседнему элементу элементами.

Число элементов, с которыми должна быть связь у каждого элемента определяется числом резервных элементов в среде. В данном случае рассматривается вариант, когда резервных элементов в среде 2. Следовательно, входы и выходы каждого элемента должны быть связаны с входами и выходами 3-х элементов предшествующих и 3-х, следующих за ним в линейной цепи однородной среды. В предложенном варианте реализации схемы элемента однородной среды введен на входе логический элемент **ИЛИ**, на три входа которых подаются сигналы с выходов 3-х, предшествующих данному элементу среды.

На выходе введены 2 группы логических элементов **И**. Одна из групп связывает выход данного элемента с входами 3-х последующих элементов. Вторая группа элементов **И** связывает выход обратной связи элемента с входами 3-х предшествующих ему элементов среды.

Таким образом, у элемента среды появились 8 дополнительных связей с другими элементами - 4 по входам и 4 по выходам. Направление передачи выходного сигнала и направление приема входного сигнала выбирается при настройке элемента среды.

Для этих целей используются дополнительные 4 символа в коде настройки. Выбор направления передачи осуществляется по результатам контроля - тестирования элементов

среды перед ее настройкой. Те элементы среды, которые не прошли тестирование, сигналами настройки «обходятся», и вместо них включаются резервные элементы, введенные в схему как скользящий резерв.

Среда, состоящая из элементов (рис.3) в зависимости от числа резервных элементов, будет оставаться работоспособной до тех пор, пока в ней не откажут $n+1$ элемента, где n - число резервных элементов.

Проведем сравнительный анализ надежности структур на основе существующих и разработанных функциональных элементов. Интенсивности отказов различных элементов задаются в [3, 4].

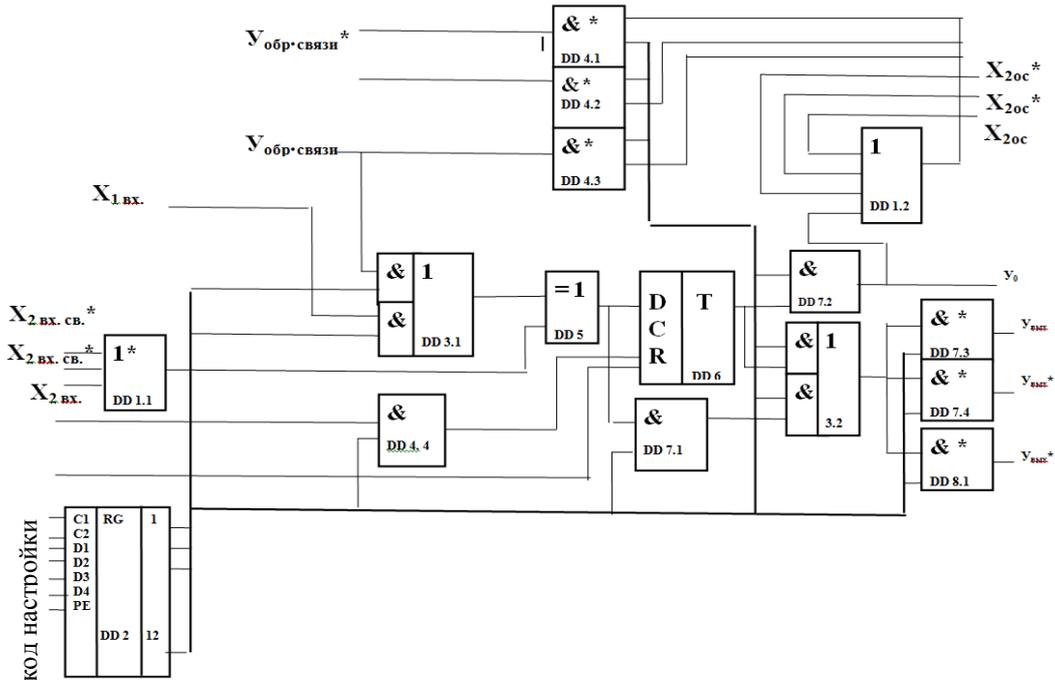


Рис.3. Схема элемента однородной регистровой среды повышенной надежности

Fig.3. The scheme of an element of a homogeneous register medium reliability

Для элементов, входящих в схему нашего устройства, показатели интенсивности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Суммарная интенсивность отказов элементов схемы

Table 1. The total failure rate of circuit elements

№№	Наименование	λ_i , 10^{-6} 1/час	n_i шт.	$n_i \lambda_i$ 10^{-6} 1/час
Состав элементов существующей среды				
1	Интегральные микросхемы	1	6	6
2	Соединения паянные	0,004	200	0,8
	итого			6,8
Состав элементов среды повышенной надежности				
1	Интегральные микросхемы	1	8	8
2	Соединения паянные	0,004	220	0,84
	Итого			8,84

Итак, суммарная интенсивность отказов элементов схемы, включая и паянные соединения, равны $6,8 * 10^{-6}$ 1/час и $8,84 * 10^{-6}$ 1/час для существующей и предлагаемой схемы построения элемента среды. Из этого следует, что надежность первой схемы выше.

Для упрощения вычислений при проведении сравнительного анализа выберем для сравнения 2 модуля: модуль, состоящий из 4-х существующих элементов, которые все явля-

ются основными элементами логической схемы расчета надежности и модуль, состоящий из 5-ти предложенных в работе элементов, 4 из которых являются рабочим и один резервный.

Сравнение проведем по показателю работоспособности - вероятности безотказной работы в течение заданного времени. Логическая схема расчета надежности модуля из существующих элементов представляет собой последовательное соединение всех 4-х элементов.

Вероятность безотказной работы такой схемы равна:

$$P_{M4}(t) = P_0(t)^4, \quad (1)$$

где, $P_0(t)$ - вероятность безотказной работы в течение времени t существующих функциональных элементов среды.

Логическая схема расчета надежности модулю из 5 элементов, также представляется в виде последовательного соединения 5-ти элементов, из которых 4 являются рабочими и один из них - резервный. Для этой схемы вероятность безотказной работы определяется как сумма вероятностей нахождения модуля в состояниях, при которых обязательно должны быть работоспособны не менее 4-х из них.

Такие состояния имеют следующие характеристики:

а) работоспособны все 5 элементов среды; надежность рассчитывается по формуле:

$$P_1(t) = P_{H0}^5(t); \quad (2)$$

б) работоспособны 4 из 5-ти элементов; в этом случае вероятность определяется как сумма вероятностей событий, которых характеризуют различные варианты отказов элементов.

Таких вариантов будет $C_5^1 = 5$.

Общая вероятность будет определяться по формуле:

$$P_2(t) = C_5^1 P_{H0}^4(t) * [1 - P_{H0}(t)] \quad (3)$$

Общая формула для вероятности безотказной работы такого модуля будет определяться по формуле:

$$P_{M5}(t) = P_1(t) + P_2(t) = P_{H0}^5(t) + C_5^1 P_{H0}^4(t) * [1 - P_{H0}(t)], \quad (4)$$

где $P_{H0}(t)$ - вероятность безотказной работы в течение времени t разработанного в работе функционального элемента, C_5^1 - число сочетаний из 5 по 1.

Найдем вероятности безотказной работы в течение заданного времени - исходного и предложенного в работе функциональных элементов. Проведем относительный анализ функциональных схем этих элементов.

В составе существующего функционального элемента имеется 18 логических элементов. Пусть суммарная интенсивность отказов этих элементов равна λ_0 . В составе предлагаемого функционального элемента 22 логических элементов. коэффициент относительной сложности предлагаемого элемента относительно существующего равен $k = 22/18 = 1,2$, т.е. $\lambda_H = 1,2 \lambda_0$.

Формулы для расчетов при определении показателя надежности имеют вид:

а) для модуля из 4-х существующих элементов:

$$P_{M4}(t) = P_0^4(t) = [EXP(-\lambda_0 t)]^4 \quad (5)$$

б) для модуля из 5-ти предлагаемых элементов, один из которых резервный:

$$P_{M5}(t) = P_{H0}^5(t) + P_{H0}^4(t) * [1 - P_{H0}(t)] = [EXP(-1,2\lambda_0 t)]^5 + 5 * [EXP(-1,2\lambda_0 t)]^4 * [1 - EXP(-1,2\lambda_0 t)] \quad (6)$$

Для выполнения сравнительных расчетов можно выбрать λ_0 произвольно, так как значение его входят в оба выражения для определения показателей надежности.

Пусть $\lambda_0 = 10^{-6}$ - ориентировочная интенсивность отказов микросхем средней степени интеграции.

Полученные по приведенным формулам расчетные значения вероятности безотказной работы на временных интервалах 100, 1000 и 10000 часов приведены ниже.

Для элементов:

$$\begin{aligned} P_{01}(100) &= 0,994 & P_{н1}(100) &= 0,9993 \\ P_{01}(1000) &= 0,994 & P_{н1}(1000) &= 0,993 \\ P_{01}(10000) &= 0,942 & P_{н1}(10000) &= 0,931 \end{aligned} \quad (1)$$

Для модулей:

$$\begin{aligned} P_{04}(100) &= 0,998 & P_{н5}(100) &= 0,9991 \\ P_{04}(1000) &= 0,976 & P_{н5}(1000) &= 0,990 \\ P_{04}(10000) &= 0,787 & P_{н5}(10000) &= 0,928 \end{aligned} \quad (2)$$

Обсуждение результатов. Результаты (1) получены для отдельных функциональных элементов - имеющегося элемента - $P_{01}(t)$ и предложенного в работе элемента - $P_{н1}(t)$.

Из приведенных результатов следует, что предлагаемые в работе элементы среды отличаются в пределах 1000 часов работы на 0,0001, а на 10000 часах работы - на 0,01, что представляется не столь существенным.

Результаты (2) получены для модулей из 4-х имеющихся элементов - $P_{04}(t)$ и модуля из 5-ти предложенных в работе элементов, один из которых является резервным.

Сравнение полученных результатов показывает, что с увеличением времени, на котором определяется значение показателя надежности, различие в надежности становится все более существенным.

Так при времени работы в 100 часов различие составляет 0,002, на 1000 часах - 0,02, а при 10000 часах - 0,17. Последнее является существенным приращением значения показателя надежности. Но в тоже время с включением резервных элементов в систему повышается количество информационных связей, зависящих от числа элементов, которые можно одновременно «обойти». При этом какое-то количество стоящих после элемента можно обойти и направить сигнал, минуя их при отказе, что является недостатком данного метода повышения надежности.

Формула зависимости числа связей у отдельного элемента N от числа резервных элементов в цепи n , имеет вид:

$$N = N_0 * (n+1), \quad (7)$$

где N_0 число резервируемых связей у исходного элемента.

Зависимость количества информационных связей от числа резервируемых элементов приведена на рис.4.

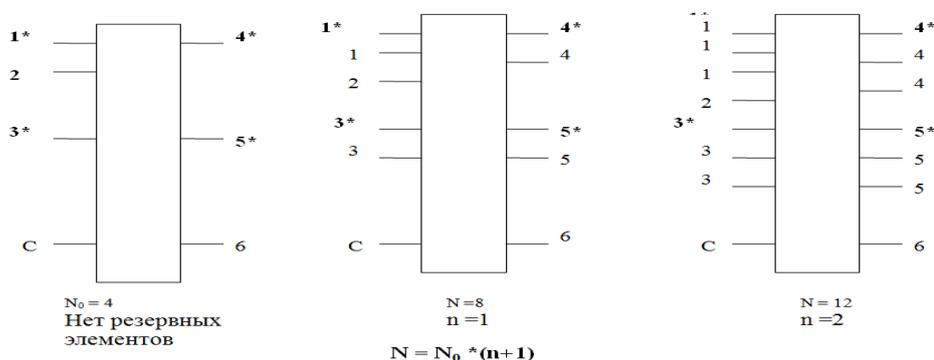


Рис. 4. Зависимость числа информационных связей между элементами среды от изменения кратности резервирования

Fig. 4. Dependence of the number of information links between elements of the environment on the change in the reservation multiplicity

Вывод. Предложенный в данной статье подход к повышению надежности среды за счет построения из элементов, имеющих связи с большим числом элементов в среде, с воз-

возможностью «информационного обхода» отказавшего элемента и резервными элементами в ее составе, позволяет создавать однородные среды повышенной надежности.

Предложенный элемент, позволяет строить среды, обеспечивающие возможность «обхода» двух отказавших элементов и предполагает наличие в среде 2-х резервных элементов, которые могут заменить при отказах любую пару основных элементов.

Библиографический список:

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю. К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности.- М.: Энергия, 1965.
2. Острейковский В.А. Теория надежности.- М.:Наука, 2003.
3. Кадиев П.А. Методическое пособие по расчету надежности устройств и систем автоматики. -М-кала.: ДПТИ, 1988.
4. Ушаков И.А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем.- М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Data Processing Vocabulary. Section 14. Reliability, Maintenance and Availability. - Geneva: ISO 2382, 1976.
6. Аладьев В.З. Однородные структуры: Теоретические и прикладные аспекты.- Киев:
7. Aladjev V.Z. Solutions of a Series of Problems in the Mathematical Theory of Homogeneous Structures / TR-040684.- Tallinn: P/A Silikaat, 1985.
8. Aladjev V.Z. Survey on the Homogeneous Structures / Tech. Rept., no. 12-19/89 (revised and extended report), Project-Technological Institute of Industry.- Tallinn, 1989.
9. Aladjev V., Hunt U. Fundamental Problems in the Theory of the Classical Homogeneous Structures TRG Research Rept. TRG-55/97.- Tallinn: VASCO, 1997.
10. Nishio H., Kobuchi Y. Fault Tolerant Cellular Spaces // J. Comp. Sys. Sci., 11, 1975.
11. Gacs P. Reliable cellular automata with self-organization / Proc. of the Conf. on Foundations of Comp. Sci., 1997.
12. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды. – М.: Радио и связь, 1981. – 208 с.
13. Лазарев В.Г., Пийль Е.И., Турута Е.Н. Построение программируемых управляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
14. Кудрявцев В.Б., Алешин С.В., Подколзин А.С. Введение в теорию автоматов. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
15. Gaiski D., Yamada H. A Busy Beaver Problem in Cellular Automata / Proc. of the 1st Intern. Symp. on USAL.- Tokyo, 1975, pp. 171-184.

References:

1. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. M.: Energiya; 1965. [Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyev A.D. Mathematical methods in the theory of reliability. Moscow: Energiya; 1965. (In Russ.)]
2. Ostreykovskiy V.A. Teoriya nadezhnosti. M.: Nauka; 2003. [Ostreykovskiy V.A. Theory of reliability. Moscow: Nauka; 2003. (In Russ.)]
3. Kadiev P.A. Metodicheskoye posobie po raschetu nadezhnosti ustroystv i sistem avtomatiki. M-kala.: DPIT; 1988. [Kadiev P.A. Guidelines on the reliability calculation of devices and automation system. Makhachkala: DPIT; 1988. (In Russ.)]
4. Ushakov I.A. Veroyatnostnyye modeli nadezhnosti informatsionno-vychislitelnykh sistem. M.: Energoatomizdat; 1991. [Ushakov I.A. Probabilistic models of information systems reliability. Moscow: Energoatomizdat; 1991. (In Russ.)]
5. Data Processing Vocabulary. Section 14. Reliability, Maintenance and Availability. Geneva: ISO 2382; 1976.

6. Aladyev V.Z. Odnorodnyye struktury: Teoreticheskie i prikladnyye aspekty. Kiev: Respublikanskoye izd-vo Tekhnika; 1990, 272 s. [Aladyev V.Z. Uniform structures: theoretical and applied aspects. Kiev: Tekhnika Publ.; 1990. 272 p. (In Russ.)]
7. Aladjev V.Z. Solutions of a Series of Problems in the Mathematical Theory of Homogeneous Structures. TR-040684. Tallinn: P/A Silikaat; 1985.
8. Aladjev V.Z. Survey on the Homogeneous Structures. Tech. Rept., no. 12-19/89 (re-vised and extended report). Project-Technological Institute of Industry. Tallinn; 1989.
9. Aladjev V., Hunt U. Fundamental Problems in the Theory of the Classical Homogeneous Structures TRG Research Rept. TRG-55/97. Tallinn: VASCO; 1997.
10. Nishio H., Kobuchi Y. Fault Tolerant Cellular Spaces. Journal of Computer and System Sciences. 1975; 11.
11. Gacs P. Reliable cellular automata with self-organization. Proceedings of the Conference on Foundations of Computer Science. 1997.
12. Evreinov E.V. Odnorodnyye vychislitelnyye sistemy, struktury i sredy. M.: Radio i svyaz; 1981. 208 s. [Evreinov E.V. Homogeneous parallel computing systems, structures and environments. Moscow: Radi i svyaz Publ.; 1981. 208 p. (In Russ.)]
13. Lazarev V.G., Piyl E.I., Turuta E.N. Postroenie programmiruyemykh upravlyayushchikh ustroystv. M.: Energoatomizdat; 1984. 192 s. [Lazarev V.G., Piyl E.I., Turuta E.N. Creation of programmable actuation devices. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 192 p. (In Russ.)]
14. Kudryavtsev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S. Vvedenie v teoriyu avtomatov. M.: Nauka; 1985. 320 s. [Kudryavtsev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S. Introduction to the theory of automatic machines. Moscow: Nauka; 1985. 320 p. (In Russ.)]
15. Gaiski D., Yamada H. A Busy Beaver Problem in Cellular Automata. Proceedings of the 1st International Symposium on USAL. Tokyo; 1975. 171-184.

Сведения об авторах.

Ибрагимов Султансаид Абдуллагаджиевич – аспирант.

Кадиев Пашай Абдулгамидов – кандидат технических наук, профессор кафедры управления информатикой в технических системах.

Information about the authors.

Syltansaid A. Ibragimov – Postgraduate student.

Pasay A. Kadiev – Cand. Sc. (Technical), Prof., Department of Informatics in technical systems.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 01.09.2016.

Принята в печать 10.11.2016.

Conflict of interest

Received 01.09.2016.

Accepted for publication 10.11.2016.

Для цитирования: Стариков Е.С., Сучкова Л.И. Гибридные подходы к формализации экспертных знаний о темпоральных закономерностях в группе временных рядов базы данных системы мониторинга. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):104-111. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-104-111

For citation: Starikov E.S., Suchkova L.I. Hybrid approaches to the formalisation of expert knowledge concerning temporal regularities in the time series group of a system monitoring database. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43(4):104-111. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-104-111

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-104-111

ГИБРИДНЫЕ ПОДХОДЫ К ФОРМАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ О ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ В ГРУППЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ БАЗЫ ДАННЫХ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Стариков Е.С.¹, Сучкова Л.И.².

^{1,2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

^{1,2} 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,

¹ e-mail: yegor.inc@live.ru, ³ e-mail: lara8370@yandex.ru

Резюме: Цель. Поставлена задача поиска закономерностей в данных для нечетких временных рядов на основе подхода к формализации экспертных знаний при интеграции в механизм принятия решений. **Метод.** Для описания закономерностей используется язык, порождаемый контекстно-свободной грамматикой, являющийся модификацией универсальной темпоральной грамматики. Пользуясь правилами разработанной грамматики, эксперт может описать закономерности в группе временных рядов. В режиме реального времени для принятия решений в экспертной системе используется многомерный матричный паттерн поведения группы временных рядов, реализующий универсальный подход к описанию динамики изменения данных в экспертной системе. Многомерный матричный паттерн предназначен непосредственно для принятия решений в экспертной системе, а модифицированная темпоральная грамматика для выявления закономерностей в данных. **Результат.** Предложено использовать темпоральные отношения порядка следования и фиксации наблюдения значений на временном интервале, как «From-To», «Before», «After», «Simultaneously», «Duration». Разработан синтаксически ориентированный конвертор описаний. Составлена схема создания и применения матричных паттернов в экспертных системах.

Вывод. Преимуществом внедрения предложенных гибридных подходов является сокращение времени на выявление темпоральных закономерностей и автоматизация формирования матричного паттерна системы принятия решения на основе проверенного на реальных данных экспертного описания взаимосвязей в данных мониторинга.

Ключевые слова: формализация экспертных знаний, обнаружение закономерностей, гибридный подход, многомерный матричный паттерн поведения, экспертные системы

TECHICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

HYBRID APPROACHES TO THE FORMALISATION OF EXPERT KNOWLEDGE
CONCERNING TEMPORAL REGULARITIES IN THE TIME SERIES GROUP OF A SYSTEM
MONITORING DATABASE

Egor S. Staricov¹, Larisa I. Suchkova²

^{1,2}Polzunov Altai State Technical University,
46 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia

¹e-mail: yegor.inc@live.ru, ³e-mail: lara8370@yandex.ru

Abstract: Objectives. The presented research problem concerns data regularities for an unspecified time series based on an approach to the expert formalisation of knowledge integrated into a decision-making mechanism. **Method.** A context-free grammar, consisting of a modification of universal temporal grammar, is used to describe regularities. Using the rules of the developed grammar, an expert can describe patterns in the group of time series. A multi-dimensional matrix pattern of the behaviour of a group of time series is used in a real-time decision-making regime in the expert system to implements a universal approach to the description of the dynamics of these changes in the expert system. The multidimensional matrix pattern is specifically intended for decision-making in an expert system; the modified temporal grammar is used to identify patterns in the data. **Results.** It is proposed to use the temporal relations of the series and fix observation values in the time interval as "From-To", "Before", "After", "Simultaneously" and "Duration". A syntactically oriented converter of descriptions is developed. A schema for the creation and application of matrix patterns in expert systems is drawn up. **Conclusion.** The advantage of the implementation of the proposed hybrid approaches consists in a reduction of the time taken for identifying temporal patterns and an automation of the matrix pattern of the decision-making system based on expert descriptions verified using live data derived from relationships in the monitoring data.

Keywords: formalisation of expert knowledge, discovery of regularities, hybrid approach, multi-dimensional matrix pattern of behaviour, expert systems

Введение. Эффективность функционирования экспертных систем (ЭС) зависит от вида представления информации, алгоритмов анализа и обработки данных, способности накопления и применения знаний для решения поставленных задач. Ввиду больших объемов просматриваемых данных анализ и извлечение знаний должны быть автоматизированы. Для этих целей широко используются методы DataMining. DataMining представляет собой анализ данных с применением современных алгоритмов искусственного интеллекта, позволяющих обнаруживать в данных неявные закономерности, выявлять новые аспекты знаний, которые впоследствии могут быть практически применены для принятия решений в информационных и измерительных системах [1].

Поиск и выявление закономерностей в данных может осуществляться в автоматическом режиме и при помощи эксперта, когда в режиме обучения системы эксперт задает предполагаемую закономерность и проверяет ее на достоверность в накопленном массиве данных. Как правило, данные помимо информационной части содержат темпоральную составляющую, которая фиксирует, в какой момент времени данные были сформированы и/или обработаны. Необходимость разработки специализированных методов описания алгоритмов выявления закономерностей и связей обусловлена именно темпоральным характером данных. Найденные закономерности должны быть формализованы таким образом, чтобы в дальнейшем эти новые знания могли быть интегрированы в механизм принятия решений экспертной системы [2]. Для формализации знаний эксперта предлагается использовать гибридный подход, который позволяет одновременно описывать темпоральные закономерности в группе нечетких временных рядов и использовать формальное описание для идентификации и прогнозирования [3].

Постановка задачи. Рассмотрим экспертную систему, в которой первичными данными являются результаты измерений, полученные с датчиков и программируемых логических контроллеров, причем данные имеют темпоральный аспект. Информация хранится в базе данных и образует временные ряды (ВР), для каждого из которых известен измеряемый или вычисляемый параметр некоторого объекта контроля. Для принятия решений целесообразно использовать нечеткие ряды [4,5]. Элементом нечеткого ВР являются термы лингвистических переменных, соответствующих численным значениям контролируемых параметров. Для формирования термов можно использовать различные функции принадлежности.

Ввиду узкой специализации задачи поиска закономерностей в данных для нечетких ВР необходимо привлечение эксперта, который проанализирует ряды и опишет шаблоны поведения и взаимовлияния. В этом случае требуется наличие формальной среды для описания темпоральных событий и их взаимосвязей, которая, однако, не позволяет адаптировать правила принятия решений экспертной системы к новым выявленным закономерностям в данных. Таким образом, формализация экспертных знаний, пригодная для дальнейшей интеграции в механизм принятия решений, является актуальной задачей [3].

Методы исследования. Описание экспертных предположений о наличии закономерностей предлагается производить на специализированном языке, оперирующем с элементами группы ВР, связанных темпоральными соотношениями. Для описания закономерностей предлагается язык, порождаемый контекстно-свободной грамматикой, являющейся модификацией универсальной темпоральной грамматики (UTG) [6]. Формальная основа описания позволяет оперировать с информацией, носящей темпоральный характер, при этом важным аспектом практического применения данного формализма является возможность оценки состояния контролируемых объектов и прогнозирование динамики их поведения [7,8].

Модификация грамматики UTG заключалась, во-первых, в упрощении описания многоуровневых закономерностей в данных, и, во-вторых, в предоставлении возможности эксперту описывать новые алгоритмы обработки ВР. Предлагается формализовать описание закономерностей в группе ВР с помощью паттернов «прошлое-будущее», оперирующих примитивами, событиями, функциями.

Грамматика содержит описания четырех уровней сущностей, иерархия работы с которыми позволяет описывать закономерности в данных: уровень примитива; уровень события; уровень функции; уровень паттерна.

Первичным уровнем описания закономерностей в данных является уровень примитива. На данном уровне с помощью конструкции «Имя_ряда like тип» указывается, для ВР с каким именем нужно анализировать данные и к какому типу их преобразовывать. Допускается в экспертных высказываниях оперировать с вещественными (float), целочисленными (int), логическими (bool), нечеткими (fuzzy) значениями ВР.

Для нечетких значений допускается указание лингвистической переменной с заданной функцией принадлежности. Кроме того, ряд, содержащий четкие данные, может быть преобразован к другому ряду, например, к нечеткому или ряду, содержащему относительные изменения в данных. Для анализа значений выбранного ряда используются операции сравнения значений с константами вещественного, целого, булевского типов или с термами лингвистических переменных. К стандартным операциям сравнения для удобства эксперта добавлена операция «in», указывающая возможные границы значения.

Примитивы для разрозненных рядов группы, наблюдаемые в одно и то же время, могут быть операндами логических выражений, содержащими операции «И», «ИЛИ», формируя таким способом примитивы для группы временных рядов. На уровне примитива отдельные элементы ВР проверяются на достоверность.

На уровне события задаются временные отношения между примитивами и между группами временных рядов. Различают абсолютные отношения (на протяжении промежутка времени, в привязке к заданному моменту времени) и относительные (перед, после, одно-

временно). Уровень функции позволяет задавать выполнение пользовательских алгоритмов над ВР.

Функция, реализующая алгоритм, имеет входные и выходные параметры, которые могут представлять собой ВР, собственно для описания работы алгоритма применяются операторы, обрабатывающие данные временных рядов. Уровень паттерна описывает шаблон предыстории смены событий в прошлом и события будущего, в простейшем случае рассматривается единственное будущее событие, которое является результатом принятия решения. Для каждого паттерна задаются временные рамки действия, шаг дискретизации наблюдаемого процесса по времени [9]. Разработанная грамматика позволяет задавать многоуровневые закономерности в данных из различных рядов, а также имеет возможность осуществлять прогнозирование поведения путем введения отношений «если - то», задавать временные отношения как абсолютные, так и относительные, оперировать с различными типами данных, а также дает возможность экспертам самостоятельно конструировать функции обработки временных рядов.

Таким образом, с применением правил разработанной грамматики эксперт может описать закономерности в группе ВР. Для проверки правильности экспертных предположений можно проверить их на накопленных исторических данных. Для этой цели предлагается осуществление интерпретации формального лингвистического описания темпоральных закономерностей на реальных данных мониторинга [10].

В силу длительности процесса интерпретации такой подход возможен лишь для выявления новых знаний экспертной системы, но для работы в онлайн-режиме принятия решений данный формализм непригоден. В режиме реального времени при принятии решений в экспертной системе предлагается использовать другой формализм – многомерный матричный паттерн поведения группы ВР, реализующий альтернативный универсальный подход к описанию динамики изменения данных в ЭС [11]. Многомерный матричный паттерн служит для задания истории и прогноза состояний объекта контроля по данным мониторинга, представляющим собой группу временных рядов.

Многомерный матричный паттерн P описывается набором компонентов:

$$P = \langle B, D_B, A, D_A, D_P, R \rangle,$$

где, B – идентифицирующая матрица (TemplateBefore), описывающая возможную типовую динамику изменения данных в ВР до некоторого момента времени, ее строки соответствуют выбранным ВР из группы, а столбцы соответствуют моментам времени, сами элементы матрицы содержат значения отсчетов ВР;

D_B – дескриптор, описывающий процесс формирования матрицы B , процессы преобразований ВР в вычисляемую матрицу B' , используемую впоследствии для сравнения с B , а также методы их сравнения;

A – прогнозирующая матрица (TemplateAfter), описывающая динамику изменения данных в группе ВР или состояние объекта мониторинга после текущего момента времени;

D_A – дескриптор, описывающий процесс формирования матрицы A ;

D_P – дескриптор, описывающий паттерн в целом и отношения групп ВР;

R – маркер состояния, который ставит в соответствие паттерну элемент из множества возможных состояний объекта.

Элементы идентифицирующей, вычисляемой и прогнозирующей матриц имеют один из перечисленных ниже типов:

1. Логический (значения «true», «false»);
2. Целочисленный;
3. Вещественный с фиксированной точкой;
4. Нечеткий (значения элементов являются терминами лингвистических переменных, например, «сильный», «умеренный», «слабый»);
5. null-значения (not-defined, non-significant, not-specified).

Null – значения необходимы для выравнивания количества элементов в различных строках матриц. Например, null – значения присваиваются элементам, значение которых невозможно вычислить (not-defined), не требуется для сравнительного анализа (non-significant), либо же отсутствует в базе данных (not-specified).

При формировании ВР и матриц осуществляется приведение типов, правила которого отражены на рис. 1.

	Bool	Int	Float	Fuzzy	Null
Bool		$y = \begin{cases} 1, x = \text{true} \\ 0, x = \text{false} \end{cases}$	$y = \begin{cases} 1, x = \text{true} \\ 0, x = \text{false} \end{cases}$	-	not-defined
Int	$y = \begin{cases} \text{true}, x \geq 1 \\ \text{false}, x < 1 \end{cases}$		$y = x$	Фаззификация(x)	not-defined
Float	$y = \begin{cases} \text{true}, x > 1 \\ \text{false}, x \leq 1 \end{cases}$	$y = [x]$		Фаззификация(x)	not-defined
Fuzzy	-	Дефаззификация(x)	Дефаззификация(x)		not-defined
Null	-	-	-	-	

Рис.1. Правила преобразования типов при формировании элементов матриц

Fig.1. Rules for converting types when forming matrix elements

Дескрипторы D_B и D_A также имеют матричную структуру. В каждой строке матрицы дескриптора указывается следующая информация:

1. Идентификатор ВР, которому соответствует строка матрицы;
2. Идентификатор функции, применяемой для преобразования отсчетов ВР в элемент матрицы;
3. Тип данных, к которому требуется преобразовать отсчеты ВР;
4. Эталонное значение в идентифицирующей матрице B ;
5. Операция, используемая для сравнения элементов B и B' (допустимы операции сравнения и операция *in*, которая проверяет значение отсчета на принадлежность диапазону значений).

На рис. 2 представлена схема взаимосвязи компонентов многомерного матричного паттерна поведения.

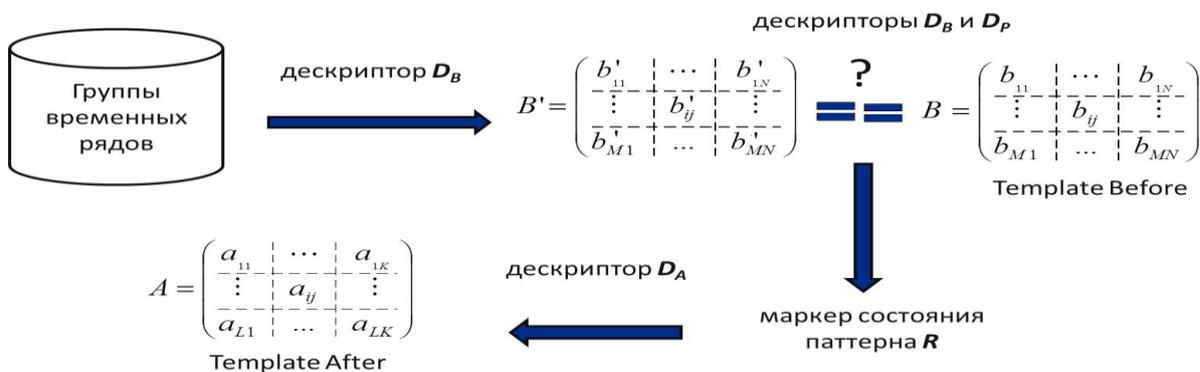


Рис. 2. Схема взаимосвязи компонентов многомерного матричного паттерна поведения

Fig. 2. Diagram of the interconnection of multidimensional components matrix pattern of behavior

Отметим, что один и тот же ряд может использоваться для формирования различных строк рассматриваемых матриц. Дескриптор паттерна D_P позволяет задать количество анализируемых отсчетов группы ВР в прошлом (CountPast), количество временных отсчетов при прогнозе (CountFuture), размерность шага по времени, а также описать темпоральные отношения между отсчетами в группе ВР. Эти отношения позволяют анализировать временные особенности в изменении данных, оперируя результатами сравнения значений матриц B

и B' , связанными знаками операций «AND» и «OR». Предлагается использовать такие темпоральные отношения порядка следования и фиксации наблюдения значений на временном интервале, как «From-To», «Before», «After», «Simultaneously», «Duration».

Кроме описанных выше характеристик паттерна, он имеет маркер, соответствующий нормальному, нештатному и неопознанному состоянию объекта мониторинга.

Процесс принятия решений состоит из нескольких этапов:

Этап 1. Вычисление элементов матрицы B' по группе ВРсогласно дескриптору D_B . выполняется формирование, на основе которых производится расчет.

Этап 2. Сравнение элементов B' с элементами идентифицирующей матрицы B согласно дескрипторам D_B и D_P , определение степени соответствия B' и B .

Этап 3. Анализ степени соответствия реальных данных идентифицирующему шаблону является основой принятия решения о состоянии или о прогнозе состояния контролируемого объекта, описанных прогнозирующей матрицей A с помощью дескриптора D_A .

Обсуждение результатов. Многомерный матричный паттерн предназначен непосредственно для принятия решений в экспертной системе, а модифицированная темпоральная грамматика – для выявления закономерностей в данных по их экспертному описанию. Для того чтобы одновременно использовать достоинства рассмотренных гибридных подходов к формализации экспертных знаний о темпоральных закономерностях в группе временных рядов, был разработан синтаксически ориентированный конвертор описаний.

Общая схема функционирования ЭС, основанной на матричных паттернах, приведена на рис. 3.

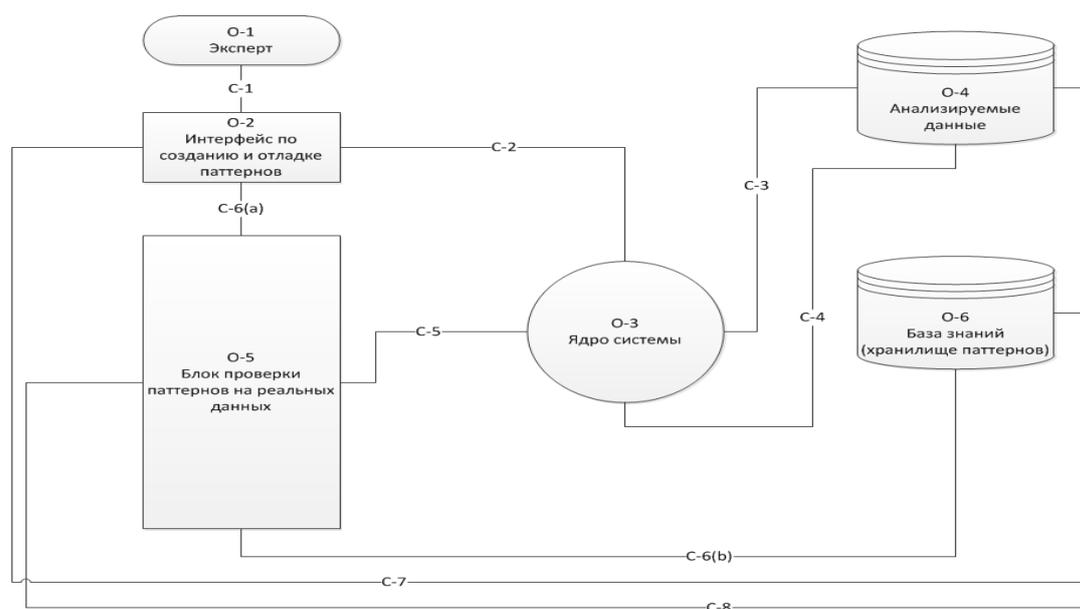


Рис. 3. Общая схема создания и применения матричных паттернов в экспертных системах

Fig. 3. General scheme for the creation and application of matrix patterns in Expert systems

Вывод. Новизну работы представляет совместное применение для принятия решений двух различных гибридных подходов к формализации экспертных знаний, а именно, модифицированной темпоральной грамматики для описания экспертом закономерностей в данных и матричных паттернов поведения.

Достоинством внедрения данных подходов является сокращение времени на выявление темпоральных закономерностей и автоматизация формирования матричного паттерна

системы принятия решения на основе проверенного на реальных данных экспертного описания взаимосвязей в данных мониторинга.

Библиографический список:

1. Parsaye K.A. Characterization of Data Mining Technologies and Processes // The Journal of Data Warehousing. - 1998.- № 1.
2. Сучкова Л.И., К вопросу о методе выявления закономерностей в данных мониторинга [Текст], /Сучкова Л.И., Стариков Е.С.// Материалы 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2013.- С. 155-157.
3. Стариков Е.С., Формализация описания закономерностей в группах временных рядов [Текст], / Стариков Е.С. // Сборник по результатам XXI заочной научной конференции «Международный научно-исследовательский журнал», №11 (18) Часть 1 - Екатеринбург, 2013. - С. 131-132.
4. Павлов С.И., Системы искусственного интеллекта : учебное пособие / С.И. Павлов. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. - Ч. 1. - 175 с. - ISBN 978-5-4332-0013-5; [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208933>.
5. Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов : учебное пособие - Ульяновск : УлГТУ, 2010. - 320 с.
6. M. Erchen, F., Ultsch, A.: Mining Hierarchical Temporal Patterns in Multivariate Time Series. In: Biundo, S., Fruhwirth, T., Palm, G. (eds.), KI 2004. Advances in Artificial Intelligence, Proceedings 27 th Annual German Conference in AI, Ulm, Germany, Springer, Heidelberg, (2004), pp. 127-140. - URL: <http://www.mybytes.de/papers/moerchen04mining.pdf>.
7. Бокс Дж., Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
9. Стариков Е.С. Универсальный подход к описанию и использованию экспертной информации в системах мониторинга на базе паттернов поведения [Текст] / Стариков Е.С., Сучкова Л.И., Корешков Ю.Н., Корешкова А.А. // Ползуновский альманах, 2015, № 1, С.31-35.
10. Сучкова Л.И. Алгоритмическое обеспечение мониторинга нештатных состояний объекта контроля на основе многомерных паттернов [Текст] / Сучкова Л.И. // Известия АГУ. – № 1/2/2013. – С. 118-122.
11. Сучкова Л.И., Идентификация воздействий в приборах охраны предупреждающего типа [Текст]: монография / Л.И. Сучкова, И.А. Чумаков, А.Г. Якунин. – Deutschland, Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing. – 2013. -181 с.

References:

1. Parsaye K.A. Characterization of Data Mining Technologies and Processes. The Journal of Data Warehousing. 1998;1.
2. Suchkova L.I., Starikov E.S. K voprosu o metode vyyavleniya zakonornostey v dannyx monitoringa. Materialy 14 Mezhdunarodnoy konferentsii "Izmerenie, kontrol, informatizatsiya". Barnaul: AltGTU; 2013. 155-157. [Suchkova L.I., Starikov E.S. On the question of the method of identifying patterns in monitoring data. Proceedings of 14th International Conference "Measuring, Control and Automation". Barnaul: AltSTU; 2013. 155-157. (In Russ.)]
3. Starikov E.S. Formalizatsiya opisaniya zakonornostey v gruppakh vremennykh ryadov. Sbornik po rezultatam XXI zaочноy nauchnoy konferentsii "Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal". Chast 1. Ekaterinburg; 2013;11(18):131-132. [Starikov E.S. The formalization of regularities description for time series groups. Collection of the results of the 21st Scientific Conference "Research Journal of International Studies". Pt. 1. Ekaterinburg; 2013;11(18):131-132.(In Russ.)]
4. Pavlov S.I. Sistemy iskusstvennogo intellekta: uchebnoye posobie. Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy universitet sistem upravleniya i radioelektroniki; 2011;1:175. ISBN 978-5-4332-

0013-5. [Pavlov S.I. Systems of artificial intelligence: tutorial. Tomsk: Tomsk State University of Control System and Radio Electronics; 2011;1:175 (In Russ.)] Available from: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208933>

5. Yarushkina N.G., Afanasyeva T.V., Perfilyeva I.G. *Intellektualnyy analiz vremennykh ryadov: uchebnoye posobie*. Ulyanovsk: UIGTU; 2010. 320 s. [Yarushkina N.G., Afanasyeva T.V., Perfilyeva I.G. *Intelligent analysis of time series: tutorial*. Ulyanovsk: UISTU; 2010. 320 p. (In Russ.)]

6. M.Yorchen, F., Ultsch, A. Mining Hierarchical Temporal Patterns in Multivariate Time Series. In: Biundo, S., Fruhwirth, T., Palm, G. (Eds.), *KI 2004. Advances in Artificial Intelligence, Proceedings 27th Annual German Conference in AI*, Ulm, Germany: Springer, Heidelberg; 2004, 127-140. Available from: <http://www.mybytes.de/papers/moerchen04mining.pdf>

7. Boks Dzh., Dzenkins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie*. M.: Mir; 1974. 406 s. [Box G., Jeniks G. *Time series analysis. Prediction and control*. Moscow: Mir; 1974. 406 p. (In Russ.)]

9. Starikov E.S. Suchkova L.I., Koreshkov Yu.N., Koreshkova A.A. *Universalnyy podkhod k opisaniyu i ispolzovaniyu ekspertnoy informatsii v sistemakh monitoringa na baze patternov povedeniya*. Polzunovskiy almanakh. 2015;1:31-35. [Starikov E.S. Suchkova L.I., Koreshkov Yu.N., Koreshkova A.A. *Universal approach to the description and use of expert information in monitoring systems based on the patterns of behavior*. Polzunov's Anthology. 2015;1:31-35. (In Russ.)]

10. Suchkova L.I. *Algoritmicheskoye obespechenie monitoringa neshtatnykh sostoyaniy obekta kontrolya na osnove mnogomernykh patternov*. Izvestiya AGU. 2013;1/2:118-122. [Suchkova L.I. *Algorithmic support of the improper control object states on the basis of multidimensional patterns*. News of ASU. 2013;1/2:118-122. (In Russ.)]

11. Suchkova L.I. Chumakov I.A., Yakunin A.G. *Identifikatsiya vozdeystviy v priborakh okhrany uprezhdayushchego tipa: monografiya*. Doitschland, Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing; 2013. 181 s. [Suchkova L.I. Chumakov I.A., Yakunin A.G. *Identification of influences in the devices of protection anticipating type: monograph*. Doitschland, Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing; 2013. 181 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Стариков Егор Сергеевич – аспирант.

Сучкова Лариса Иннокентьевна – доктор технических наук, доцент.

Information about the authors.

Egor S. Staricov – Postgraduate student.

Larisa I. Suchkova – Dr. Sc. (Technical), Prof., Assoc. Prof.

Конфликт интересов

Conflict of interest

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

Поступила в редакцию 23.09.2016.

Received 23.09.2016.

Принята в печать 20.11.2016.

Accepted for publication 20.11.2016.

Для цитирования: Аллаев М.О. Оценка устойчивости массивов грунта с учётом неоднородности слагающих пород на базе моделей случайных величин и случайных функций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-112-122.

For citation: Allaev M.O. Evaluation of subsoil massif stability taking into account the irregularity of constituent rocks on the basis of a random size and function model. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43 (4): 112-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-112-122

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.131.3.

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-112-122

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВОВ ГРУНТА С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ СЛАГАЮЩИХ ПОРОД НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ

Аллаев М.О.

Дагестанский государственный технический университет,
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,
e-mail: allae2014@mail.ru

Резюме: Цель. Статья посвящена дальнейшему совершенствованию расчетных методов по изучению причин возникновения оползней и их развития. **Метод.** Существующий детерминистический подход к оценке устойчивости вносит некоторую неопределенность. Предлагается прогноз устойчивости массива осуществлять путем комплексного учета влияния на ее величину изменчивости входных параметров в целом на базе моделей случайных величин и, в случае наличия информации о состоянии массива в разные моменты времени, воспользоваться моделью случайной функции. Использование модели случайной функции при решении задачи прогноза устойчивости массива позволяет оценить такие важные параметры безопасного развития оползневого процесса, как вероятность выброса, т.е. снижение значения коэффициента безопасности ниже его допустимой величины и время достижения этого условия, т.е. сохранения безопасного состояния массива. Приведена методика определения стоимости мероприятий, направленных на обеспечение необходимой величины коэффициента устойчивости или надёжности, когда их расчетные значения окажутся меньше соответствующих допустимых значений. **Результат.** Реализация мероприятий по обеспечению устойчивости массива грунта связана с некоторыми затратами, а в случае оползня с дополнительными потерями, вызванными его последствиями. Стоимость мероприятий и вероятность потерь являются функционалами коэффициента устойчивости массива. Получено выражение по определению оптимального значения коэффициента устойчивости массива, который будет соответствовать минимуму суммарных затрат на мероприятия и на дополнительные потери в случае оползня.

Вывод. Проведенные расчеты показали, что надёжность и параметры безопасного состояния массива (вероятность и время отсутствия потери устойчивости) зависят от его строения и характеристик слагающих массив пород.

Ключевые слова: оползень, случайная функция, вероятность, изменчивость, процесс, время, прогноз, дисперсия, надёжность, отказ, оптимизация, выброс, коэффициент устойчивости

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

EVALUATION OF SUBSOIL MASSIF STABILITY TAKING INTO ACCOUNT THE IRREGULARITY OF CONSTITUENT ROCKS ON THE BASIS OF A RANDOM SIZE AND FUNCTION MODEL

Mazhid O. Allaev

Daghestan State Technica l University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

¹e-mail: allae2014@mail.ru

Abstract: Objectives. This article considers issues involved in the development and continued improvement of computing methods for the study of the causes of landslides. **Methods .**The existing deterministic assessment approach to stability assessment contains an element of uncertainty. A mass stability forecast, accomplished by means of a complex account of the impact on the variation of its input parameters generally on the basis of modelled random variables, or, in cases where information on the status of the massif at different times is present, a random function model, is proposed. The use of the random function model when solving the problem of forecasting the stability of the massif enables the evaluation of such important parameters of the safe development of the landslide process as probability of occurrence, i.e. the decrease below the permissible level of the safety coefficient, and the time period of development, so as to maintain the safety status of the massif. A method for determining the cost of maintaining the necessary stability or reliability coefficient value at a time when their calculated values are less than the respective permissible values is shown. **Results.** The implementation of measures to ensure the stability of the ground massif are associated with certain costs, and, in the case of a landslide, with additional losses incurred as a consequence. The cost of activities and the likelihood of loss are functional stability factors. The arrived-at expression determines the optimal massif stability coefficient value, which will correspond with the minimum total cost of the exercise and with additional losses in the event of a landslide. **Conclusion.**The calculations have shown that the stability of a massif and safety parameters (loss of stability in the absence of time and probability) depend on the structure and characteristics of the constituent rocks of the massif.

Keywords: landslide, random function, probability, variability, process, time, prognosis, variance, reliability, failure, optimisation, output, stability coefficient

Введение. Одними из широко распространенных экзогенных геологических процессов являются оползни. В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных изучению причин их развития, базирующихся на геолого-генетическом подходе. Учитывая важность развития подобных исследований нельзя не отметить, что их практическая реализация вызывает определенные трудности, связанные с отсутствием количественных моделей, позволяющих на основе этого подхода оценить состояние массива. Поэтому актуальным остается дальнейшее совершенствование расчетных методов на базе учета прочности грунтов.

Постановка задачи. Наиболее распространенным методом прогноза состояния массива является его оценка по величине коэффициента устойчивости. Расчётные схемы для оползней типа скольжения достаточно часто применяются в практике проектирования откосов насыпей автомобильных дорог и могут быть использованы как для определения коэффициента устойчивости, так и для вычисления оползневого давления. Поверхность смещения при этом может быть плоская или криволинейная. Криволинейная поверхность смещения соответствует механизму (смещения) разрушения в виде среза с поворотом.

В результате расчёта определяют минимальный коэффициент устойчивости и оползневое давление для вертикального сечения или откоса, предполагается устройство противооползневой удерживающей конструкции. Задача имеет два варианта решения.

Первый, соответствует зафиксированной (по данным изысканий) поверхности в склоне, которая принимается в виде круглоцилиндрической. Второй, связан с нахождением предполагаемой, наиболее опасной поверхности, по которой может произойти оползень.

Во втором варианте сложность задачи заключается в определении положения и очерта-ния наиболее опасной поверхности скольжения, координат ее центра. Это зависит от ряда фак-торов и может быть выполнено подбором, т.е. путем использования специальных приемов.

В настоящее время такая задача решается с использованием метода конечных элемен-тов [16] на ЭВМ, что позволяет выполнять массовые расчеты и повышать их точность. Для этого по специально составленной программе из всех возможных очертаний опасной по-верхности отыскивается наиболее вероятный вариант, соответствующий минимальному зна-чению коэффициента устойчивости. Вместе с тем, даже при использовании современных вычислительных комплексов необходимо знать исходные предпосылки метода расчета и по-рядок определения коэффициента устойчивости.

На практике имеются два различных подхода к определению степени устойчивости склона или откоса с использованием расчетной схемы в виде круглоцилиндрической по-верхности скольжения.

В первом варианте применяется способ, согласно которому заданный массив, смеща-ющийся по круглоцилиндрической поверхности, рассматривается как монолитное твёрдое тело. Первый вариант можно трактовать как способ одного блока. Для практических расче-тов он разработан Д.Тейлором [13,17,18].

Во втором варианте применяется способ расчленение массива грунта на отдельные вертикальные блоки, каждый из которых принимается в виде монолитного твёрдого тела, стоящего своей подошвой на круглоцилиндрической поверхности смещения. В отечествен-ной практике используется способ разбивки на отдельные блоки (отсеки).

Коэффициент устойчивости определяется по отношению суммы моментов удержи-вающих сил к сумме моментов сдвигающих сил относительно центра круглоцилиндриче-ской поверхности смещения. В конечном итоге расчётная формула для определения коэф-фициента устойчивости принимает следующий вид [9,11,13,17]

$$K = \frac{F_n}{F_c} = \frac{\sum_{i=1}^n f V_i \gamma \cos \alpha_i + c L}{\sum_{i=1}^n V_i \gamma \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

где V - объем i -го отсека, получаемого при разбивке сползающей части массива на n отсеков, согласно идее метода круглоцилиндрической поверхности скольжения;

f – среднее значение интенсивности сил трения по поверхности скольжения;

c – среднее значение сцепления грунта;

L – длина дуги скольжения;

α_i - угол между нормалью к дуге скольжения в середине i -го отсека и направлением его веса (вертикалью).

Среднее значение сил трения равно

$$f = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^n l_j f_j, \quad (2)$$

где l_j и f_j - соответственно длина дуги скольжения и значение сил трения в преде-лах i -го слоя грунта.

Среднее значение сцепления и удельного веса грунтов определяют аналогично.

Используемые в расчетах параметры массива являются случайными величинами. Действительно, угол внутреннего трения, удельное сцепление и вес отдельных отсеков из-меняются под воздействием множества случайных факторов т.е. являются случайными ве-

личинами. Поэтому прогноз состояния грунтового массива (устойчивость, момент разрушения, скорость развития процесса и т.д.) в детерминированной постановке, в том числе и с использованием численных методов, является процессом принятия решения в условиях неопределённости его свойств.

Методы исследования. Действующие методы расчета устойчивости откосов и склонов, согласно нормативным документам, учитывают вероятностный характер параметров массива только в части обработки исходных данных, т.е. при расчётах используются расчётные значения параметров массива, устанавливаемые путём построения доверительного интервала при нормативной величине доверительной вероятности. Однако по вероятности оценки отдельных параметров нельзя судить однозначно о достоверности оценки устойчивости массива.

Поэтому представляется целесообразным прогноз устойчивости откосов и склонов осуществлять в вероятностной постановке на основе методов теории вероятностей, теории случайных функций, путём комплексного учёта влияния на ее величину изменчивости входных параметров в целом [1,23,24].

Предлагается методика прогноза оценки устойчивости массивов с учётом неоднородности слагающих его пород на базе моделей случайных величин и случайных функций.

При этом надёжность устойчивости массива можно определить из выражения [6,7,22]

$$H = \frac{1}{2} [1 + \Phi_z(z)] + \frac{1}{6} \frac{m_3 F}{\sigma_F^3} \varphi_0^{(2)}(z) + \frac{1}{24} \left(\frac{m_4 F}{\sigma_F^4} - 3 \right) \varphi_0^{(3)}(z), \quad (3)$$

$$z = \frac{K - 1}{\sqrt{v_n^2 K^2 + v_c^2}}, \quad (4)$$

где v_n и v_c , соответственно, коэффициенты вариации препятствующих и сдвигающих сил;

$m_3 F$ и $m_4 F$ - третий и четвертый центральные моменты параметра $F = F_n - F_c$;

$\Phi_z(z)$ - интеграл вероятностей;

$\varphi_0^{(2)}(z)$ и $\varphi_0^{(3)}(z)$ - соответственно вторая и третья производные, принимаемые по таблице [2];

σ_F - среднее квадратическое отклонение F .

Дисперсия σ_F^2 , рассчитанная методом линеаризации, равна

$$\sigma_F^2 = \sigma_{F_n}^2 + \sigma_{F_c}^2, \quad (5)$$

где $\sigma_{F_n}^2$ и $\sigma_{F_c}^2$ - дисперсии удерживающих и сдвигающих сил, равные

$$\sigma_{F_n}^2 = \left(\gamma \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_c \right)^2 \sigma_f^2 + \left(f \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_i \right)^2 \sigma_\gamma^2 + L^2 \sigma_c^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{F_c}^2 = \left(\sum_{i=1}^n v_i \sin \alpha_i \right)^2 \sigma_\gamma^2 \quad (7)$$

где σ_f^2 , σ_c^2 , σ_γ^2 - соответственно дисперсии f , c , γ равны:

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^m l_j^2 \sigma_{fj}^2 \quad (8)$$

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^m l_j^2 \sigma_{cj}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{\gamma}^2 = \frac{1}{L^2} \sum_{j=1}^m l_j^2 \sigma_{\gamma j}^2 \quad (10)$$

где $\sigma_{fj}^2, \sigma_{cj}^2, \sigma_{\gamma j}^2$ – соответственно дисперсии f_j, c_j, γ_j грунта j -го слоя.

Центральные моменты m_3F и m_4F равны,

$$m_3F = m_3F_n + m_3F_c; \quad (11)$$

$$m_4F = m_4F_n + m_4F_c + b\sigma_{F_n}^2\sigma_{F_c}^2; \quad (12)$$

$$m_3F_n = \left(\gamma \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_i \right) m_3f + \left(f \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_i \right)^3 m_3\gamma + L^3 m_3c; \quad (13)$$

$$m_3F_c = \left(\sum_{i=1}^n v_i \sin \alpha_i \right) m_3\gamma_n; \quad (14)$$

$$m_4F_n = \left(\gamma \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_i \right)^4 m_4f + \left(f \sum_{i=1}^n v_i \cos \alpha_i \right)^4 m_4\gamma + L^4 m_4c \quad (15)$$

$$m_4F_c = \left(\sum_{i=1}^n v_i \sin \alpha_i \right)^4 m_4\gamma \quad (16)$$

где, $m_3f, m_3\gamma, m_3c, m_4f, m_4\gamma, m_4c$ – соответственно, третьи и четвертые центральные моменты параметров f, γ, c .

Выражение (3) позволяет определить надёжность при известном коэффициенте устойчивости [15,19]. Последний, должен быть не ниже допустимого значения K_{δ} , а при $K=1$ массив находится в предельном состоянии.

Если вычисленное значение K оказывается меньше допустимого, то проводятся определённые мероприятия, способствующие соблюдению условия $K \geq K_{\delta}$. Однако при небольшом превышении вновь вычисленного значения коэффициента устойчивости над допустимым значением можно не достичь требуемой величины надёжности.

Поэтому выбор мероприятий здесь необходимо осуществлять с учётом одновременного достижения двух условий, т.е.

$$K \geq K_{\delta}; H \geq H_{\delta} \quad (17)$$

На практике же проверяется лишь одно условие, а именно $K \geq K_{\delta}$.

Анализ выражения (3) показывает, что коэффициент запаса следует выбрать в соответствии с грунтовыми условиями. В случае однородных грунтов его величина может незначительно отличаться от K_{δ} , т.е. с уменьшением неоднородности грунтов и увеличением значения их характеристик надёжность повышается.

Расчёты, согласно нормативным документам, эту особенность не учитывают, а предложенный подход позволяет реализовать это требование количественно. Это поможет детальному изучению грунтов, и определить мероприятия по обеспечению устойчивости грунтовых массивов с учётом их особенностей.

Параметры оползневой массы изменяются во времени. При наличии соответствующей информации об изменении во времени входных параметров f, γ, c одновременно можно определить надёжность в разные моменты времени [6,8,19], а также, пользуясь соотношениями (1) и (3), и проверить соблюдения условий (17). Время, в течение которого эти условия соблюдаются, следует считать безопасным с точки зрения сохранения устойчивости массива.

Однако при наличии информации для непосредственного изучения самого процесса

по времени целесообразно использовать более точные модели, в частности, модель случай-ной функции [5,6]. При этом задача прогноза устойчивости массива становится более содер-жательной и позволяет оценить такие важные параметры безопасного развития оползневого процесса, как вероятность выброса, т.е. снижение значения коэффициента безопасности ни-же его допустимой величины K_δ ($K < K_\delta$) и время достижения этого условия, т.е. сохранения безопасного состояния массива.

Для использования модели случайной функции совокупность значений коэффициента устойчивости, рассчитанных в отдельные моменты времени, следует рассматривать как ее реализацию [2,3,4,8]. При этом коэффициент устойчивости может изменяться во времени двояко: во-первых, с постоянным средним значением K и случайными отклонениями во вре-мени вокруг него; во-вторых, с непрерывно изменяющимся (увеличивающимся или умень-шающимся) средним значением (t) и случайными отклонениями (t) вокруг него.

Коэффициент устойчивости, рассчитанный в фиксированный момент времени по выражению (1), является функцией случайных аргументов f, c, γ [20,21,22].

Дисперсию « K » при этом можно определить методом линеаризации [2,10,19,20]. Частные производные по аргументам f, c, γ равны

$$\frac{dK}{df} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \gamma \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n v_i \gamma \sin \alpha_i} = a, \quad (18)$$

$$\frac{dK}{dc} = \frac{L}{\sum_{i=1}^n v_i \gamma \sin \alpha_i} = b, \quad (19)$$

$$\frac{dK}{d\gamma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i \gamma \sin \alpha_i} \left(\sum_{i=1}^n f v_i \cos \alpha_i \frac{K}{\gamma} \right) = s. \quad (20)$$

С учетом выражений для частных производных дисперсия коэффициента устойчиво-сти определяется [20,21]

$$D[K] = a^2 \sigma_f^2 + b^2 \sigma_c^2 + s^2 \sigma_\gamma^2 \quad (21)$$

Допустим, что коэффициент устойчивости представляет собой сумма детерминиро-ванной функции $\bar{K}(t)$ (непрерывно уменьшается в среднем) и стационарной случайной со-ставляющей $K(t)$ с нулевым средним, дисперсией $D[K]$ и корреляционной функцией $K[\tau]$. Считая, что в фиксированные моменты времени значения коэффициента устойчивости мас-сива и его производной независимы, среднее число пересечений $K[\tau]$ за его допустимую величину K_δ в единицу времени за период T [8,14] равно

$$\nu = \frac{\sigma_v}{2T\sigma_k \sqrt{2\pi}} \int_0^T \left[y + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(e^{-\frac{y^2}{2}} + y \sqrt{\frac{\pi}{2}} [2F(y) - 1] \right) \right] e^{-\frac{[K(\tau) - \bar{K}_\delta]^2}{2D[K]}} dt, \quad (22)$$

где, $y = \frac{K(\tau)}{\sigma}$, σ_v^2 - дисперсия производной случайной функции;

$F(y)$ – функция Лапласа;

$K(\tau)$ – корреляционная функция.

Если значения коэффициента устойчивости образуют стационарную нормальную случайную функцию с постоянным во времени средним значением, то среднее число выбро-сов в единицу времени [2,3,4,14,20]

$$v = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_k} e^{\frac{[K-K_0]^2}{2\sigma_k^2}}, \quad (23)$$

где, $\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{dv^2} K_k(\tau) |_{\tau=0}$;

τ - параметр корреляционной функции.

На практике важно знать вероятность первого по времени уменьшения коэффициента устойчивости ниже его допустимого значения. Если вероятность такого уменьшения будет известна, то среднее время, за которое произойдет оно, определится из соотношения [2,14,21]

$$T = \int_0^{\infty} P(T) dT. \quad (24)$$

Снижение величины коэффициента устойчивости ниже его допустимого значения на практике вовсе не допускается, или же это является редким событием. При предотвращении такого развития процесса практически устраняются причины, приведшие к этому состоянию, а при частичном их сохранении они качественно по-иному влияют на состояние массива грунта.

Это позволяет считать пересечение коэффициентом устойчивости значения K_0 независимым событием. Тогда число пересечений (выбросов) за время T можно считать подчиняющимся закону Пуассона и вероятность отсутствия выброса за время T [12,25,26]

$$P_0(T) = e^{-vT} \quad (25)$$

В случае стационарного нормального процесса эта вероятность определится из соотношения [12,25]

$$P_0(T) = EXP \left[-\frac{T}{2\pi} \sqrt{-\frac{K_k(\tau)}{K_k(\tau) |_{\tau=0}} * e^{\frac{-(K-K_0)}{2D[K]}}} \right], \quad (26)$$

где $K_k(\tau) = \frac{d^2}{d\tau^2} K_k(\tau)$ - вторая производная от корреляционной функции $K_k(\tau)$.

Конкретное выражение для корреляционной функции выбирается с учётом особенностей изменения коэффициента устойчивости.

Допустим, корреляционная функция случайной функции коэффициента устойчивости имеет вид

$$K_n(\tau) = D(K) e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right), \quad (27)$$

α и β - параметры корреляционной функции, зависящие от структуры случайной функции.

С учётом (27) выражение (26) принимает вид

$$P_0(T) = EXP \left[-\frac{T}{2\pi} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} * e^{\frac{-(K-K_0)^2}{2D[K]}}} \right], \quad (28)$$

Среднее время достижения коэффициентом устойчивости значения его допустимой величины K_0 из (24) с учетом (28) равно

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{\frac{-(K-K_0)^2}{2D[K]}}} \quad (29)$$

Как видно, время достижения коэффициентом устойчивости значения K_0 тем меньше,

чем более неоднороден процесс изменения $K(t)$.

Величины надёжностей, рассчитанные по выражению (28) или коэффициенты устойчивости по (1), могут оказаться меньше их соответствующих допустимых значений, назначенных из практического опыта наблюдений за аналогичными массивами или иных соображений.

Для достижения этих величин необходимо проводить определённые мероприятия, реализация которых связана с некоторыми затратами [7], а в случае оползня с дополнительными потерями, вызванными его последствиями.

При этом суммарные затраты будут равны

$$C = C_m + C_n P_v, \quad (30)$$

где C_m – стоимость мероприятий, проводимых для повышения устойчивости массива; C_n – стоимость потерь в случае оползня; P_v – вероятность потерь, равная $P_v = 1 - P$, где P – надёжность прогноза коэффициента устойчивости, определяемая в фиксированный момент времени по соотношению (3), а с учётом фактора времени по (28).

Стоимость мероприятий и вероятность потерь являются функционалами коэффициента устойчивости. Оптимальное значение его будет соответствовать минимуму суммарных затрат (30). Для его определения стоимость проводимых мероприятий выразим через коэффициент устойчивости.

Стоимость мероприятий равна

$$C_m = (K - K_p) C_K, \quad (31)$$

где K_p – значение коэффициента устойчивости, рассчитанное при исходных параметрах массива;

C_K – стоимость мероприятий, обеспечивающих единицу отношения от $(K - K_p)$.

С учётом выражений (28) и (31) соотношение (30) принимает вид

$$C = (K - K_p) C_K + C_n \left(1 - e^{-\frac{T}{2\pi} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} * e^{-\frac{(K - K_p)^2}{2D[K]}}} \right) \quad (32)$$

Находим частную производную от соотношения (31) по коэффициенту устойчивости K и приравняем ее к нулю

$$C_m = \frac{C_n T \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} (K - K_p)}{2\pi D[K]} e^{-\frac{(K - K_p)^2}{2D[K]}} e^{-\frac{T}{2\pi} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{(K - K_p)^2}{2D[K]}}} = 0 \quad (33)$$

Уравнение (32) представим в виде

$$\frac{2\pi D[K] C_m}{C_n T \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} (K - K_p)} e^{-\frac{(K - K_p)^2}{2D[K]}} = e^{-\frac{T}{2\pi} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{(K - K_p)^2}{2D[K]}}} \quad (34)$$

Уравнение (34) можно решить графически.

В результате получим оптимальное значение коэффициента устойчивости с учётом ущерба в случае потери устойчивости массива.

Обсуждение результатов. Прогноз устойчивости откосов и склонов впервые осуществлен в вероятностной постановке, используя теорию надёжности на основе методов теории вероятностей и теории случайных функций.

Выражение (3) позволяет определить надёжность при известном минимальном значении коэффициента устойчивости $K_{мин}$, полученная детерминистическими инженерными методами. Величина надёжности должна быть высокая, и значение коэффициента устойчивости $K_{мин}$ должно быть не ниже допустимого значения K_0 , т.е. соблюдено неравенство $K_{мин} > K_0$, а при $K_{мин} = K_0$ массив находится в предельном состоянии.

В случае когда, вычисленное значение $K_{мин}$ оказывается меньше допустимого, то проводятся определённые мероприятия, приводящие к соблюдению условия $K_{мин} \geq K_0$, реализация которых связана с некоторыми затратами, а в случае оползня с дополнительными потерями, вызванными его последствиями.

С целью оптимизации затрат на мероприятия по повышению устойчивости массива и

на ликвидацию последствий в случае нарушения его устойчивости получена зависимость суммарных затрат от коэффициента устойчивости. Оптимальное значение его будет соответствовать минимуму суммарных затрат

Вывод. Расчёты, выполненные по выше приведённой методике показали, что надёжность и параметры безопасного состояния массива (вероятность и время отсутствия потери устойчивости) зависят от его строения и характеристик слагающих массив пород.

Библиографический список:

1. Аллаев М.О., Загиров Ш.Ш. и др. «Теоретические и методологические аспекты оптимального комплексирования методов исследований оснований сооружений». Махачкала: ДГТУ, 2002.- 108с.
2. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М., 1982. 351с.
3. Вентцель Е.С. «Теория вероятностей», М., 1989, стр.572.
4. Гаскаров Д.В. и др. Прогнозирование технического состояния и надежности радио-электронной аппаратуры. М., 1974.223с.
5. Гулакян К.А. и др. Прогнозирование оползневых процессов. М., 1977. 135с.
6. Ермолаев М.Н., Михеев В.В. «Надёжность оснований сооружений», Л., 1976, стр. 151.
7. Загиров Ш.Ш. Оптимизация инженерно-геологических изысканий оснований сооружений. М., изд-во «Всесоюзного заочного политехн. инст.», 1990. 394с.
8. Загиров Ш.Ш. К прогнозированию состояния процессов и оптимизации их исследований. ДПИ. Махачкала, 1987. Деп. В ВИНТИ 17,06,87, 4364-В 87,21 с.
9. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб.пособие для строит. спец. вузов / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский и др.; Под С.Б. Ухова. - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2007. - 566с.
10. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968. 288с.
11. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ПНИ-ИИС. - М.: Стройиздат, 1984. - 80 с.
12. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных процессов. М., 1968. 463с.
13. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М., 1985. 479с.
14. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М., 1970. 392с.
15. Устойчивость грунтовых массивов: учеб.метод. пособие / сост. О.П. Дружакина, К.В. Гаврилова. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 68с.
16. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987, 221с.
17. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов // Волгоград: Нижнее-Волжское кн. изд. 1979. С.238.
18. Krahn, J. Stability modeling with Slope /W.An engineering methodology.First Edition. Revision I / J. Krahn // Calgary, Alta: Geo-Slope International Ltd., 2004.
19. Уткин В.С., Шепелина Е.А. Расчет надежности оснований и фундаментов по критерию прочности при ограниченной информации о нагрузке //Инж. строит. журнал. 2013. №1. С.48-56.
20. Rzhanitsyn A.R., Teoriya raschetastroitelnykh konstruktsiy na nezhdnost [Calculation theory of building structures reliability]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 239 p. (rus).
21. Shpete G., Nadezhnost nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy [Reliability of the supporting constructions. Translation from German by O.O. Andreev]. Moscow: Stroyizdat, 1994. 288 p. (rus).

22. Rayder V.D., Teoriyanadezhnosti v stroitel'nomproyektirovani: monografiya [Reliability theory in construction design: monograph]. Moscow: ASV, 1998. 304 p. (rus).
23. Tonon F., Bernardini A., Mammino A. Determination of parameters range in rock engineering by means of Ransom Set Theory // Reliability Engineering and System Safety. 2000. №70 (3). Pp. 241-261.
24. Utkin V.S., Utkin L.V. ISSN 1068-798X. Russian Engineering Research. 2012 Vol.32. №9-10. Pp. 627-630.
25. Уткин Л.В., Ярыгина О.В. Расчет надежности железобетонных элементов на продавливание при ограниченной информации о параметрах // Строительная механика и расчет сооружений 2011. Вып.235. №2. С.63-68.2013. 48-56
26. Baudrit C., Dubois D. Praktikal representations of incomplete probabilistic knowledge // Computational Statistics and data Analysis. 2006.51.Pp. 86-108.

References:

1. Allaev M.O., Zagirov Sh.Sh. et al. Teoreticheskie i metodologicheskie aspekty optimal'nogo kompleksirovaniya metodov issledovaniy osnovaniy sooruzheniy. Makhachkala: DGTU; 2002. 108 s. [Allaev M.O., Zagirov Sh.Sh. et al. The theoretical and methodological aspects of optimum combination of the research methods of the bases of constructions. Makhachkala: DSTU; 2002. 108 p.(In Russ.)]
2. Bolotin V.V. Metody teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy. M; 1982. 351 s. [Bolotin V.V. Methods of probability theory and reliability theory in structural analysis. Moscow; 1982. 351 p. (In Russ.)]
3. Venttsel E.S. Teoriya veroyatnostey. M.; 1989. 572 s. [Venttsel E.S. The theory of probability. Moscow; 1989. 572 p. (In Russ.)]
4. Gaskarov D.V. i dr. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radio-elektronnoy apparatury. M.; 1974. 223 s. [Gaskarov D.V. et al. Prediction of technical state and reliability of radio-electronic equipment. Moscow; 1974. 223 p. (In Russ.)]
5. Gulakyan K.A. i dr. Prognozirovanie opolznevykh protsessov. M.; 1977. 135 s. [Gulakyan K.A. et al. Soil slip prediction. Moscow; 1977. 135 p. (In Russ.)]
6. Ermolaev M.N., Mikheev V.V. Nadyozhnost osnovaniy sooruzheniy. L.; 1976. 151 s. [Ermolaev M.N., Mikheev V.V. Reliability of the bases of constructions. Leningrad; 1976. 151 p. (In Russ.)]
7. Zagirov Sh.Sh. Optimizatsiya inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy osnovaniy sooruzheniy. M.: izd-vo "Vsesoyuznogo zaochnogo politekhn. inst."; 1990. 394 s. [Zagirov Sh.Sh. Optimization of engineering-geological research of the bases of constructions. Moscow: All-Union Correspondence Polytechnic Institute Publ.; 1990. 394 p.(In Russ.)]
8. Zagirov Sh.Sh. K prognozirovaniyu sostoyaniya protsessov i optimizatsii ikh issledovaniy. DPI. Makhachkala: Dep. V VINITI; 1987. [Zagirov Sh.Sh. To forecasting of process state and optimization of their research. DPI. Makhachkala: VINITI; 1987. (In Russ.)]
9. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V. i dr.; Pod S.B. Ukhova. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty: Ucheb.posobie dlya stroit. spets. vuzov. 4-e izd., ster. M.: Vyssh. shk., 2007. 566 s. [Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V. et al. Soil mechanics, bases and foundations: textbook for universities of construction. In: S.B. Ushkov (Ed.). Moscow: Higher Institution; 2007. 566 p. (In Russ.)]
10. Pustynnik E.I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeni. M.; 1968. 288 s. [Pustynnik E.I. Statistical methods of the analysis and processing of observations. Moscow; 1968. 288 p. (In Russ.)]
11. Rekomendatsii po kolichestvennoy otsenke ustoychivosti opolznevykh sklonov. PNIIS. M.: Stroyizdat; 1984. 80 s. [Recommendations on the quantitative assessment of landslide slopes stability. PNIIS. Moscow: Stroyizdat; 1984. 80 p. (In Russ.)]
12. Sveshnikov A.A. Prikladnyye metody teorii sluchaynykh protsessov. M.; 1968. 463 s. [Sveshnikov A.A. Applied methods of the theory of random processes. Moscow; 1968. 463 p. (In Russ.)]

13. Spravochnik proektirovshchika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya. M.; 1985. 479 s. [Reference book of structural designer. Bases, infrastructure and underground constructions. Moscow; 1985. 479 p. (In Russ.)]
14. Tikhonov V.I. Vybrosoy sluchaynykh protsessov. M; 1970. 392 s. [Tikhonov V.I. Random process emission. Moscow; 1970. 392 p.(In Russ.)]
15. Druzhakina O.P., Gavrilova K.V. Ustoychivost gruntovykh massivov: ucheb.metod. posobie. Izhevsk: Izd-vo "Udmurtskiy universitet"; 2012. 68 s. [Druzhakina O.P., Gavrilova K.V. Stability of soil massifs: study guide. Izhevsk: Udmurt University Publ.; 2012. 68 p. (In Russ.)]
16. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike. M.: Nedra; 1987. 221 s. [Fadeev A.B. Finite elements method in geomechanics. Moscow: Nedra Publ.; 1987. 221 p. (In Russ.)]
17. Tsvetkov V.K. Raschet ustoychivosti otkosov i sklonov. Volgograd: Nizhne-Volzhskoye kn. izd.; 1979. 238 s. [Tsvetkov V.K. Stability calculation of slopes and declivities. Volgograd: Nizhne-Volzhskoye Publ.; 1979. 238 p. (In Russ.)]
18. Krahn, J. Stability modeling with Slope. An engineering methodology. First Edition. Revision I Calgary, Alta: Geo-Slope International Ltd.; 2004.
19. Utkin V.S., Shepelina E.A. Raschet nadezhnosti osnovaniy i fundamentov po kriteriyu prochnosti pri ogranichennoy informatsii o nagruzke. Inzh. stroit. zhurnal. 2013;1:48-56. [Utkin V.S., Shepelina E.A. The reliability calculation of foundations under eccentric load in the operation phase. Magazine of Civil Engineering (In Russ.)]
20. Rzhanitsyn A.R. Teoriya rascheta stroitelnykh konstruktsiy na nadezhnost. M.: Stroyizdat; 1978. 239 s. [Rzhanitsyn A.R. Calculation theory of building structures' reliability. Moscow: Stroyizdat; 1978. 239 p. (In Russ.)]
21. Shpete G. Nadezhnost nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy. Per. s nem Andreeva. M.: Stroyizdat; 1994. 288 s. [Shpete G. Reliability of the supporting constructions. Translation from Geman by O.O. Andreev. Moscow: Stroyizdat; 1994. 288 p. (In Russ.)]
22. Rayder V.D. Teoriya nadezhnosti v stroitelnom proyektirovanii: monografiya. M.: ASV; 1998. 304 s. [Rayder V.D. Reliability teoriya in construction design: monograph. Moscow: ASV; 1998. 304 p. (In Russ.)]
23. Tonon F., Bernardini A., Mammino A. Determination of parameters range in rock engi-neering by means of Rondon Set Theory. Reliability Engineering and System Safeti. 2000;70(3):241-261.
24. Utkin V.S., Utkin L.V. Russian Engineering Research. 2012;32(9-10):627-630. ISSN 1068-798X.
25. Utkin L.V., Yarygina O.V. Raschet nadezhnosti zhelezobonnykh elementov na pro-davlivanie pri ogranichennoy informatsii o parametrah. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2011;235(2):63-68. [Utkin L.V., Yarygina O.V. Reliability calculation of reinforced concrete elements on pushing at limited information on parameters. Construction mechanics and structural analysis. 2011;235(2):63-68. (In Russ.)]
26. Baudrit C., Dubois D. Praktikal representations of incomplete probablistic knowledge. Computational Statistics and Data Analysis. 2006;51:86-108. [(In Russ.)]

Сведения об авторе.

Аллаев Мажид Османович – кандидат технических наук, доцент, кафедра автомобильных дорог, оснований и фундаментов.

Information about the author.

Mazhid O. Allaev – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of automobile roads, bases and foundations.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 09.09.2016.

Received 09.09.2016.

Принята в печать 30.11.2016.

Accepted for publication 30.11.2016.

Для цитирования: Алехин В.С., Купчикова Н.В. Экспериментальные исследования и численный анализ деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой из щебня. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

For citation: Alekhin V.S., Kupchikova N.V. Experimental studies and numerical analysis for the deformation-strength characteristics of rammed micro-piles with a broadened aggregate BASE. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences 2016; 43 (4):123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.154.1; 624.154.8

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОНАБИВНЫХ МИКРОСВАЙ С УШИРЕННОЙ ПЯТОЙ ИЗ ЩЕБНЯ

Алехин В.С.², Купчикова Н.В.¹

¹Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,

¹414056, г. Астрахань, ул. Татищева 18,

²ООО «Подземпроект»,

²125040, г. Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.2, к.1

¹e-mail:kupchikova79@mail.ru, ²e-mail:alekhin@podzemproekt.ru

Резюме: *Цель.* Экспериментально-теоретическое установление зависимостей деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбованным щебнем: диаметра обсадной трубы, фракции и объёма щебня для просадочных макропористых глин. *Метод.* Выполнены лабораторный и полевой эксперимент численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента с помощью программного комплекса MIDAS GTS_NX, реализующем метод конечных элементов и разработанной для сложных геотехнических задач; даны некоторые рекомендации для внедрения. *Результат.* Определена зависимость несущей способности буронабивных микросвай с уширением из втрамбованного щебня при вертикальном нагружении. При максимальном размере уширения 3,5 диаметра ствола микросваи несущая способность их грунта увеличивается в 1,8- 6 раз по сравнению с микросваями без уширения в зависимости от диаметра ствола сваи. В ходе экспериментальных и численных исследований установлены зависимости деформационно-прочностных параметров работы фундамента глубокого заложения, состоящего из буронабивных микросвай с уширенной пятой, а именно, диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового пространства. Результаты исследования способствуют развитию теории формирования геометрии концевых уширений из втрамбованного щебня в форме эллипсоида вращения. *Вывод.* Натурные обмеры уширений буронабивных микросвай показали, что их форма близка к форме эллипсоида вращения, а соотношение полуосей находится в прямой зависимости от характеристик грунта и объёма щебня, что было учтено при построении конечно-элементной модели в численном моделировании эксперимента. Результаты численных исследований нагружения буронабивной микросваи с уширенной пятой на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний - расхождение составляет 2-15%.

Ключевые слова: буронабивная свая, напряжённо-деформированное состояние, лабораторные, натурные и численные исследования, втрамбованный щебень

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

EXPERIMENTAL STUDIES AND NUMERICAL ANALYSIS FOR THE DEFORMATION-
STRENGTH CHARACTERISTICS OF RAMMED MICRO-PILES WITH A BROADENED
AGGREGATE BASE

Vitaly S. Alekhin², Natalia V. Kupchikova¹

¹Astrakhan State University of Architecture and Construction,

¹18 Tatishchev Str., Astrakhan 414056, Russia

²The limited liability company «Podzemproekt»,

2/1Yamskogo Poly a Third Str., Moscow 125040, Russia

¹e-mail: kupchikova79@mail.ru, ²e-mail: alekhin@podzemproekt.ru

Abstract: Objectives. Experimental and theoretical determination of dependencies of strength characteristics of bored micropiles with a pedestal formed by rammed rubble on: casing diameter, fraction, and volume of crushed stone for collapsing macroporous clays. **Method.** Laboratory and field experiments were carried out; numerical calculations in two-dimensional and three-dimensional arrangement for the determination of strain-stress analysis of the foundation using a MIDAS GTS_NX software system, implementing the finite element method and developed for complex geotechnical problems; some recommendations for implementation are provided. **Results** The dependence of the load-bearing capacity of bored micropiles on a broadened base of rammed aggregate with vertical loading is determined. At the maximum broadening diameter of 3.5 of the micropiles shaft the load-bearing capacity of the subsoil is increased by between 1.8 and 6 times compared with micropiles without broadening depending on the diameter of the pile shaft. During the experimental and numerical studies of the dependencies of deformation-strength parameters of the deep foundation works consisting of a bored micropile with a broadened base, namely the pile diameter, aggregate particle size and volume, seal diameter of the subsoil soil half-space, as well as the development of the theory of formation of the end broadening geometry of rammed aggregate in the form of an ellipsoid of revolution were established. **Conclusion** The full-scale measurements of the broadening of bored micropiles showed that their shape is close to an ellipsoid of revolution, and the ratio of semi-axes is directly dependent on the characteristics of soil and gravel volume, which was taken into account in the construction of the finite element model in the numerical simulation experiment. The results of numerical studies of the bored micropile loading with broadened base on the MIDAS GTS show good agreement with the results of the field test, consisting of a difference of between 2 and 15%.

Keywords: pressure pile, stress-strain state, laboratory and full-scale and numerical studies, rammed aggregate

Введение. Основные неблагоприятные инженерно-геологические процессы, влияющие на устойчивость оснований зданий и сооружений на территории Астраханской области, такие как просадочность грунтов, переработка берегов водотоков, подтопление территории грунтовыми водами, территории, сложенные намывными грунтами и карстовые провалы, приводят к удорожанию производства работ по возведению нулевого цикла.

Наиболее опасными являются в регионе территории, сложенные просадочными суглинками и супесями, характеризующиеся как первым, так и вторым типом грунтовых условий по просадочности. Наиболее опасны грунты, как основания зданий и сооружений, со вторым типом просадочности, где должны предусматриваться дорогостоящие противопросадочные мероприятия [1-6, 11,12]. Обычно они проявляются при повышении влажности грунтов в результате аварийной обводненности грунтов или общем техногенном подъеме уровня грунтовых вод. Одним из эффективных конструктивных решений фундаментов мно-

гоэтажных зданий и сооружений для строительства на подобных территориях является устройство буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбовыванием щебня.

Постановка задачи. Цель исследования - экспериментально-теоретическое определение зависимостей деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой, образованной втрамбованным щебнем, а именно, диаметра обсадной трубы, фракции и объёма щебня для просадочных макропористых глин.

В рамках реализации поставленной цели исследования были решены следующие задачи:

- выполнен лабораторный и полевой эксперимент;
- построена расчётная модель конструкции свай с уширением и без него;
- выполнены численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента;
- даны практические рекомендации для внедрения результатов.

Методы исследования. Предпосылками к проведению натурных исследований стали лабораторные испытания штампа на просадочном грунте, упрочнённом забивкой щебня мелкой фракции 5 – 10 мм. Испытания показали увеличение начальной жёсткости основания в упругой стадии работы в 6 раз по сравнению с испытаниями штампа на естественном основании и уменьшение осадки (с учётом работы грунта в пластической стадии до 15 раз) [1,2].

На первом этапе проводились испытания штампа в котловане с втрамбованным щебнем мелкой (5-20 мм) и крупной фракции (40-50 мм) и без щебня. Испытания показали, что при вертикальном нагружении $P=8000\text{Н}$ осадка штампа на неуплотнённом грунте составила 40 мм, на грунте с втрамбованным щебнем мелкой фракции – 22,5 мм, и крупной фракции – 7,5 мм. Таким образом, осадка снизилась в 3-5,3 раза.

Имеющиеся многочисленные данные об испытаниях трубобетонных, буронабивных свай или свай – оболочек говорят о том, что фактическая осадка во многих случаях оказывается меньшей, чем данные, полученные теоретическим путём. Исследования в натурных условиях позволили изучить поведение системы «основание-свая-концевое уширение из щебня» и определить эффективность использования способа упрочнения грунта щебнем под нижним концом свай.

Натурный эксперимент был проведён на строительной площадке города Астрахани при возведении свайного фундамента девятиэтажного панельного двухсекционного жилого дома. Геологический разрез представлен следующими литологическими породами: насыпной слой, строительный мусор мощностью 0,5м; суглинок лёссовый мягкопластичный мощностью 1,5-2,2м; глина бурая, мягкопластичная мощностью 8,2-9м.

В основании лёссовый суглинок плотностью в природном состоянии $\rho_{гр}=1,87\text{ г/см}^3$. Для получения наиболее точных данных растительный слой грунта до глубины 50 см был удалён. Испытания проходили с использованием обсадных труб диаметром 100, 200, 300, 400 мм, длиной 3000 мм (рис.1).

Вначале обсадные трубы задавливали, а грунт извлекали на всю их глубину. Затем в образованную полость обсадной трубы послойно по 10-20 см засыпали щебень фракцией 10-30 мм с его уплотнением с помощью трамбовки соответствующего диаметра, подвешенной к крюку крана. В ходе проведения эксперимента щебень подвергался циклическому нагружению глубинной железобетонной трамбовкой, сбрасываемой с высоты 5-6м. Эффективное решение данной проблемы возможно лишь при условии ясного представления структуры грунта и анализа механического его состава.

Трамбовку сбрасывали с высоты в полуобсадную трубу со щебнем у её нижнего конца. Величина отказа от каждого удара наступала после 5-10 ударов. Затем в трубу опускали арматурный каркас и нагнетали бетонную смесь. С целью экспериментальной отгрузки полученная таким образом свая постепенно загружалась вертикальной нагрузкой при помощи груза, подвешенного к крюку крана.

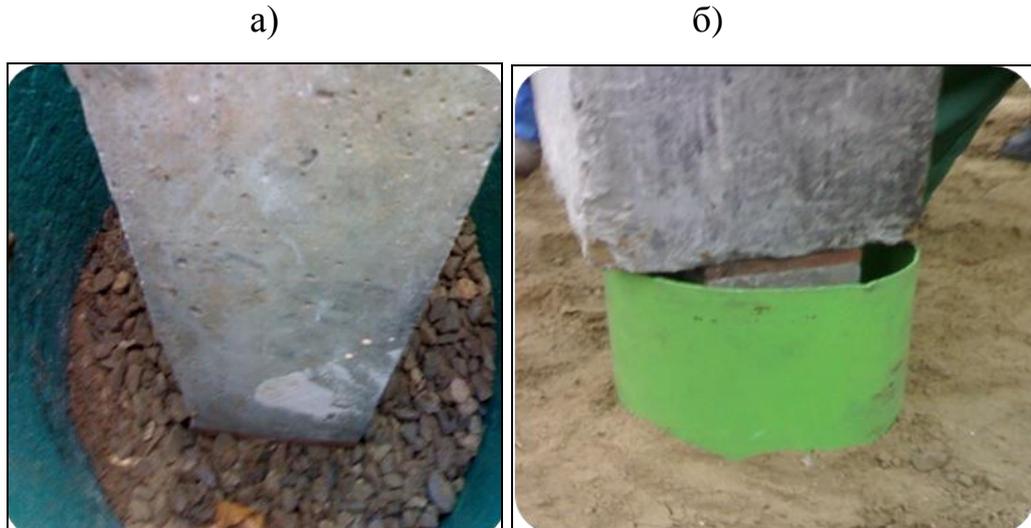


Рис.1. Иллюстрации с места проведения полунатурных испытаний:
а) - втрамбованный щебень в нижний конец обсадной трубы диаметром 400мм;
б) – загрузка штампа в обсадной трубе диаметром 300 мм

Fig.1. Illustrations from the location of the semi-real test:
a) - tamped rubble into the lower end of a casing with a diameter of 400 mm;
b) - loading of a stamp in a casing with a diameter of 300 mm

Каждый этап загрузки повторялся до 6-8 раз для получения статистически достоверных результатов осадки сваи. Вертикальные перемещения свай замеряли с помощью нивелира. Зависимость перемещения сваи от вертикальной нагрузки при испытании на естественном грунте и на уплотнённом щебне показала, что с увеличением диаметра трубы увеличивается и эффективность использования втрамбованного щебня. Так, испытания сваи диаметром 400 мм при нагружении силой 5 кН на грунте показали перемещение – 2,4 мм, а на уплотнённом щебне – 0,122 мм (рис.2) [7-10].

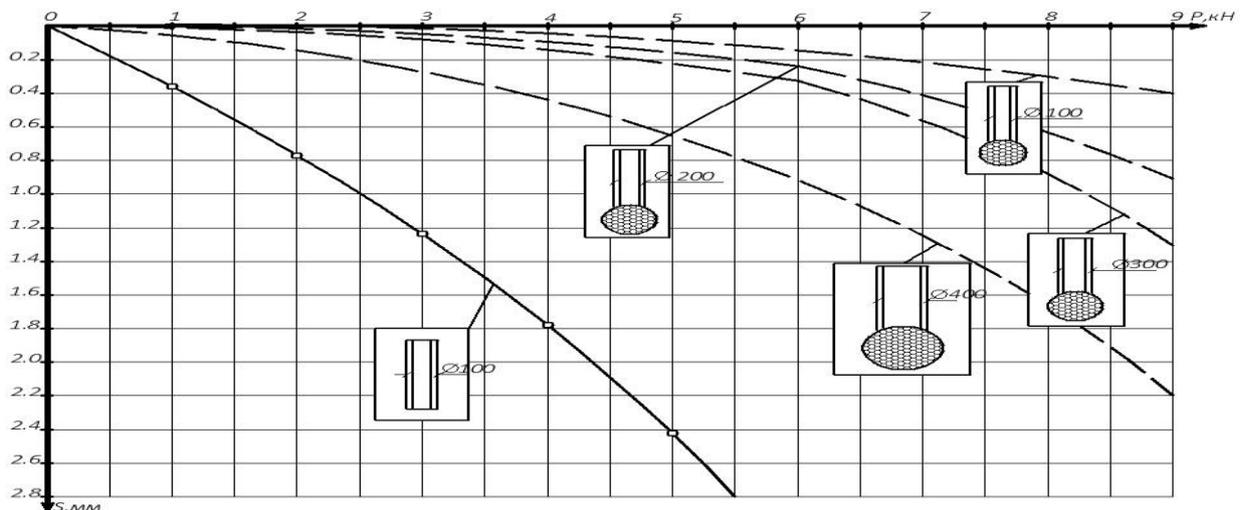


Рис. 2. График зависимости осадки буронабивных микросвай от вертикального нагружения с различными диаметрами ствола сваи

Fig. 2. Graph of the dependence of the sedimentation of boring microcavities on the vertical Loading with different diameters of the pile shaft

В начальный момент свая с уширением в основании работает упруго, что подтверждается прямо пропорциональной зависимостью между нагрузкой и осадкой сваи, а затем линейная зависимость исчезает, что свидетельствует о появлении пластической деформации

грунта. По данным натурного испытания установлено, что снижение осадки трубобетонной сваи с концевым уширением, образованным трамбованием щебня, по сравнению со свайей без уширения достигает в среднем до 600%.

Дальнейшие исследования напряжённо-деформированного состояния буронабивной сваи выполняли с помощью метода конечных элементов и его реализации на ПК. Расчет выполнялся в программном комплексе MIDAS GTS_NX, реализующем метод конечных элементов.

GTS NX является программой, разработанной для детальных расчетов грунтовых (наземных и подземных) сооружений и туннельных систем. В программе реализованы различные методы расчетов, такие как: статический расчет, динамический расчет, расчет фильтрации, сопряженный расчет фильтрации и напряженно-деформированного состояния, расчет консолидации, расчет поэтапности возведения.

Эффективность расчетов в GTS NX обеспечивается специализированными конечными элементами для точного моделирования грунтов и подземной части здания. Для геометрического моделирования в GTS NX могут быть использованы различные библиотеки конечных элементов. Различные элементы могут быть использованы для линейных и нелинейных расчетов напряженно-деформированного состояния, фильтрации, консолидации и других видов сопряженных расчетов [13-17].

Для выполнения расчетов в GTS NX были использованы следующие типы элементов:

- *Трехмерные элементы (3 Dimensional shape element)*. Элементы в форме пентаэдра и гексаэдра, которые могут иметь 4/5/6/8/10/13/15/20 узлов. Пентаэдры могут иметь форму пирамиды или призмы.
- *Элементы интерфейса (контактные элементы) (Interface element)*. Элементы, используемые для моделирования взаимодействия между поверхностями или линиями разграничения. К элементам данного типа относятся контактные элементы типа «грань-грань» с 6/8/12/16 узлами. Для моделирования поведения грунта использовалась нелинейная модель Мора-Кулона. Минимальный шаг разбиения сетки – 20 мм.

Обсуждение результатов. На рис. 3 и 4 представлены: конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и без него; конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и уплотнённым окологрунтовым пространством; изополя деформаций в ограниченном массиве грунта от вертикального нагружения.

Параметры и свойства материалов соответствуют экспериментальным данным (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные физико-механических характеристик грунтов
Table 1. Initial data of physico-mechanical characteristics of soils

Mohr-Coulomb	Измеритель	Суглинок	Глина	Щебень втрамбованный в глину
Type		Drained	Drained	Drained
F_{unsat}	[kN/mi]	18,70	21,20	20,00
F_{sat}	[kN/mi]	18,0	21,20	20,00
e_{init}	[-]	0,500	0,500	0,500
c_k	[-]	1E15	1E15	1E15
E_{ref}	[kN/mI]	17000,000	10000,000	70000,000
input modulus of elasticity	[-]	0,250	0,250	0,250
G_{ref}	[kN/mI]	6800,000	4000,000	28000,000
E_{oed}	[kN/mI]	20400,000	12000,000	84000,000
c_{ref}	[kN/mI]	24,00	40,00	20,00
$R_{inter.}$	[-]	0,10	0,10	1,00

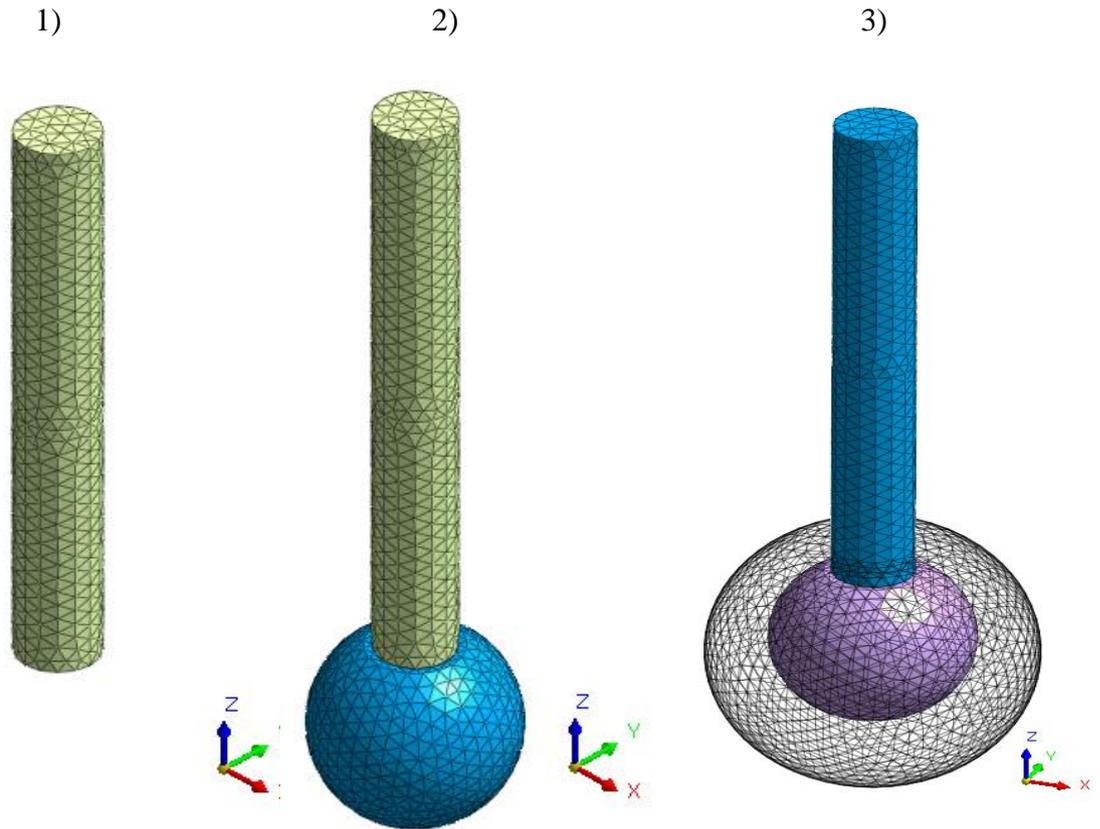


Рис. 3. Конечно-элементные модели сваи в GTS NX:

1- без уширения, 2 – с уширением, 3 – с уширением и уплотнённым окологрунтовым пространством вокруг пяты

Fig. 3. Finite Element Pile Models in GTS NX:

1- without broadening, 2 - with broadening, 3 - with broadening and compacted near-ground space around the heel

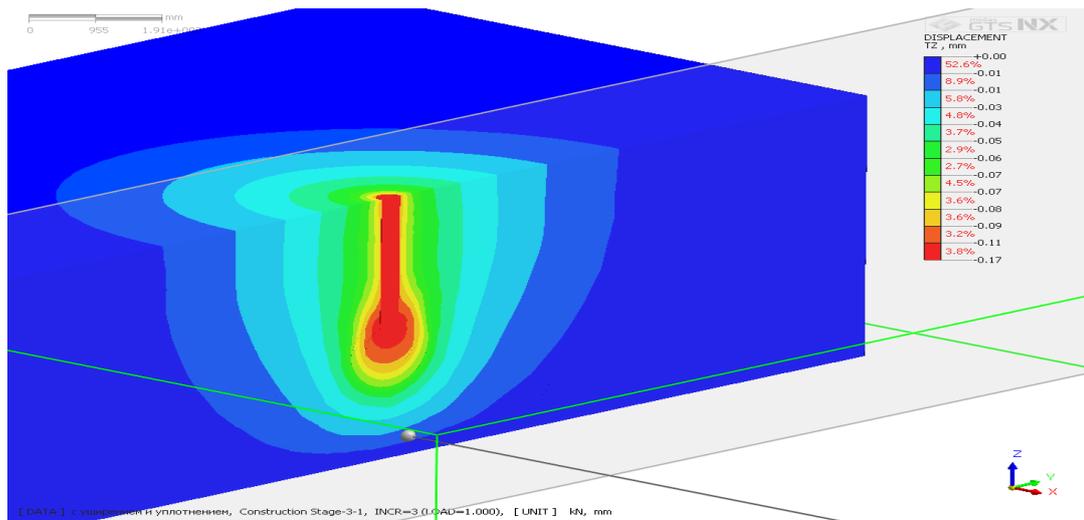


Рис. 4. Перемещения буронабивной микросваи диаметром 400 мм в GTS NX

Fig. 4. Moving of bored micro-beads with a diameter of 400 mm in GTS NX

Результаты численных исследований на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний, расхождение составляет 2-15%. Однако недоучёт

коэффициента уплотнения около грунтовой зоны вокруг уширения из втрамбованного щебня приводит к большому расхождению результатов, что видно из сопоставления числовых параметров осадки с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление результатов расчёта на MIDAS GTS с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны

Table 2. Comparison of calculation results to MIDAS GTS with and without consideration of the compaction factor near the ground zone

№	Диаметр, мм	Эксперимент, перемещение	MIDAS GTS без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны	MIDAS GTS с учетом коэффициента уплотнения около грунтовой зоны
1	Ø100 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,9</u> 3,20	<u>0,86</u> 3,61	<u>0,77</u> =
2	Ø200 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,39</u> <u>0,55</u>	<u>0,35</u> 0,51	<u>0,33</u> =
3	Ø300 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,30</u> 0,42	<u>0,24</u> 0,35	<u>0,23</u> =
4	Ø400 <u>с уширением</u> без уширения	<u>0,3</u> 0,3	<u>0,19</u> 0,29	<u>0,17</u> =

Вывод:

1. По результатам полевых исследований получена зависимость несущей способности буронабивных микросвай с уширением из втрамбованного щебня при вертикальном нагружении. При максимальном размере уширения 3,5 диаметра ствола микросвай несущая способность их грунта увеличивается в 1,8- 6 раз по сравнению с микросваями без уширения в зависимости от диаметра ствола сваи.
2. Натурные обмеры уширений буронабивных микросвай показали, что их форма близка к форме эллипсоида вращения, а соотношение полуосей находится в прямой зависимости от характеристик грунта и объема щебня, что было учтено при построении конечно-элементной модели в численном моделировании эксперимента [3].
3. Результаты численных исследований нагружения буронабивной микросвай с уширенной пятой на MIDAS GTS показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний, расхождение составляет 2-15%.
4. Экспериментальные и численные исследования позволили установить зависимости деформационно-прочностных параметров работы фундамента глубокого заложения состоящего из буронабивных микросвай с уширенной пятой, а именно, диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового полупространства, с учётом коэффициента уплотнения окологрунтового пространства вокруг уширения из щебня.

Библиографический список:

1. Купчикова Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жёсткость основания / Н. В. Купчикова // Журнал «Промышленное и гражданское строительство» №10 / - Москва, 2007 г.

2. Штоль, Т.М. Технология возведения подземной части зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов: Спец.: «Пром. и гражд. стр-во»/ Т. М. Штоль, В. И. Теличенко, В. И. Феклин. – М.: Стройиздат, 1990. – 288с.
3. Зоценко Н.Л., Винников Ю.Л., Бабенко В.А. Усиление фундаментов общественного здания методом вдавливания свай //Реконструкция, Санкт-Петербург-2005г.: Материалы международного симпозиума. Ч.2.-С.Петербург, 1993.с.130-133.
4. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве : тез.доклад на IX Всесоюзном науч.-техн.совещ. / - Москва : Стройиздат, 1978. – 368 с.
5. Далматов Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975.
6. Далматов Б. И. Проектирование и устройство фундаментов около существующих зданий / Б. И. Далматов. – Л.: ЛДНТП, 1976.
7. Купчикова Н.В. Учет сдвиговых деформаций свайных фундаментов с усиливающими элементами // Строительная механика и расчет сооружений. - № 3 (254). - 2014.- с. 17-22.
8. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ В. А. Вознесенский. Москва: Финансы и статистика, 1981. - 263 с.
9. Купчикова, Н. В. Особенности берегоукрепления набережной реки Волги свайными оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны Купчикова Н.В. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 36-39.
10. Федоров, В.С., Купчикова, Н. В. Конструктивные решения свайных фундаментов с поверхностными и концевыми уширениями для структурно-неустойчивых оснований / Вестник гражданских инженеров.- 2011. - №1. – С.88-91.
11. Егорушкин В.А., Городков А.В., Федоров В.С., Азаров В.Н. Биосферная совместимость. Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека // Промышленное и гражданское строительство. - № 10. - 2012. - с. 71-72.
12. Ключева Н.В., Федоров В.С. К анализу живучести внезапно повреждаемых рамных систем// Строительная механика и расчет сооружений. - № 3. - 2006.- с. 7-13.
13. Курбацкий, Е. Н. Методические указания по решению задач механики с использованием преобразования Фурье [Текст]: учебное пособие/Е. Н. Курбацкий. –Москва: МИИТ, 1979.
14. Курбацкий, Е.Н. Метод расчета строительных конструкций с использованием дискретного преобразования Фурье. В кн.: «Конструкции жилых зданий». М.: ЦНИИЭп жилища, 1987.
15. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Research of the dynamical system “beam – stochastic base”// Procedia engineering. - Т. 150. - 2016.- с. 1721-1728.
16. Rytov S.A. New geotechnical technologies/ Proceedings of the 15th European Young Geotechnical Engineers Conference. Dublin, Ireland. 11-14 September 2002.- с.311-315.
17. Lemanza W. Lesmana, A/ Deep soil improvement technique using combined deep mixing and jet grouting method// Proc. 17th Int. Conf/ on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering/ - Alexandria, Egypt, 5-9 october, 2009, с.2439/

References:

1. Kupchikova N.V. Vliyanie uplotneniya grunta so shchebnem na zhyostkost osnovaniya. Zhurnal “Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo”. М.; 2007;10. [Kupchikova N.V. Influence of soil consolidation with crushed stone on the rigidity of the basis. Journal of Industrial and Civil Engineering. Moscow; 2007;10. (In Russ.)]
2. Shtol T.M., Telichenko V.I., Feklin V.I. Tekhnologiya vozvedeniya podzemnoy chasti zdaniy i sooruzheniy: ucheb. posobie dlya vuzov: Spets.: “Prom. i grazhd. str-vo”. М.: Stroyizdat; 1990. 288 s. [Shtol T.M., Telichenko V.I., Feklin V.I. Technology of construction of subsurface

parts of building and facilities: textbook for higher institutions. Journal of Industrial and Civil Engineering. Moscow; Stroyizdat; 1990. 288 p. (In Russ.)]

3.Zotsenko N.L., Vinnikov Yu.L., Babenko V.A. Usilenie fundamentov obshchestvennogo zdaniya metodom vdavlivaniya svay. Rekonstruktsiya. Sankt-Peterburg: 2005. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma. Ch.2. S.Peterburg; 1993.130-133. [Zotsenko N.L., Vinnikov Yu.L., Babenko V.A. Underpinning of public building by jacking method. Reconstruction. St. Petersburg: 2015. Proceedings of International Symposium. Pt. St. Petersburg; 1993.130-133. (In Russ.)]

4.Zakreplenie i uplotnenie gruntov v stroitelstve: tez. doklad na IX Vsesoyuznom nauch.-tekhn. soveshch. M.: Stroyizdat, 1978. 368 s. [Consolidation and compaction of soils in construction:theses on IX All-Union scientific and technical meeting. Moscow: Stroyizdat, 1978. 368 p. (In Russ.)]

5.Dal'matov, B.I. Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Proektirovanie svaynykh fundamentov v usloviyakh slabyykh gruntov. L.: Stroyizdat, 1975. [Dal'matov, B.I. Lapshin F.K., Rossikhin Yu.V. Design of piles foundation in the conditions of soft ground. Leningrad: Stroyizdat, 1975. (In Russ.)]

6. Dal'matov, B.I. Proektirovanie i ustroystvo fundamentov okolo sushchestvuyushchikh zdaniy. L.: LDNTP, 1976. [Dal'matov, B.I. Foundation works near buildings. Leningrad: LDNTP; 1976. (In Russ.)]

7. Kupchikova N.V. Uchyot sdvigovykh deformatsiy svaynykh fundamentov s usilivayushchimi elementami. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2014;3(254):17-22. [Kupchikova N.V. The accounting of shift deformations of the pile bases with the strengthening elements. Construction mechanics and structural analysis. 2014;3(254):17-22. (In Russ.)]

8.Voznesenskiy V.A. Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh. M.: Finansy i statistika, 1981. 263 s. [Voznesenskiy, V.A. Statistical methods of experiment design in technical and economic research. Moscow: Finances and statistics; 1981. 263 p.(In Russ.)]

9.Kupchikova N.V. Osobennosti beregoukrepleniya naberezhnoy reki Volgi svaynymi obolochkami, kamennoy nabroskoy i stroitelstva na namyvnykh gruntakh vdol beregovoy zony Kupchikova N.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2014;6:36-39. [Kupchikova N.V. Features of bank protection of Volga River embankment by pile covers, riprap and constructions on alluvial soil along a coastal zone of Kupchikov N. V. Industrial and civil engineering. 2014;6:36-39. (In Russ.)]

10.Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Konstruktivnyye resheniya svaynykh fundamentov s poverkhnostnymi i kontsevyimi ushirennyami dlya strukturno-neustoychivykh osnovaniy. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2011;1:88-91. [Fedorov, V.S., Kupchikova, N.V. Constructive solutions of the piles foundations with superficial and trailer broadenings for the structural-unstable bases. Bulletin of civil engineers. 2011;1:88-91. (In Russ.)]

11.Egorushkin V.A., Gorodkov A.V., Fedorov V.S., Azarov V.N. Biosfernaya sovmestimost. Tekhnologii vnedreniya innovatsiy. Goroda, razvivayushchie cheloveka. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2012;10:71-72. [Egorushkin V.A., Gorodkov A.V., Fedorov V.S., Azarov V.N. Biospheric compatibility. Technologies of innovations. The cities developing a human. Industrial and civil engineering. 2012;10:71-72. (In Russ.)]

12.Klyueva N.V., Fedorov V.S. K analizu zhivuchesti vnezapno povrezhdayemykh ramnykh system. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2006;3:7-13. [Klyueva N.V., Fedorov V.S. To the liveness analysis of unexpectedly damaged frame systems. Construction mechanics and structural analysis. 2006;3:7-13. (In Russ.)]

13.Kurbatskiy E.N. Metodicheskie ukazaniya po resheniyu zadach mekhaniki s ispolzovaniem preobrazovaniya Furye [Tekst]: uchebnoye posobie. M.: MIIT; 1979. [Kurbatskiy E.N. Guidelines to solve mechanics problems using Fourier transformation: textbook. Moscow: MIIT; 1979. (In Russ.)]

14.Kurbatskiy E.N. Metod rascheta stroitelnykh konstruktsiy s ispolzovaniem diskretnogo preobrazovaniya Furye. V kn.: "Konstruktsii zhilykh zdaniy". M.: TsNIIEp zhilishcha; 1987. [Kur-

batskiy E.N. Method of calculation of building constructions using Fourier discrete transformation. In book "Structures of residential buildings". Moscow: TsNIIEP; 1987. (In Russ.)]

15. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Research of the dynamical system "beam – stochastic base". *Procedia Engineering*. 2016;150:1721-1728.

16. Rytov, S.A. New geotechnical technologies. *Proceedings of the 15th European Young Geotechnical Engineers Conference*. Dublin, Ireland; 11-14 September 2002. 311-315.

17. Lemanza W., Lesmana A. Deep soil improvement technique using combined deep mixing and jet grouting method. *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt; 5-9 October, 2009. 2439 p.

Сведения об авторах.

Алехин Виталий Сергеевич - ведущий инженер.

Купчикова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Промышленное и гражданское строительство».

Information about the authors.

Vitaly S. Alekhin - Leading engineer.

Natalia V. Kupchikova – Cand. Sc.(Technical), Assoc. Prof., Department Industrial and civil construction.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 19.09.2016.

Принята в печать 01.12.2016.

Conflict of interest

Received 19.09.2016.

Accepted for publication 01.12.2016.

Для цитирования: Алиев С.А., Муртазаева Т.С.-А., Сайдумов М.С., Саламанова М.Ш. Самоуплотняющиеся бетоны для устройства монолитных сейсмостойких конструкций высотных зданий и сооружений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):133-143. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-133-143

For citation: Aliev S.A., Murtazayeva T.-A., Saydumov M.S., Salmanova M.S. Self-consolidating concrete used in the monolithic construction of earthquake-resistant tall buildings. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):133-143. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-133-143

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-133-143

САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ СЕЙСМОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Алиев С. А.¹, Муртазаева Т. С.-А.², Сайдумов М. С.³, Саламанова М. Ш.⁴

¹⁻⁴Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М. Д. Миллионщикова,

¹⁻⁴364905, г.Грозный, пр-кт.им.Х. А. Исаева, 100,

¹e-mail:asa-fenix@mail.ru,²e-mail:s.murtazaev@mail.ru,

³e-mail:saidumov_m@mail.ru,⁴e-mail:madina__salamanova@mail.ru

Резюме: Цель. Разработка составов высокопрочных бетонов на основе отечественного и зарубежного опыта получения самоуплотняющихся бетонов. **Метод.** Использованы рецептуры СУБ-бетонов на основе сырья Чеченской Республики различных классов по прочности на сжатие с применением поликарбоксилатных добавок. **Результат.** Исследована природная и техногенная сырьевая база Чеченской Республики и других регионов страны. Получены составы высокопрочных СУБ-бетонов классов по прочности на сжатие В100 и выше с комплексным использованием природного и техногенного сырья. Изучены их рецептуры и основные реотехнологические и физико-механические свойства. Приведены результаты исследования заполнителя, как местного, так и привозного «Павловск Гранит» и ООО «Прогресс», который приобретался для испытаний из РСО-Алания. Исследованы цементы различных производителей, были выделены наиболее оптимальные из них: портланд-цементы ЦЕМ I 42,5Н Чири-Юртовского и Тульского цементных заводов. В качестве наполнителей были использованы микрокремнезем с Новокузнецкого комбината, минеральный порошок МП-1 неактивированный г. Калуга и зола-унос г. Невиномыск.

Вывод. Результаты проведенных исследований показали, что сырьевой потенциал нашей страны позволяет получать самоуплотняющиеся бетоны класса В 25 до В100 и выше для монолитного строительства, в том числе и высотного. Полученные составы бетона характеризуются высокими физико-механическими показателями и могут быть использованы в высотном монолитном строительстве объектов, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах.

Ключевые слова: самоуплотняющиеся бетоны, минеральные порошки, химические модификаторы, фракционированный заполнитель, кварцевый порошок, высокопрочный бетон, уникальные здания, высотное строительство, долговечность бетона, микрокремнезем, микронаполнитель

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

SELF-CONSOLIDATING CONCRETE USED IN THE MONOLITHIC
CONSTRUCTION OF EARTHQUAKE-RESISTANT TALL BUILDINGS

*Salambek A. Aliev*¹, *Tamara S. Murtazayeva*², *Magomed S. Saydumov*³, *Madina S. Salamanova*⁴.

¹⁻⁴Millionschikov Grozny State Oil Technical University,

100 H.A. Isayev Ave., Grozny 364905, Russia,

¹e-mail:asa-fenix@mail.ru, ²e-mail:s.murtazaev@mail.ru,

³e-mail:saidumov_m@mail.ru, ⁴e-mail:madina__salamanova@mail.ru

Abstract: Objectives. The development of high-strength concrete based on experience both with domestic and foreign concretes has led to the production of a self-consolidating concrete (SCC) formula. **Method.** Raw materials sourced from the Chechen Republic were used in the SUB-concrete formula, based on materials having different classes of compressive strength as well as the incorporation of polycarboxylate as an additive. **Results.** An investigation was carried out on natural and technogenic raw materials from the Chechen Republic and other regions of the country. Compositions of high-grade SCC with a compressive strength of B100 and higher are achieved with an integrated approach using both natural and man-made raw materials. The formulae of the basic concrete reinforcing technology are examined together with their physico-mechanical properties. The results of the study of locally sourced concrete, as well as that purchased from "Pavlovskgranit" and OOO "Progress" for testing from the Republic of North Ossetia–Alania, are provided. Of the various manufacturers' cements investigated, the highest quality Portland cement CEM I 4.5N was selected from the Tula cement manufacturers in the town of Chiri-Yurt. The fillers used were microsilica sourced from the Novokuznetsk plant, inactivated MP-1 mineral powder produced in Kaluga and fly ash sourced from Nevinnomysk.

Conclusion. The results of the studies show that the raw material potential of our country allows for the production of self-consolidating concrete from class B 25 to B100 and higher for use in monolithic construction, including high-rise. The concrete compositions arrived at are characterised by their high physical and mechanical properties and can be used in high-rise concrete construction sites operating in earthquake-prone areas.

Keywords: self-consolidating concrete, mineral powders, chemical modifiers, coarse concrete, quartz powder, high-strength concrete, unique buildings, high-rise construction, durability of concrete, microsilicate, microfiller

Введение. Современное строительство наряду с традиционными тяжелыми бетонами обычных и средних классов по прочности требует применения новых эффективных видов бетонов, таких как высокопрочные самоуплотняющиеся бетоны (СУБ-бетоны), безусадочные, расширяющиеся или напрягающие бетоны и ряда других бетонов на новых композиционных вяжущих [1,5, 18,19]. Одним из наиболее перспективных среди приведенных высококачественных модифицированных бетонов является многокомпонентный самоуплотняющийся бетон, технология получения и свойства которого существенно отличаются от составов и свойств обычных бетонных смесей.

Самоуплотняющийся бетон (СУБ-бетон) – это бетон, который без воздействия на него дополнительной внешней уплотняющей энергии самостоятельно под воздействием собственной массы течёт, освобождается от содержащегося в нём воздуха и полностью заполняет пространство между арматурными стержнями и опалубкой. СУБ-бетон может содержать остаточный объём пор точно так же, как и вибрированный бетон [6,7,8,20].

В немецком языке самоуплотняющийся бетон получил сокращённое название SVB (Selbstverdichtender Beton), в английском – SCC (self compacting concrete), во французском – BAP (Beton autoplacant) [3,9,10,11,12,16,19]. Не исключено, что с распространением самоуплотняющегося бетона он также получит в русском языке сокращённое обозначение СУБ-бетон.

Состав самоуплотняющейся бетонной смеси весьма существенно отличается от состава обычной бетонной смеси (рис. 1). Первым отличием является принципиально новый подход к соотношению и гранулометрии заполнителей (примерное одинаковое соотношение мелкого и крупного заполнителей, выравненный обогащением гранулометрический состав заполнителя). Второе отличие заключается в обязательном присутствии в смеси наполнителей (как правило, это известняковый порошок) и повышенном расходе цемента. Третьим отличием являются тип и дозировка пластифицирующей добавки (как правило, это гиперпластификатор на карбоксилатной основе, доза которого на порядок превосходит стандартный расход для обычного бетона) [2,3,13-18].



Рис.1. Состав самоуплотняющегося бетона, применяемого в мировой практике

Fig.1. Experience in using self-compacting concretes in the world practice

Высокая стоимость самоуплотняющихся бетонных смесей, с одной стороны, предполагает их использование только для получения высокопрочных бетонов с высокими и ультравысокими эксплуатационными свойствами, а с другой стороны, побуждает к разработке мероприятий по снижению их себестоимости для расширения области возможного применения. При переходе на самоуплотняющиеся смеси значительно упрощается технология работ, уменьшается их шумность, сокращаются трудозатраты, увеличиваются темпы строительства. Таким образом, несмотря на существенно более высокую стоимость этих смесей, общие затраты на строительство даже сокращаются [16,20]. Использование доступного, дешевого, часто невостребованного местного сырья, к которому, помимо природных ресурсов, относятся и отходы промышленности, еще больше снижает себестоимость производства СУБ-бетонов.

Постановка задачи. Разработка составов высокопрочных бетонов, в том числе и СУБ-бетонов, особенно актуальна для Чеченской Республики, где в последние годы активно развивается высотное строительство (построен высотный комплекс «Грозный Сити», состоящий из 7 зданий), а в настоящее время завершаются работы по возведению подземной части 435 метрового основного здания высотного комплекса «Ахмат Тауэр».

Конструктивное исполнение здания предусматривает полное использование преимущества системы «Бетон-металл», где в комплексных конструкциях бетон воспринимает сжимающие усилия, а в зонах с напряжениями изгиба и растяжения конструкции запроектировано обычное или жесткое армирование [4,8,13,17].

Причем, опыт возведения таких объектов в стране и за рубежом показывает, что необходимо разработать рецептуру самоуплотняющихся бетонов с линейкой их классов от В30 до В100.

Методы исследования. С целью решения этой проблемы группой сотрудников и аспирантов НТЦКП «Современные строительные материалы и технологии» ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова под руководством профессора С-А. Ю. Муртазаева разработаны рецептуры СУБ-бетонов на основе использования сырья Чеченской Республики различных классов по прочности на сжатие.

Авторами проведены комплексные исследования по технологии получения, разработке составов бетона и изучены их свойства.

В качестве химических добавок использовались поликарбоксилатные добавки серии Sika, выпускаемые крупнейшим мировым производителем добавок для бетона компанией Sika. Нами использовались в основном 2 разновидности таких добавок, а именно:

- Sika® VISCOCRETE® 5 NEW – жидкий суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров для производства высокотехнологичных бетонов с длительной сохраняемостью подвижности (до 90 мин.) и высоким водоредуцированием (до 40%);
- Sika® VISCOCRETE® 5-600 SK – жидкий суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров для бетонных смесей с длительной сохраняемостью подвижности (до 240 мин), высоким водоредуцированием (до 40%) и интенсивным набором прочности бетона.

На первом этапе исследований применялись местные сырьевые материалы природного и техногенного происхождения.

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н с Чирюртовского цементного завода Чеченской Республики с нормальной густотой 25 %, началом и концом схватывания 2 ч 15 мин и 3 ч 40 мин, соответственно, минералогическим составом: C₃S – 59 %; C₂S – 16 %; C₃A – 8 %; C₄AF – 13 %.

В качестве крупного заполнителя использовался щебень с Аргунского месторождения Чеченской Республики (табл. 2).

Таблица 2. Свойства местного Аргунского щебня фр. 5-20 мм из валунно-гравийных смесей

Table 2. Properties of local Argun rubble fr. 5-20 mm of boulder-gravel mixtures

№ п.п.	Наименование показателя					Значение показателя
1	Определение зернового состава материала:					Согласно ГОСТ 8269.0-97 (2004) фр. 5-20 мм
	сита, мм	20	10	5	< 5	
	част. ост., %	15,4	68,2	38,6	0,4	
	полн. ост., %	15,4	83,6	99,6	-	
2	Определение прочности щебня: марка щебня					M600-800
3	Определение насыпной плотности, кг/м ³					1366
4	Определение истинной плотности, г/см ³					2,64
5	Содержание дробленых зерен, %					96,2
6	Определение содержания зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, %					9,3
7	Определение содержания зерен слабых пород, %					4,8
8	Определение содержания пылевидных и глинистых, %					1,8
9	Содержание глины в комках, %					нет
10	Определение средней плотности, г/см ³					2,59
11	Определение пустотности щебня, %					42,0

В качестве мелкого заполнителя использовался природный песок Червленского месторождения Чеченской Республики (табл. 3)

В качестве микрозаполнителя в исследованных составах применялась зола ТЭЦ г. Грозный и известняковая мука из Ярыш-Мардынского месторождения Чеченской Республики с удельной поверхностью 700-800 м²/кг.

Таблица 3. Песок Червленского месторождения
Table 3. Sand of the Chervlensky deposit

№ п.п.	Наименование показателя		Значение показателя					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
1	Зерновой состав песка	Размер сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
		Частные остатки, %	2	4	14	44	34	2
		Полные остатки, %	2	6	20	64	98	
2	Модуль крупности		1,9					
3	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %		2,4					
4	Истинная плотность зерен, кг/м ³		2620					
5	Насыпная плотность, кг/м ³		1560					
6	Пустотность песка, %		40,5					

Полученные оптимальные составы СУБ-бетонов и их свойства представлены в таблице 4.

Таблица 4. Составы и свойства СУБ-бетонов
Table 4. Compositions and properties of SUB-concretes

составы	Количество добавки	В/Ц	Расход, кг, на 1 м ³ бетона					ρ _Б , кг/м ³	R _{сж} в возрасте, сут., МПа			РК, см
			Ц	В	Щ	П	Н		7	14	28	
Класс бетона В 25												
1	SikaViscoCrete 5-600 SK, 0,5 %	0,55	380	210	930	825	70	2330	24,9	30,6	34,2	65
2	SikaVisco Crete 5NEW, 2,0 %	0,54	380	205	930	845	70	2360	23,6	29,9	33,7	68
Класс бетона В 35												
3	SikaViscoCrete 5-600 SK, 0,5 %	0,41	480	195	860	865	80	2442	42,5	47,0	49,3	67
4	SikaViscoCrete 5-600 SK, 0,6 %	0,44	440	195	920	850	80	2428	41,5	46,9	48,7	70
Класс бетона В 40												
5	SikaViscoCrete 5NEW, 2,0 %	0,36	480	175	685	1035	80	2455	51,0	53,6	55,6	70
6	SikaViscoCrete5-600 SK, 0,7 %	0,41	520	195	860	820	80	2475	48,8	54,8	57,2	65

Примечание: В/Ц – водоцементное соотношение; Ц – цемент; В – вода; Щ – щебень; П – песок; Н – наполнитель; R_{сж} – прочность на сжатие; РК – распыл конуса; ρ_Б – плотность бетона

Результаты анализа проведенных исследований СУБ-бетонов на местном сырье (табл. 4) позволяет утверждать следующее:

1) Полученные составы СУБ-бетонов характеризуются интенсивным набором прочности бетона в ранние сутки его твердения: в возрасте 7 суток РСЖ бетона достигает до 90 % от проектной прочности. Расплыв перевернутого конуса (РК) полученных бетонных самоуплотняющихся смесей составил 65-70 см;

2) Щебень с Аргунского карьера позволяет получать бетоны класса не более В 40 (М500).

В бетонах более высоких классов происходит разрушение по указанному заполнителю, т.к. данный заполнитель характеризуется невысокой природной прочностью из-за содержания в нем известняковой части и имеет марку дробимости М600-М800;

3) Песок Червленского месторождения пригоден для получения бетонов класса по прочности на сжатие не более В 40 (М500).

В более высоких классах бетонах, например, от В 45 (М600) до В 50 (М700), Червленский песок можно ввести в состав только после его обогащения с более крупным песком с $M_K = 2,8$ (Алагирским песком из РСО-Алания) с соотношением примерно 4:1 (крупный песок: мелкий песок).

Использование Червленского песка без обогащения в высоких классах бетонов приводит к перерасходу цемента из-за небольшого модуля крупности МК, равному 1,8, а также разрушается реотехнология бетонной смеси из-за неровного гранулометрического состава;

4) Цемент местный с Чири-Юртовского цементного завода позволяет получать составы СУБ-бетонов классов по прочности на сжатие не более В 65 (М900).

Однако реотехнологические свойства (расплыв конуса, водоотделение и т.д.) этих бетонов не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к СУБ-бетонам;

5) Зола с ТЭЦ г. Грозный при использовании ее в составах бетонов класса более В 40 (М500) не позволяет получать требуемую водоудерживающую способность, стойкость к седиментации бетонной смеси;

6) Известняковая мука из Ярыш-Мардынского месторождения пригодна для приготовления бетонов классов по прочности на сжатие до В 50 (М700).

В более высоких классах бетонов данный наполнитель не удовлетворяет требования по водоудерживающей способности бетонной смеси, стойкости к седиментации и получению высокой прочности бетона.

На втором этапе исследований для разработки составов СУБ-бетонов более высоких классов по прочности на сжатие В80 и выше с более улучшенными реотехнологическими и физико-механическими свойствами использовались привозные высококачественные материалы, а именно:

- Тульский цемент марки СЕМ I 42,5 Н с нормальной густотой 27 %, началом и концом схватывания 2 ч 20 мин и 3 ч 30 мин, соответственно, минералогическим составом: $C_3S - 62\%$; $C_2S - 18\%$; $C_3A - 5\%$; $C_4AF - 15\%$;
- гранитный щебень фракций 5-20 мм, 2,5-10 мм с карьера «Павловск Гранит» и ООО «Прогресс» (табл. 5);
- песок крупный с $M_K = 2,8$ с ЗАО «Багаевский карьер», «Алагирский карьер» (табл. 6);
- микрокремнезем с Новокузнецкого комбината с удельной поверхностью $1279 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- минеральный порошок МП-1 неактивированный г. Калуга;
- зола-унос Невыномысская ГРЭС с удельной поверхностью $980 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В качестве химических добавок так же использовались поликарбоксилатные добавки Sika® VISCOCRETE® 5 NEW.

Анализ проведенных исследований с использованием высококачественных привозных материалов, показал, что полученные составы характеризуются высокими физико-механическими показателями.

Составы СУБ-бетонов (табл. 7, составы 4 и 5), именуемые порошковыми, с отсутствием крупного заполнителя и использованием ультрадисперсных наполнителей, имеют класс по прочности на сжатие В100.

При этом важно отметить, что в этих составах применялись цементы с разных цементных заводов (СЕМ I 42,5 Н г. Тула и СЕМ I 42,5 Н г. Грозный), но результаты прочности на сжатие незначительно отличаются друг от друга.

**Таблица 5. Щебень из гранит-диабазовых пород фр. 5-10
 (ООО «Прогресс», Северная Осетия)**

Table 5. Crushed granite-diabase rocks fr. 5-10 (LLC «Progress», North Ossetia)

Наименование показателя		Значение показателя				
Зерновой состав щебня	Размер сит, мм	12,5	10	7,5	5	< 5
	Частные остатки, %	0,0	9,2	38,6	42,9	9,3
	Полные остатки, %	0,0	9,2	47,8	90,7	100
	по ГОСТу 8267-93	До 0,5	До 10	30-60	90-100	-
Прочность щебня (марка)		1200-1400				
Насыпная плотность, кг/м ³		1450				
Истинная плотность, кг/м ³		2700				
Средняя плотность, кг/м ³		2630				
Содержание дробленых зерен, %		85,2				
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, %		12,2				
Содержание зерен слабых пород, %		2,6				
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %		0,8				
Содержание глины в комках, %		нет				
Пустотность щебня, %		44,9				

Таблица 6. Песок Алагирского месторождения

Table 6. Sand of the Alagir deposit

Наименование показателя		Значение показателя						
Зерновой состав песка	Размер сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
	Частные остатки, %	0,9	17,4	12,3	25,8	30,5	10,5	2,6
	Полные остатки, %	0,9	18,3	30,6	56,4	86,9	97,4	
Модуль крупности		2,87						
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %		0,9						
Истинная плотность зерен, кг/м ³		2690						
Насыпная плотность, кг/м ³		1457						
Влажность, %		2,1						
Класс песка по зерновому составу		1-й						
Пустотность песка, %		45,8						

Были получены составы СУБ-бетонов на указанных сырьевых материалах и исследованы их свойства (табл. 7).

Таблица 7. Составы и свойства СУБ-бетонов
Table 7. Compositions and properties of SUB-concretes

составы	Кол-во добавки	В/Ц	Расход, кг, на 1 м ³ бетона							ρ _Б , кг/м ³	R _{сж} в возрасте, сут., МПа		РК см
			Ц	В	Щ	Щ	П	МКУ	З		7	28	
Класс бетона В 60													
1*	SikaVisco Crete 5NEW, 1,9 %	0,34	450	152	620	267	802	85	-	2372	63,6	84,8	69
Класс бетона В 80													
2	SikaVisco Crete 5NEW, 1,9 %	0,32	500	158	620	242	777	85	-	2497	89,8	100,9	75
3*	SikaVisco Crete 5NEW, 1,9 %	0,31	500	154	620	242	777	85	-	2400	70,9	95,4	72,5
Класс бетона В 100													
4	SikaVisco Crete 5NEW, 2,2 %	0,29	900	260	-	-	870	180	180	2240	95,7	112,9	85
5*	SikaVisco Crete 5NEW, 2,2 %	0,26	900	240	-	-	870	180	180	2244	91,5	109,2	78

Примечание: составы 1*, 3*, 5*- приготовлены на Чири-Юртовском цементе ЦЕМ I 42,5 Н. В/Ц – водоцементное соотношение; Ц – цемент; В – вода; Щ – щебень; П – песок; Н – наполнитель; МКУ- микрокремнезем Новокузнецкого комбината; З- зола-унос Невыномысской ГРЭС; R_{сж} – прочность на сжатие; РК – распыл конуса; ρ_Б – плотность бетона.

Вывод. Получены составы СУБ-бетонов классов по прочности на сжатие до В100 на основе использования местного природного и техногенного сырья Чеченской Республики и высококачественных привозных материалов.

Исследованы реологические и физико-механические свойства полученных бетонов с целью рекомендации их для использования в высотном монолитном строительстве, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах, и, прежде всего, при возведении высотного комплекса «Ахмат Тауэр» в г.Грозный.

Библиографический список:

1. Баженов, Ю.М. Бетон: технологии будущего / Ю.М. Баженов // Строительство: новые технологии – новое оборудование. -М.: ИД "Панорама", 2009. – № 8. – С.29-32.
2. Европейский нормативный документ по самоуплотняющемуся бетону: DAfStb-RichtlinieSelbsverdichtenderBeton (SVB-Richtlinie). AusgabeNovember 2003.
3. Zhernovsky, I.V., StrokovaV.V., Koshukhova, N.I., SobolevK.G. 2012. The use of mechano-activation for nanostructuring of quartz materials. Nanotechnology in Construction. NI-KOM 4. Agios Nikolaos, Greece.

4. Каприелов, С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. II / С.С. Каприелов [и др.] // Строительные материалы. - 2008. - №3. - С.9-13.
5. Монолитное строительство на территории России: история внедрения и перспективы развития. Сайт ООО «НПО «АНТАРЕС трейд». Санкт-Петербург, 2015. URL: http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe_stroitelstvo_na_territorii_rossii/
6. Баженов, Ю.М., Демьянова, В.С., Калашников, В.И. Модифицированные высококачественные бетоны / Научное издание. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 368 с.
7. Баженов, Ю.М. Мелкозернистые бетоны из вторичного сырья для ремонта и восстановления поврежденных зданий и сооружений / Ю.М. Баженов, Д.К.-С. Батаев, С.-А.Ю. Муртазаев [и др.]. - Грозный, 2011. - 342 с.
8. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева, Т.С.-А., Хубаев М. С.-М. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции» - 2015. - №8, С. 159-163.
9. Баженов, Ю.М., Алимов, Л.А., Воронин, В.В. [и др.]. Технология бетона, строительных изделий и конструкций. - М.: Изд-во АСВ, 2008. - 350 с.
10. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона. Издательство ЛКИ, 2007. - 296 с.
11. Лесовик, В.С. Строительные композиты на основе отсеков дробления бетонного лома и горных пород / В.С. Лесовик, С.-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов // Грозный, МУП «Типография», 2012. - 192 с.
12. Федосов, Н.Н. Новые строительные материалы / Н.Н. Федосов, Е.С. Клиничук, Т.Л. Вербицкая // Строительные материалы. - 2010. - № 3. - С. 67-68.
13. Кудрявцев, А.П. Разработка в РААСН новых высокопрочных и долговечных строительных композиционных материалов / А.П. Кудрявцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2006. - № 5. - С. 14-15.
14. Батраков, В.Г., Модификаторы бетона новые возможности // Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону. М., 2001. С. 184-197.
15. Комохов, П.Г. Шангина, Н.Н. Модифицированный цементный бетон, его структура и свойства // Цемент. 2002. - №1-2. - С. 43-46.
16. Pazhani, K. Study on durability of high performance concrete with industrial wastes / K. Pazhani, R. Jeyaraj // ATI - Applied Technologies & Innovations. Department of Civil Engineering, Anna University Chennai. India. - 2010. - Vol. 2. - № 8. - P.19-28.
17. Lesovik, V.S. 2012. Geonics. Subject and objectives. Belgorod State Technological University n.a. V.G/Shoukhov, 100 p.
18. Strokova, V.V., I.V.Zhernovsky, Yu.V.Fomenko and N.V.Makarova, 2013. Regulation of fine grained concrete efflorescence process. Applied Mechanics and Materials Vols. 357-360: pp: 1300-1303.
19. Муртазаев, С.-А.Ю. Использование в мелкозернистых бетонах отходов переработки горных пород / М.Ш. Саламанова, М.С. Сайдумов, М.И. Гишлакаева // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование в Чеченской республике: состояние и перспективы», посвященной 10-ти летию со дня образования КНИИ РАН. - С.181-184. Грозный: 2011г.
20. Муртазаев С.-А.Ю. Саламанова М.Ш. Высокопрочные бетоны с использованием фракционированных заполнителей из отходов переработки горных пород // Журнал «Устойчивое развитие горных территорий». 2015. - № 1(23). С.23-28.

References:

1. Bazhenov Yu.M. Beton: tekhnologii budushchego. Stroitelstvo: novyye tekhnologii - novoye oborudovanie. M.: ID "Panorama"; 2009;8:29-32. [Bazhenov Yu.M. Concrete: future

technologies. Construction: new technologies – new equipment. Moscow: Panorama Publ., 2009;8:29-32. (In Russ.)]

2. Evropeyskiy normativnyy dokument po samouplotnyayushchemusya betonu: DAF-Stb-RichtlinieSelbsverdichtenderBeton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003. [European normative document on self-compacting concrete: DAFStb-RichtlinieSelbsverdichtenderBeton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003. (In Russ.)]

3. Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Koshukhova N.I., Sobolev K.G. The use of mechano-activation for nanostructuring of quartz materials. Nanotechnology in Construction. NIKOM 4. Agios Nikolaos, Greece; 2012.

4. Kaprielov, S.S. i dr. Modifitsirovannyye vysokoprochnyye betony klassov V80 i V90 v monolitnykh konstruktsiyakh. Ch. II. Stroitelnyye materialy. 2008;3:9-13. [Kaprielov, S.S. et al. Modified high strength concrete of class B80 and B90 in the monolithic structures. Pt. II. Building materials. 2008;3:9-13. (In Russ.)]

5. Monolitnoye stroitelstvo na territorii Rossii: istoriya vnedreniya i perspektivy razvitiya. Sayt OOO "NPO "ANTARES treyd". Sankt Peterburg, 2015. [Monolithic construction in Russia: history of introduction and development prospects. The website "NPO "ANTARES trade". Saint-Petersburg, 2015. (In Russ.)]. Available from: http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe_stroitelstvo_na_territorii_rossii/

6. Bazhenov Yu.M., Demyanova B.C., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony. Nauchnoye izdanie. M.: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov; 2006. 368 s. [Bazhenov Yu.M., Demyanova B.C., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete. Scientific publication. Moscow: Association of Building Universities Publ.; 2006. 368 p. (In Russ.)]

7. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu. i dr. Melkozernistyye betony iz vtorichnogo syrya dlya remonta i vosstanovleniya povrezhdennykh zdaniy i sooruzheniy. Groznyy; 2011. 342 s. [Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu. et al. Fine-grained concrete from secondary raw materials to repair and restore damaged buildings and constructions. Groznyy; 2011. 342 p. (In Russ.)]

8. Salamanova M.Sh., Saydumov M.S., Murtazaeva T.S-A., Khubaev M.S-M. Vysokokachestvennyye modifitsirovannyye betony na osnove mineralnykh dobavok i superplastifikatorov razlichnoy prirody. Nauchno-analiticheskiy zhurnal "Innovatsii i investitsii". 2015;8:159-163. [Salamanova M.Sh., Saydumov M.S., Murtazaeva T.S-A., Khubaev M.S-M. High quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of different nature. Scientific-analytical magazine "Innovation and investment". 2015;8:159-163. (In Russ.)]

9. Bazhenov, Yu.M., Alimov, L.A., Voronin, V.V. i dr. Tekhnologiya betona, stroitelnykh izdeliy i konstruktsiy. M.: Izd-vo ASV; 2008. 350 s. [Bazhenov, Yu.M., Alimov, L.A., Voronin, V.V. et al. The technology of concrete, building products and structures. Moscow: ASV Publ.; 2008. 350 p. (In Russ.)]

10. Lermi R. Problemy tekhnologii betona. Izdatelstvo LKI; 2007. 296 s. [Lermi R. Problems of concrete technology. LKI Publ; 2007. 296 p. (In Russ.)]

11. Lesovik B.C. Murtazaev S-A.Yu., Saydumov M.S. Stroitelnyye kompozity na osnove otsefov drobleniya betonogo loma i gornykh porod. Groznyy: MUP Tipografiya; 2012. 192 s. [Lesovik B.C. Murtazaev S-A.Yu., Saydumov M.S. Building composites on the basis of screenings from the concrete crushing and rock. Groznyy: MUP Publ.; 2012. 192 p. (In Russ.)]

12. Fedosov N.N., Klinchuk E.S., Verbitskaya T.L. Novyye stroitelnyye materialy. Stroitelnyye materialy. 2010;3:67-68. [Fedosov N.N., Klinchuk E.S., Verbitskaya T.L. New construction materials. Building materials. 2010;3:67-68. (In Russ.)]

13. Kudryavtsev, A.P. Razrabotka v RAASN novykh vysokoprochnykh i dolgovechnykh stroitelnykh kompozitsionnykh materialov. Stroitelnyye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2006;5:14-15. [Kudryavtsev, A.P. Development of new high-strength and durable composite materials in RAACS. Building materials, equipment, technologies of XXI century. 2006;5:14-15.(In Russ.)]

14. Batrakov, V.G. Modifikatory betona novyye vozmozhnosti. Materialy I Vse-rossiyskoy konferentsii po betonu i zhelezobetonu. M.; 2001. 184-197. [Batrakov, V.G. Concrete modifiers: new opportunities. Proceedings of I All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete. Moscow; 2001. 184-197. (In Russ.)]
15. Komokhov, P.G. Shangina, N.N. Modifitsirovanny tsementnyy beton, ego struktura i svoystva. Tsement. 2002;1-2:43-46. [Komokhov, P.G. Shangina, N.N. Modified cement concrete, its structure and properties. Cement. 2002;1-2:43-46.(In Russ.)]
16. Pazhani K., Jeyaraj R. Study on durability of high performance concrete with industrial wastes. ATI – Applied Technologies & Innovations. Department of Civil Engineering, Anna University Chenna. India; 2010;2(8):19-28.
17. Lesovik, V.S. Geonics. Subject and objectives. Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shoukhov. 2012. 100 p.
18. Strokova V.V., Zhernovsky I.V., Fomenko Yu.V., Makarova N.V. Regulation of fine grained concrete efflorescence process. Applied Mechanics and Materials. 2013;357-360:1300-1303.
19. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saydumov M.S., Gishlakaeva M.I. Ispol-zovanie v melkozernistyykh betonakh otkhodov pererabotki gornyykh porod. Materialy Vse-rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Nauka i obrazovanie v Chechenskoy respublike: sostoyanie i perspektivy”, posvyashchennoy 10-ti letiyu so dnya obrazovaniya KNII RAN. Groz-nyy; 2011. 181-184. [Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saydumov M.S., Gishlakaeva M.I. The use of waste recycling rocks in fine concrete. Proceedings of All-Russian Scientific-Practical Conference "Science and Education in the Chechen Republic: Status and Prospects", devoted to 10-th Anniversary since the Complex Research Institute of RAS formation. Groznyy; 2011. 181-184. (In Russ.)]
20. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh. Vysokoprochnyye betony s ispolzovaniem fraktsionirovannykh zapolniteley iz otkhodov pererabotki gornyykh porod. Zhurnal "Ustoychivoye razvitie gornyykh territoriy". 2015;1(23):23-28. [Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh. High strength concrete using graded aggregates from waste rocks. Journal "Sustainable development of mountain territories". 2015;1(23):23-28. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Алиев Саламбек Алимбекович – кандидат технических наук, доцент кафедры, технология строительного производства.

Муртазаева Тамара Саид-Альвиевна – ассистент.

Сайдумов Магомед Саламувич – кандидат технических наук, доцент кафедры, технология строительного производства.

Саламанова Мадина Шахидовна – кандидат технических наук, доцент кафедры, технология строительного производства.

Information about the authors.

Salambek A. Aliev – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., technology of building production.

Tamara S. Murtazaeva – assistant.

Magomed S. Saydumov – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., technology of building production.

Madina S. Salamanova – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., technology of building production

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 22.09.2016.

Принята в печать 20.11.2016.

Conflict of interest

Received 22.09.2016.

Accepted for publication 20.11.2016.

Для цитирования: Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М. Напряженное состояние скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения с учетом анизотропии грунтовой среды. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):144-152. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

For citation: Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M. Stressed state of rocky subsoil in the vicinity of a circular section hydraulic engineering tunnel taking into account the anisotropy of the ground medium. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43 (4):144-152. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 502/504 : 69.035.4 : 539.31

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-144-152

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СКАЛЬНОГО ГРУНТА ВБЛИЗИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

Баутдинов Д.Т.¹, Джамалудинов М.М.²

¹Российский государственный аграрный университет-университет
природообустройства МСХА им. К.А. Тимирязева,

¹127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19,

²Республика Дагестан «Экосервис»,

²367000, г. Махачкала, ул. Абубакарова, 7,

¹e-mail: damir.ttl@mail.ru, ²e-mail: djamaludinov86@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью исследования является параметрический анализ напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения от собственного веса грунтовой среды при различных отношениях упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях и при различных углах наклона плоскости изотропии. **Метод.** Применена модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой грунт в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а в перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками. Угол наклона плоскости изотропии моделирует наклонное залегание слоев грунта. **Результат.** Определены тангенциальные напряжения на контуре выработки, позволяющие оценивать прочность грунтовой среды при различных глубинах заложения. Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком трансверсально-изотропном скальном грунте, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Так как решение такой задачи невозможно аналитическими методами, анализ напряженного состояния был выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно были определены размеры и тип конечного элемента, пригодного для расчета на основе решения верификационной задачи. В качестве верификационной задачи была принята задача Кирша. **Вывод.** При проектировании подземных сооружений требуется более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять к упругим характеристикам. Отсутствие растягивающих напряжений в верхнем сечении выработки при некоторых отношениях модулей деформации и коэффициентов Пуассона благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля. При угле наклона пластов менее 30° , его влияние на напряженное состояние незначительно и расчеты можно проводить, не учитывая угол наклона, но с учетом анизотропии упругих свойств.

Ключевые слова: модуль деформации, коэффициент Пуассона, трансверсально-изотропная среда, теория упругости.

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESSED STATE OF ROCKY SUBSOIL IN THE VICINITY OF A CIRCULAR SECTION HYDRAULIC ENGINEERING TUNNEL TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPY OF THE GROUND MEDIUM

*Damir T. Bautdinov*¹, *Magomed M. Dzhamaludinov*².

¹Russian State Agrarian University –

Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

¹19 Pryanishnikova Str., Moscow 127550, Russia,

²Republic of Dagestan «Ekoservis»,

²73 Abubakarov Str., Makhachkala 367000, Russia,

¹e-mail: damir.ttl@mail.ru, ²e-mail: djamaludinov86@mail.ru

Abstract: Objectives. The aim of this study consists in a parametric analysis of the stress state of transversely isotropic rocky ground in the vicinity of a circular cross-sectional hydraulic tunnel taking into account the dead load of the subsoil medium under various relations of the elastic characteristics of the subsoil environment in orthogonal directions and at different angles of inclination of the plane of isotropy. **Methods.** A transversely isotropic medium model (a special case of an anisotropic medium) is applied, in which the subsoil in one plane has the characteristics of an isotropic medium (isotropic plane) but in a perpendicular direction – in contradistinction to the characteristics of an isotropic medium. The angle of isotropic planar inclination models the oblique bedding of subsoil layers. **Results.** The determination of tangential stresses on the contour generation allows the strength of the subsoil medium to be estimated at different depths of emplacement. The calculation of extensive hydraulic engineering tunnels, constructed in strong, transversely isotropic rocky ground, is reduced to a problem of plane strain elasticity theory for a transversely isotropic medium surrounding the tunnel construction. Since the solution of this problem cannot be achieved using analytical methods, the analysis of the stress state was carried out by finite element method using the ANSYS software complex. The type and size of the finite element appropriate for the calculation were pre-identified based on solutions to the task of verification. For the verifactory task, the Kirsch problem was adopted. **Conclusion.** When designing underground structures, it is necessary to determine the physical and mechanical properties of rocky soils in greater detail and to pay special attention to the elastic characteristics. The absence of tensile stresses in the upper section of development with some relations of the moduli of deformation and Poisson's ratios benefit the work of hydraulic tunnelling. At a bedding angle of at least 30°, its impact on the state of stress is insignificant and calculations can be carried out without taking the angle into account, but instead considering the anisotropy of the elastic properties.

Keywords: module deformation, Poisson's ratio, transversely isotropic medium, theory of elasticity

Введение. Одними из основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения, несмотря на сложность возведения, большие затраты и трудоемкость, являются гидротехнические туннели. Применение в скальных грунтах туннелей без обделки позволяет снизить затраты на 20-30%, а также сократить сроки строительства на 10-15% [7, 8]. Согласно существующим нормам [1], массивы скальных грунтов следует считать анизотропными при коэффициенте анизотропии более 1,5.

Под коэффициентом анизотропии понимается отношение большего значения характеристики к меньшему значению в двух заданных направлениях. При этом в нормах [2] указано, что для туннелей, располагаемых в анизотропных грунтах с отношением модулей деформации в разных направлениях более 1,4, расчеты необходимо выполнять с учетом анизо-

тропии. Данные требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с весьма выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Нарушение целостности грунтового массива, в частности, туннельная выработка, меняет напряженно-деформированное состояние (НДС) массива, что приводит к появлению в некоторых местах растягивающих напряжений, а в некоторых случаях – значительных сжимающих напряжений [15]. Если эти напряжения будут превосходить расчетные сопротивления грунта на растяжение и сжатие, соответственно, то может произойти обрушение кровли выработки и выпучивание боковых стенок и днища туннеля [13, 14].

Нагрузки и воздействия на гидротехнические туннели подразделяются на постоянные и временные. Временные нагрузки, в свою очередь, разделяются на длительные, кратковременные и особые. К постоянным нагрузкам и воздействиям на туннели без отделки относится горное давление. К временным длительным нагрузкам относятся внутреннее давление (напор) воды в туннеле при нормальном подпорном уровне воды в водохранилище давление подземных вод.

К кратковременным нагрузкам относятся давление пульсации потока воды, внутреннее давление воды, возникающее от гидравлического удара при нормальной эксплуатации туннеля, давление от механизмов при производстве работ.

К особым нагрузкам и воздействиям относятся сейсмические и взрывные воздействия [9,10], внутреннее давление воды при форсированном подпорном уровне воды в водохранилище или от действия гидравлического удара при полном сбросе нагрузки, усилия, возникающие вследствие изменения температуры и ползучести грунтов.

Постановка задачи. Целью данной работы является проведение параметрического анализа напряженного состояния на контуре круглой выработки от собственного веса трансверсально-изотропного скального грунта с углом наклона плоскости изотропии α равном 15, 30 и 45 градусов, при различных упругих характеристиках в ортогональных направлениях. Угол наклона плоскости изотропии - α , моделирует наклонное залегание слоев скального грунта.

Методы исследования. Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений [12]. Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3, 8], что затрудняет применение этой модели на практике. При расчете гидротехнических туннелей широкое распространение получила модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой грунт в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а в перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками [6](рис. 1).

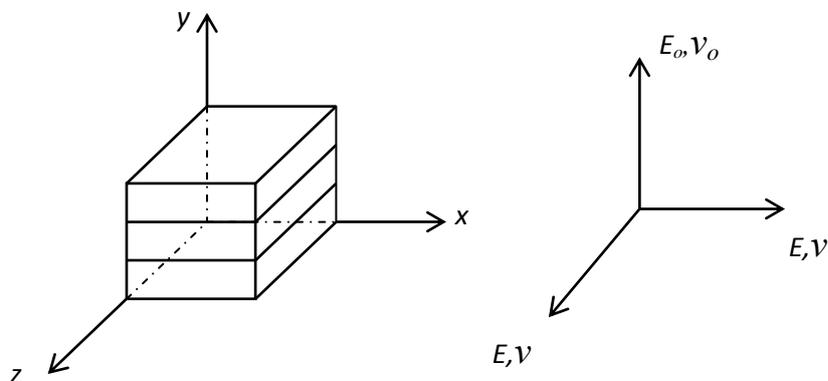


Рис.1. Модель трансверсально-изотропной среды

Fig.1. The model of a transversely isotropic medium

Где, $E=E_x=E_z$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии; $E_o=E_y$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении, нормальном

к плоскости изотропии; $\nu = \nu_{zx} = \nu_{xz}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии; $\nu_o = \nu_{xy} = \nu_{zy}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости, нормальной к плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии.

$G = G_{xz}$ – модуль сдвига в плоскости изотропии (ZOX), определяемый по известной зависимости (1), $G_o = G_{xy} = G_{yz}$ – модуль сдвига в любой плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии (ZOX), который можно определить по формуле К. Вольфа (2) [3]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$G_o = \frac{E \cdot E_o}{E + E_o(1+2\nu_o)} \quad (2)$$

Параметрический анализ выполнен методом конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS [11]. Предварительно были определены размер и тип элемента, пригодного для расчета.

В качестве верификационной задачи была рассмотрена упругая изотропная среда, подверженная сжатию и содержащая круглую выработку. Для такой задачи имеется аналитическое решение Кирша [3]. Результаты расчетов с использованием программного комплекса ANSYS показали хорошее соответствие аналитическому решению (погрешность менее 1%).

В качестве расчетной схемы, моделирующей гидротехнический туннель без обделки круговой формы сечения со значительной глубиной заложения, проходящий в скальных грунтах с наклонным залеганием слоев, с различными упругими характеристиками в ортогональных направлениях, применялась бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, подверженная сжатию (P – статическая вертикальная равномерно распределенная нагрузка), содержащая выработку круговой формы, находящаяся в условиях плоской деформации [5]. При этом наклонный слой грунта моделируется изотропной средой. Так как, боковое расширение грунта невозможно [4], на вертикальных гранях расчетной области поставлены горизонтальные связи, препятствующие боковому расширению.

Размеры расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (критерий Фролова М.И.). Расчетная схема представлена на рис. 2.

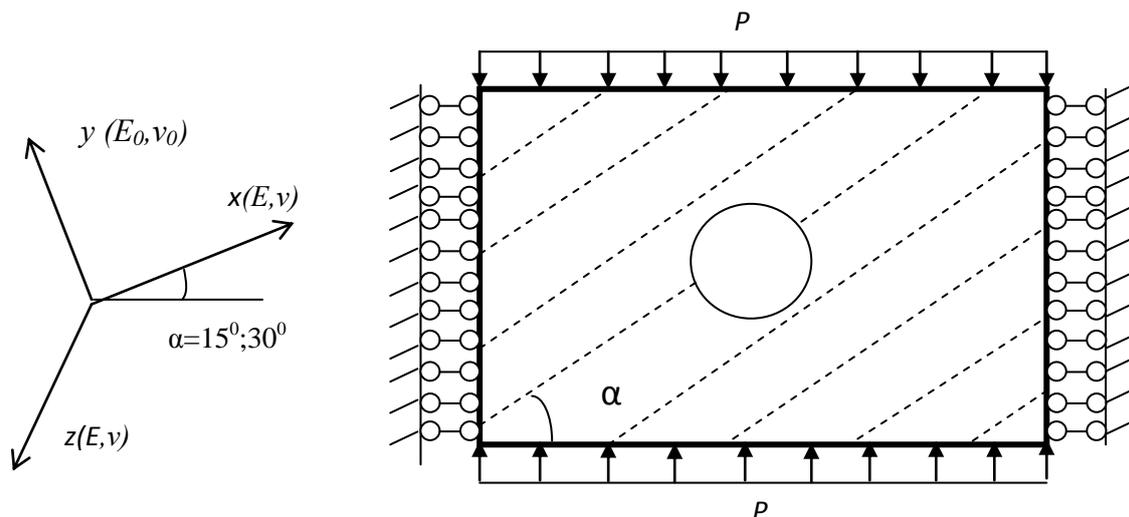


Рис.2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды

(α – угол наклона слоев грунта или плоскости изотропии)

Fig.2. The design scheme, which simulates the soil's own weight on the tunnel, according to the model of a transversally isotropic medium

(α is the angle of inclination of soil layers or the isotropy plane)

Обсуждение результатов. Рассмотрим результаты расчета на единичную нагрузку от собственного веса грунта на гидротехнический туннель. В процессе расчета задавались различные упругие характеристики в ортогональных направлениях. Также задавались углы наклона плоскости изотропии 15, 30 и 45 градусов.

На рис. 3 представлена эпюра относительных тангенциальных напряжений (η) по контуру выработки круговой формы для изотропной среды, которая позволит оценить влияние анизотропности свойств грунтового массива, а также угла наклона пластов скального грунта на напряженное состояние туннеля.

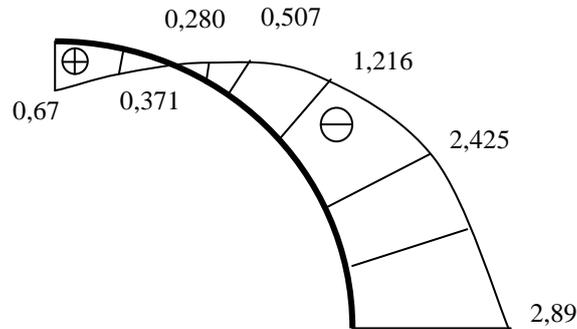


Рис. 3. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса грунта для изотропной среды при $\nu = 0,1$ с учетом симметрии

Fig. 3. Diagram of relative tangential stresses along the contour of a tunnel of circular cross-section from the self-weight of the soil for an isotropic medium at $\nu = 0,1$ with allowance for Symmetry

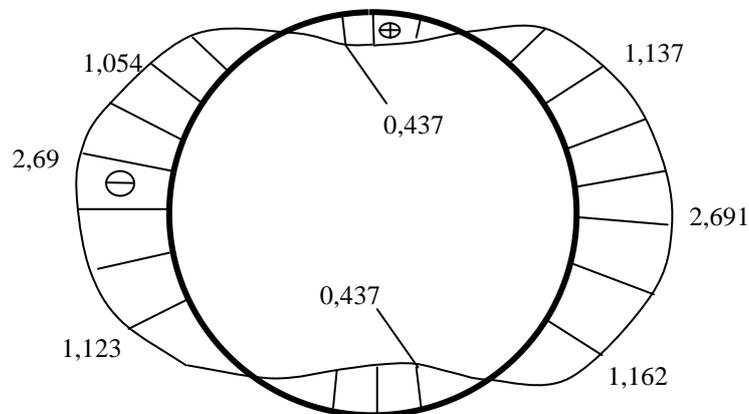


Рис. 4. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса transversально-изотропного грунта при угле наклона плоскости изотропии 15° , $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$

Fig. 4. Diagram of relative tangential stresses along the contour of a circular tunnel tunnel from the intrinsic weight of a transversally isotropic ground at an angle of inclination of the isotropy plane 15° , $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$

На рис. 4 и 5 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений при $E/E_0=1,5$, $\nu_0/\nu=2$ для transversально-изотропной среды с углом наклона пластов 15° и 45° .

Из рис. 4 и 5 видно, что растягивающие и сжимающие напряжения на контуре выработки меньше чем в изотропной среде.

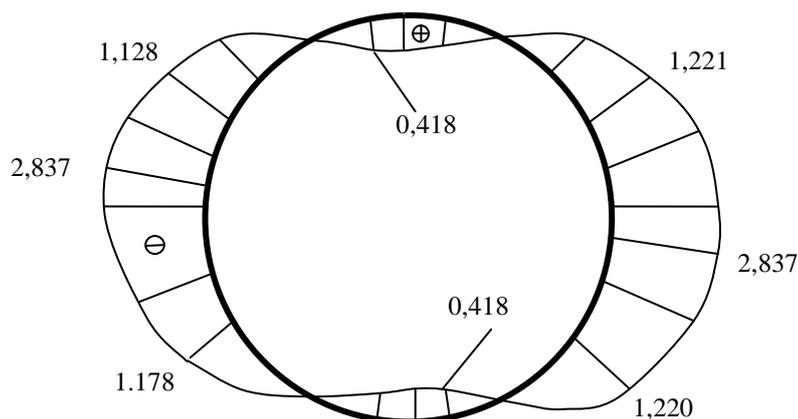


Рис.5. Эпюра относительных тангенциальных напряжений по контуру туннеля кругового сечения от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при угле наклона плоскости изотропии $45^\circ E/E_0=1,5, \nu_0/\nu = 2$

Fig.5. The diagram of the relative tangential stresses along the contour of a circular tunnel from the intrinsic weight of a transversally isotropic ground at an inclination angle of the isotropy plane is $45^\circ E/E_0 = 1,5, \nu_0/\nu = 2$

В таблицах 1 и 2 приведены значения наибольших относительных растягивающих и сжимающих тангенциальных напряжений на контуре выработки при различных отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях в зависимости от угла наклона слоев скального грунта.

Таблица 1. Максимальные относительные растягивающие тангенциальные напряжения на контуре выработки круговой формы от собственного веса грунта в зависимости от отношений упругих характеристик и угла наклона слоев грунта (плоскости изотропии)

Table 1. Maximum relative tensile tangential stresses on the contour of working out of a circular shape from the self-weight of the soil, depending on the ratio of the elastic characteristics and the angle of inclination of the soil layers (the isotropy plane)

ν/ν_0	E/E_0									
	$\alpha=0^\circ$					$\alpha=15^\circ$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	0,67	0,827	0,961	1,072	1,167	0,67	0,817	0,948	1,061	1,161
1,5	0,491	0,635	0,745	0,832	0,903	0,491	0,63	0,741	0,835	0,913
2	0,32	0,439	0,524	0,585	0,630	0,32	0,437	0,527	0,595	0,647
2,5	0,149	0,241	0,298	0,331	0,346	0,146	0,24	0,304	0,343	0,364
3	0	0,039	0,067	0,070	0	0	0,039	0,073	0,080	0,063
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ν/ν_0	E/E_0									
	$\alpha=30^\circ$					$\alpha=45^\circ$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	0,67	0,785	0,897	0,999	1,09	0,67	0,731	0,801	0,865	0,923
1,5	0,491	0,612	0,717	0,807	0,885	0,491	0,58	0,655	0,719	0,772
2	0,318	0,431	0,523	0,595	0,650	0,32	0,418	0,494	0,551	0,594
2,5	0,146	0,242	0,314	0,362	0,388	0,146	0,245	0,316	0,361	0,386
3	0	0,044	0,092	0,109	0,099	0	0,059	0,12	0,146	0,145
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2. Максимальные относительные сжимающие тангенциальные напряжения на контуре выработки круговой формы от собственного веса грунта в зависимости от отношений упругих характеристик и угла наклона слоев грунта (плоскости изотропии)
Table 2. Maximum relative compressive tangential stresses on the contour of circular shape development from the intrinsic weight of the soil, depending on the ratio of the elastic characteristics and the angle of inclination of the soil layers (the isotropy plane)

ν_0/ν	E/E_0									
	$\alpha=0^0$					$\alpha=15^0$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	-2,890	-2,743	-2,639	-2,569	-2,518	-2,890	-2,77	-2,686	-2,63	-2,918
1,5	-2,870	-2,706	-2,610	-2,547	-2,501	-2,869	-2,73	-2,65	-2,597	-2,869
2	-2,825	-2,673	-2,587	-2,532	-2,493	-2,821	-2,691	-2,617	-2,568	-2,821
2,5	-2,782	-2,645	-2,570	-2,525	-2,496	-2,774	-2,655	-2,587	-2,542	-2,774
3	-2,742	-2,621	-2,560	-2,528	-2,513	-2,728	-2,621	-2,561	-2,524	-2,728
3,5	-2,704	-2,602	-2,558	-2,544	-2,677	-2,683	-2,59	-2,542	-2,517	-2,683
ν_0/ν	E/E_0									
	$\alpha=30^0$					$\alpha=45^0$				
	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
1	-2,890	-2,847	-2,816	-2,802	-2,796	-2,890	-2,953	-2,999	-3,046	-3,092
1,5	-2,865	-2,799	-2,767	-2,75	-2,739	-2,869	-2,898	-2,941	-2,982	-3,021
2	-2,811	-2,748	-2,713	-2,69	-2,671	-2,821	-2,837	-2,872	-2,904	-2,931
2,5	-2,755	-2,693	-2,654	-2,622	-2,592	-2,774	-2,768	-2,793	-2,811	-2,821
3	-2,697	-2,636	-2,591	-2,549	-2,507	-2,728	-2,692	-2,702	-2,7	-2,689
3,5	-2,636	-2,577	-2,525	-2,476	-2,43	-2,683	-2,608	-2,598	-2,571	-2,531

Из таблицы 1 видно, что при увеличении отношений модулей деформации растягивающие напряжения возрастают по сравнению с изотропной средой, а при увеличении отношений коэффициентов Пуассона уменьшаются. Также при некоторых отношениях упругих характеристик растягивающие напряжения на контуре выработки равны нулю. Также можно заметить, что при увеличении угла наклона плоскости изотропии относительные тангенциальные растягивающие напряжения уменьшаются по сравнению со случаем, когда угол наклона плоскости изотропии равен нулю.

Как видно из таблицы 2, относительные сжимающие напряжения при увеличении отношений модулей деформации сначала уменьшаются по сравнению с изотропной средой, а затем, начиная с некоторого момента, начинают возрастать. Такая же картина наблюдается при увеличении отношений коэффициентов Пуассона. Также можно заметить, что при увеличении угла наклона плоскости изотропии относительные тангенциальные сжимающие напряжения увеличиваются по сравнению со случаем, когда угол наклона плоскости изотропии равен нулю.

При дальнейшем увеличении отношений модулей деформации (при заданном значении коэффициента Пуассона) растягивающие напряжения в верхнем сечении выработки увеличиваются, а сжимающие в боковом сечении, продолжают уменьшаться. С некоторого значения отношения модулей деформации и коэффициентов Пуассона растягивающие напряжения вовсе перестают возникать на контуре выработки.

Как видно из таблиц 1 и 2, зависимость тангенциальных напряжений от отношений упругих характеристик в верхнем и боковом сечении выработки практически близка к линейной. Следовательно, при определении относительных тангенциальных напряжений для отношений упругих характеристик, не представленных в таблицах, достаточно линейной интерполяции.

Вывод. Результаты параметрического анализа напряженного состояния грунта в окрестности выработки гидротехнического туннеля круговой формы поперечного сечения показывают, что на напряженное состояние непосредственное влияние оказывает степень

анизотропии упругих свойств. При проектировании подземных сооружений требуется более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять упругим характеристикам.

Отсутствие растягивающих напряжений в верхнем сечении выработки при некоторых отношениях модулей деформации и коэффициентов Пуассона благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Из таблиц 1 и 2 видно, что при угле наклона пластов менее 30° , его влияние на напряженное состояние незначительно, и расчеты можно проводить, не учитывая угол наклона, но с учетом анизотропии упругих свойств.

Библиографический список:

1. СНиП 2.02.02-85*. Основания гидротехнических сооружений: утв. Госстроем СССР 12.12.85[ред. 30.06.2003]. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 67 с.
2. СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические: утв. Госстроем СССР 14.11.84: взамен СН 238-73. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 28 с.
3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела/ С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высш. шк, 1983. 288 с.
5. Баутдинов Д.Т. Конечно-элементный анализ гидротехнических туннелей без обделки, проложенных в трансверсально-изотропных скальных грунтах. Дисс... канд. тех. наук. М.-2012. -175с.
6. Баутдинов Д.Т. Исследование напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения. //Приволжский научный журнал.- 2011.- № 3. - С. 93-98.
7. Фролов М.И., Баутдинов Д.Т., Боев Ю.А. Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений. М.: Институт СНГ, 2012. -392с. - с.365 - 388.
8. Фролов М.И. Теория упругости и упруго-пластичности в перемещениях. – М. Институт СНГ. -2012.-166с.
9. Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W., Zhou, Y.X., 2013. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. Tunnel. Underground Space Technol. 35, 227–234.
10. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
11. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
12. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure, Tehničkiglasnik 9, 1(2015), 35-39.
13. Ayberk Kaya, FikriBulut, SelçukAlemdag and AytunaSayin. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey, Scientific Research and Essays Vol. 6(31), pp. 6566-6583, 16 December, 2011. DOI: 10.5897/SRE11.1691.
14. Aulbach, B. and Ziegler, M. (2013). Simplified design of excavation support and shafts for safety against hydraulic heave. Geomechanics and Tunnelling 6(4), 362-374. DOI: 10.1002/geot11.201300031.
15. Y. Zhou, J. Zhao. Assessment and planning of underground space use in Singapore, Tunnelling and Underground Space Technology 55, 3(2016) 249-256. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.018

References:

- 1.SNiP 2.02.02-85*. Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: utv. Gosstroem SSSR 12.12.85 (red. 30.06.2003). M.: Gosstroy SSSR; 1985. 67 s. [Construction rules and regulations. Bases of hydraulic structures: approved by Gosstroy of the USSR 12.12.85 (30.06.2003). Moscow: Gosstroy of the USSR; 1985. 67 p. (In Russ.)]
- 2.SNiP 2.06.09-84. Tunneli gidrotekhnicheskije: utv. Gosstroem SSSR 14.11.84: vzamen SN 238-73. M.: Gosstroy SSSR, 1985. 28 s. [Construction rules and regulations. Hydraulic tunnels: ap-

- proved by Gosstroy of the USSR 14.11.84: instead of SN 238-73. Moscow: Gosstroy of the USSR; 1985. 28 p. (In Russ.)]
3. Lekhnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela. M.: Nauka; 1977. 416 s. [Lekhnitskiy S.G. The theory of elasticity of anisotropic body. Moscow: Nauka; 1977. 416 p. (In Russ.)]
 4. Tsytoovich N.A. Mekhanika gruntov. M.: Vyssh. Shk; 1983. 288 s. [Tsytoovich N.A. Soil mechanics. Moscow: Higher school; 1983. 288 p. (In Russ.)]
 5. Bautdinov D.T. Konechno-elementnyy analiz gidrotekhnicheskikh tunneley bez obdelki, prolozhennykh v transversalno-izotropnykh skalnykh gruntakh. Diss... kand. tekhn. nauk. M.; 2012. 175 s. [Bautdinov D.T. Finite element analysis of hydrotechnical tunnels without lining, contained in a transversely isotropic rock. PhD Dissertation. Moscow; 2012. 175 p. (In Russ.)]
 6. Bautdinov D.T. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya transversalno-izotropnogo skalnogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. 2011;3:93-98. [Bautdinov D.T. Investigation of the stress state of transversely isotropic rock soils near the hydraulic tunnel of circular cross-sectional shape. Privolzhsky Scientific Journal. 2011;3:93-98. (In Russ.)]
 7. Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boev. Yu.A. Sistemnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. M.: Institut SNG; 2012. 392 s. (365-388). [Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boev. Yu.A. System analysis of the stress state of hydraulic structures. Moscow: Institute of CIS countries; 2012. 392 s. (365-388). (In Russ.)]
 8. Frolov M.I. Teoriya uprugosti i uprugo-plastichnosti v peremeshcheniyakh. M.: Institut SNG; 2012. 166 s. [Frolov M.I. Theory of elasticity and elasto-plasticity and in movements. Moscow: Institute of CIS countries; 2012. 166 p. (In Russ.)]
 9. Li J.C., Li H.B., Ma G.W., Zhou Y.X. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. Tunnelling and Underground Space Technology. 2013;35:227–234.
 10. Jiang, N., Zhou, C. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnelling and Underground Space Technology. 2012;32:52–57.
 11. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN. 2009.
 12. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure. Tehnicheskiglasnik. 2015;9:35-39.
 13. Kaya A., Bulut F., Alemdag S., Sayin A. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: a case study from Turkey. Scientific Research and Essays. 16 December, 2011;6(31):6566-6583. DOI: 10.5897/SRE11.1691.
 14. Aulbach B., Ziegler M. Simplified design of excavation support and shafts for safety against hydraulic heave. Geomechanics and Tunnelling. 2013;6(4):362-374. DOI: 10.1002/geot11.201300031.
 15. Zhou Y., Zhao J. Assessment and planning of underground space use in Singapore. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. 249-256. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.018.

Сведения об авторах.

Баутдинов Дамир Тахирович – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных конструкций.

Джамалудинов Магомед Магомеднабиевич – инженер отдела капитального строительства государственного казенного учреждения РД «Экосервис»

Information about the authors.

Damir T. Bautdinov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof.

Magomed M. Dzhamaludinov – Engineer, Department of capital construction of the state institution RD «Ecoservice»

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 28.09.2016.

Принята в печать 28.11.2016.

Conflict of interest

Received 28.09.2016.

Accepted for publication 28.11.2016.

Для цитирования: Жильникова Т.Н., Корянова Ю.И., Несветаев Г.В. Интегральные показатели влияния рецептурно-технологических факторов на структурообразование цементного камня бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43(4):153-166. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-153-166.

For citation: Zhilnikova T.N., Koryanova Y.I., Nesvetaev G.V. Integral indicators of the influence of formula-technological factors on the cement matrix of concrete structure formation for injection with two-step expansion. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43(4):153-166. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-153-166.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-153-166

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЛИЯНИЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ БЕТОНОВ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ С ДВУХСТАДИЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

Жильникова Т.Н.², Корянова Ю.И.,³ Несветаев Г.В.¹,

^{1,2,3} Донской государственный технический университет,

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,

¹ e-mail: nesgrin@yandex.ru,

² e-mail: zhilnikova.tatjana@yandex.ru, ³ e-mail: koryanova.yi@mail.ru

Резюме: Цель. Структурообразование цементного камня бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением сложный процесс, на который оказывают влияние множество факторов, как рецептурного характера (состав и дозировка добавки, минералогический состав портландцементного клинкера, состав бетона, наличие химических добавок), так и технологического (тонкость помола цемента, температура твердения и т.д.). **Метод.** Для оценки влияния вышеуказанных факторов в статье предложено введение ряда интегральных показателей, характеризующих как процесс, на который оказывается влияние, так и фактор, производящий влияние. Для оценки влияния различных факторов на процесс газовыделения авторами предложен коэффициент эффективности газовыделения. **Результат.** В статье представлены результаты исследования влияния количества газообразующей добавки, вида и дозировки суперпластификатора на процесс газовыделения способом вытеснения на растворной смеси. Авторами предложен коэффициент эффективности расширения. Уточнена степень зависимости относительного увеличения объема бетонной смеси на первой стадии расширения от концентрации заполнителя и увеличения объема цементного теста. Авторами предложена формула для описания зависимости относительных деформаций расширения от концентрации заполнителя. Для оценки условий, в которых находится смесь, предложено использовать показатель – коэффициент стесненности расширения.

Ключевые слова: бетон для инъектирования с двухстадийным расширением, рецептурно-технологические факторы, структурообразование цементного камня, коэффициент эффективности газовыделения, коэффициент эффективности расширения, коэффициент стесненности расширения, коэффициент условий твердения, корректирующий коэффициент, концентрация заполнителя, интегральные показатели.

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

INTEGRAL INDICATORS OF THE INFLUENCE OF FORMULA-
TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE CEMENT MATRIX OF CONCRETE
STRUCTURE FORMATION FOR INJECTION WITH TWO-STEP EXPANSION

Tatjana N. Zhilnikova², Yulia I. Koryanova³, Grigory V. Nesvetaev¹

^{1,2,3} Don State Technical University

1 Gagarina Sq., Rostov on Don 344000, Russia,

¹ e-mail: nesgrin@yandex.ru,

² e-mail: zhilnikova.tatjana@yandex.ru, ³ e-mail: koryanova.yi@mail.ru

Abstract: Objectives. The formation of the structure of hardened concrete grouting with two-stage expansion is a complex process that is influenced by many factors, both of a prescriptive nature (composition and additive dosage, mineralogical composition of Portland cement clinker, concrete composition, the presence of chemical additives) and in terms of process (the fineness of cement grinding, temperature of curing, etc.). **Methods.** In order to assess the impact of the above factors, the article proposes the introduction of a number of integrated indicators being characterised as a process in which influences are shown alongside the factor generating the influence. For the evaluation of the influence of different factors on the process of gas generation, an effectiveness ratio of gas generation is proposed by the authors. **Results.** The article presents the results of an investigation into the influence of the amount of gassing agent and the type and dosage of superplasticiser on the process of gassing by means of the displacement method on the mortar mix. The authors similarly propose an expansion efficiency coefficient. The article presents the results of the investigation into the influence of the amount of gassing agent, the presence and amount of superplasticiser, the sand/cement ratio, aggregate size and water-cement ratio during the first stage of expansion of the mixture. The authors propose a formula for describing the dependence of the relative expansion deformations on the concentration of filler. In order to assess the conditions in which a mixture is present, it is proposed to use an indicator consisting in the constraint expansion coefficient. **Conclusion.** Use of the hardening condition coefficient is proposed as a means of accounting for the effect of curing conditions on the strength of the concrete grouting with two-stage expansion. The authors recommend taking the introduction of correction factors into account when considering the impact of formulation and technological factors.

Keywords: concrete grouting with two-stage expansion of formulation and technological factors, concrete structure, gassing efficiency coefficient, expansion efficiency coefficient, expansion constraint coefficient, curing condition coefficient, correction coefficient, concentration of filler, integrated indicators

Введение. Структурообразование цементного камня бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением сложный процесс, на который оказывают влияние множество факторов, как рецептурного характера (состав и дозировка добавки, минералогический состав ПЦ клинкера, состав бетона, наличие химических добавок), так и технологического (тонкость помола цемента, температура твердения и т.д.).

Постановка задачи. Для оценки влияния вышеуказанных факторов целесообразно введение ряда интегральных показателей, характеризующих как процесс, на который оказывает влияние, так и факторы, оказывающие воздействие.

На первой стадии расширения центральными процессами являются газовыделение за счет введения в состав вяжущего газообразующей добавки (ГД), а так же расширение бетонной смеси за счет процесса газообразования.

Методы исследования. Для оценки влияния различных факторов на процесс газовойделения авторами предложен коэффициент эффективности газовойделения:

$$k_r = \frac{V_{H_2}^{\Phi}}{V_{H_2}^T}, \quad (1)$$

где $V_{H_2}^T$ – объем газа, теоретически способный выделиться при взаимодействии гидратирующегося цемента с некоторым количеством ГД; $V_{H_2}^{\Phi}$ – объем газа, фактически выделившийся при взаимодействии гидратирующегося цемента с тем же количеством ГД.

В ходе исследования было выявлено и оценено влияние количества ГД, вида и дозировки суперпластификатора (СП) на процесс газовойделения способом вытеснения на растворной смеси. Результаты представлены на рис. 1-3.

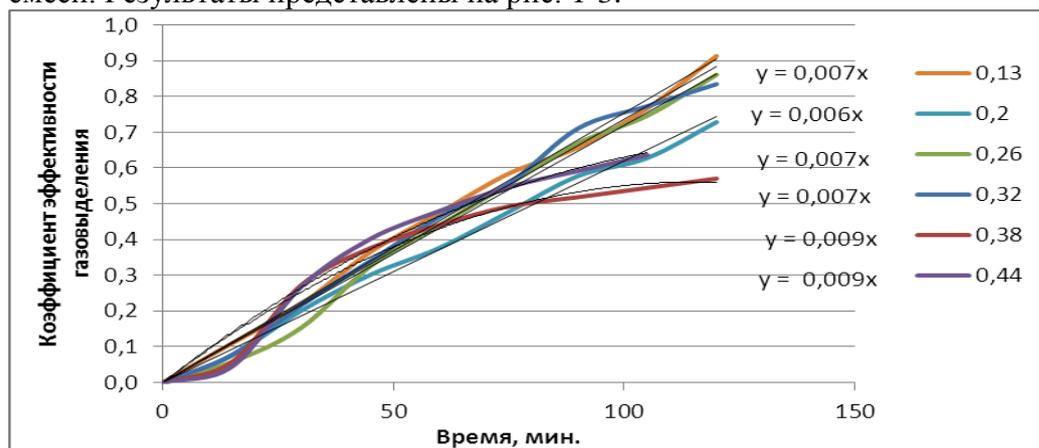


Рис.1. Коэффициент эффективности газовойделения во времени в зависимости от количества ГД: 0,13...0,44 – количество ГД, %Ц
Fig.1. Coefficient of gas release efficiency in time, depending on the amount of gas-forming additive: 0,13 ... 0,44 - amount of HD, % C

Из представленных на рис. 1 данных можно отметить, что существует предельная дозировка ГД 0,32%Ц при превышении которой, процесс газообразования меняет свой характер, как по объему выделения газа, так и по скорости выделения. В начальный момент времени (20 мин.) процесс газообразования в составах с дозировкой более 0,32%Ц замедлен относительно составов с меньшей дозировкой ГД, а скорость газовойделения в это время резко возрастает до своего максимума. Затем процесс газообразования стабилизируется и становится равномерным, однако конечное значение объема выделившегося газа составляет меньшую величину, нежели у составов с дозировкой ГД менее 0,32%Ц.

Данное явление можно объяснить тем, что процесс газообразования непосредственно связан с взаимодействием ГД и гидроксида кальция, зависит от количества данного гидроксида в растворной смеси.

В начальный момент времени происходит нехватка гидроксида вследствие большого количества ГД, вступающей в реакцию, за счет чего и наблюдается спад газообразования, в дальнейшем количество гидроксида увеличивается и процесс стабилизируется.

В составах с содержанием ГД менее 0,32%Ц гидроксида кальция хватает для вовлечения всей ГД в химическую реакцию, и процесс происходит линейно-равномерно.

Как известно, СП могут оказывать влияние на процесс гидратации цемента, в том числе напрягающего [1-17], особенно на ранних этапах, что может сопровождаться изменением количественного состава ионов в поровой жидкости, в связи с чем возможно изменение кинетики газообразования.

На рис. 2 представлены исследования влияния СП на процесс газообразования растворной смеси.

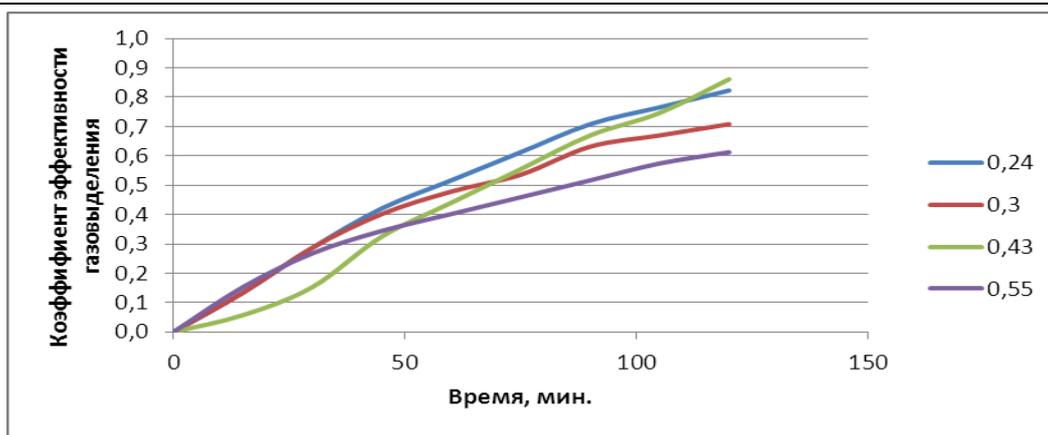


Рис. 2. Коэффициент эффективности газовой выделения во времени в зависимости от количества СП: 0,24...0,55 – количество СП, %Ц
Fig. 2. Coefficient of gas release efficiency in time, depending on the amount of superplasticizer: 0,24 ... 0,55 - amount of SP,% C

Анализируя полученные данные можно отметить, что существует оптимальная дозировка СП (0,43%Ц), при которой процесс газообразования является наиболее эффективным, так как в начальный период за счет замедляющего действия СП на процесс гидратации отодвигает нарастание максимальной скорости газообразования на момент, когда в растворяющей смеси находится достаточное количество гидроксида алюминия, необходимого для реакции газообразования. СП в других дозировках не влияет на характер газообразования и его скорости, и дозировка СП обратно пропорциональна количеству выделяющегося в растворяющей смеси газа.

Известно, что СП имеет индивидуальную совместимость с конкретным видом цемента, что в свою очередь может повлиять на процесс газообразования.

На рис.3 и в табл.1 представлены результаты исследования вида СП на процесс газообразования растворяющей смеси.

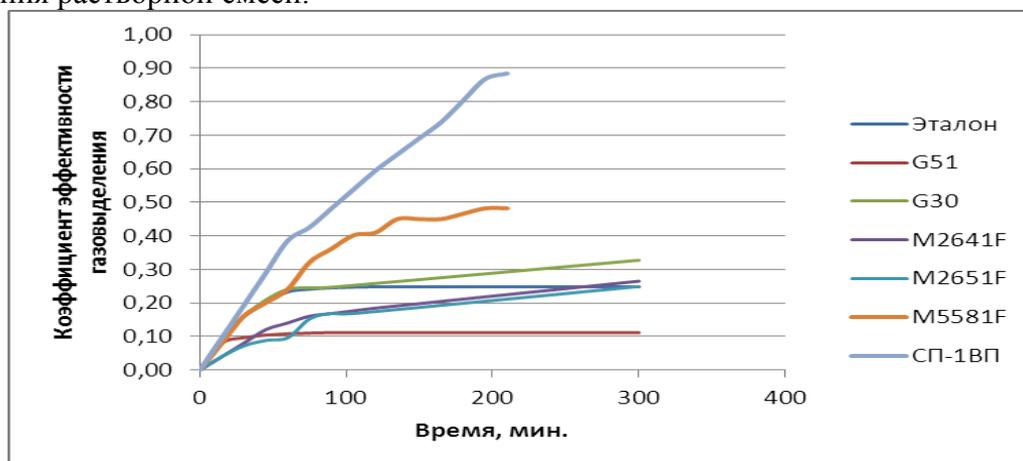


Рис. 3. Влияние вида СП на коэффициент эффективности газовой выделения: суперпластификаторы: G51- Glenium 51, G30 - Glenium 30, M2641F – Melflux 2641F, M2651F - Melflux2651F, M5581F - Melflux 5581F, СП-1ВП – СП-1ВП производства «Полипласт»

Fig. 3. Influence of the type of superplasticizer on the coefficient of efficiency of gas evolution: Superplasticizers: G51-Glenium 51, G30-Glenium 30, M2641F-Melflux 2641F, M2651F-Melflux2651F, M5581F-Melflux 5581F, SP-1VP-SP-1VP produced by Polip>Last

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что вид СП оказывает существенное влияние на кинетику газообразования и наиболее эффективными СП при работе с ГД являются СП-1ВП и Melflux 5581F.

Таким образом, регулируя количество ГД от 0,13 до 0,44% от массы Ц, при оптимальном количестве СП 0,43%Ц и его вид для наиболее эффективной работы с ГД (СП-1ВП, Melflux 5581F) можно управлять процессом газообразования.

Таблица 1. Коэффициент эффективности газовыделения в присутствии СП
Table 1. Coefficient of gas evacuation efficiency in the presence of superplasticizer

№	Вид СП	Коэффициент эффективности газовыделения
1	Отсутствует	0,284 (100%)
2	Glenium 30	0,247 (87%)
3	Glenium 51	0,112 (39,4%)
4	Полипласт СП-1ВП	0,884 (311%)
5	Melflux 2641F	0,185 (65,1%)
6	Melflux 2651F	0,169 (59,5%)
7	Melflux 5581F	0,482 (170%)

Увеличение объема смеси в результате газовыделения будет определяться кинетикой и количеством выделяющегося газа, способностью смеси к деформированию без нарушения сплошности (вязкостью смеси), потерями газа вследствие разрывов смеси при деформировании.

В качестве интегрального показателя, характеризующего вышеуказанные факторы, авторами предложен коэффициент эффективности расширения, представляющий отношение роста объема смеси $\Delta V_{см}^{\Phi}$ при газовыделении к объему газа, теоретически способного выделиться в процессе при взаимодействии ГД с цементом

$$k_p = \frac{\Delta V_{см}^{\Phi}}{V_{H_2}^T} \quad (2)$$

В ходе исследования изучалось влияние количества ГД, наличия и количества СП, соотношение П/Ц, крупность заполнителя и В/Ц на первой стадии расширения смеси.

Результаты представлены на рис. 4– 8.

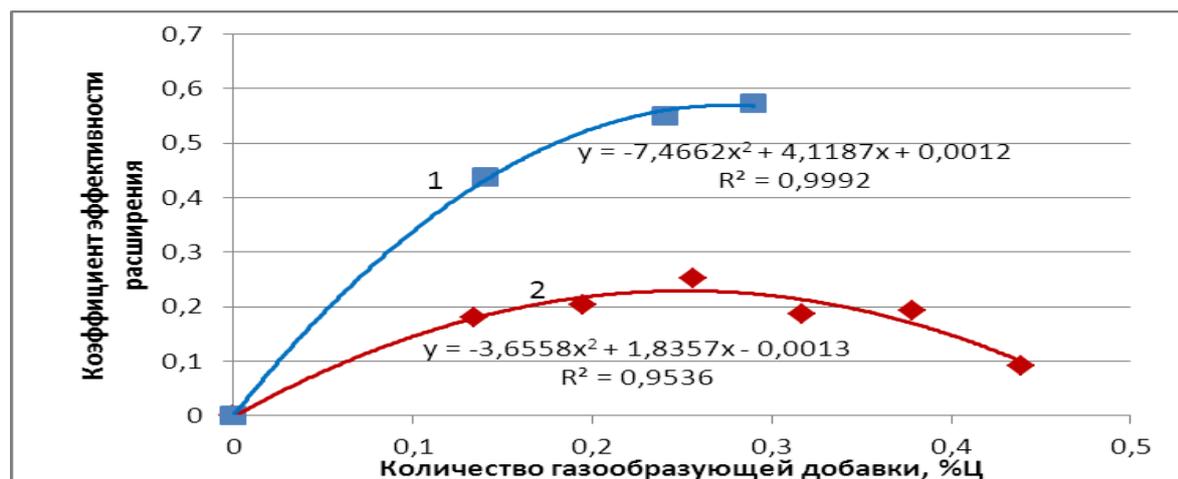


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективности расширения от количества ГД:
 1 – данные без СП; 2 – данные с СП в дозировке 0,43%Ц

Fig. 4. Dependence of the expansion efficiency factor on the number of gas-forming additive:

1 - data without SP; 2 - data from the joint venture at a dosage of 0,43% C

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что наличие в растворной смеси СП снижает изменение объема вследствие воздействия на ионный состав поровой жидкости,

замедляющего влияния СП на процесс гидратации и большей способности к деформированию, что привело к частичной потере газа. Однако следует отметить, что максимум коэффициента эффективности расширения приходится на одинаковую дозу ГД, что говорит о наличии ее оптимума.

Результаты исследования количества СП на расширение растворной смеси представлены на рис. 5.

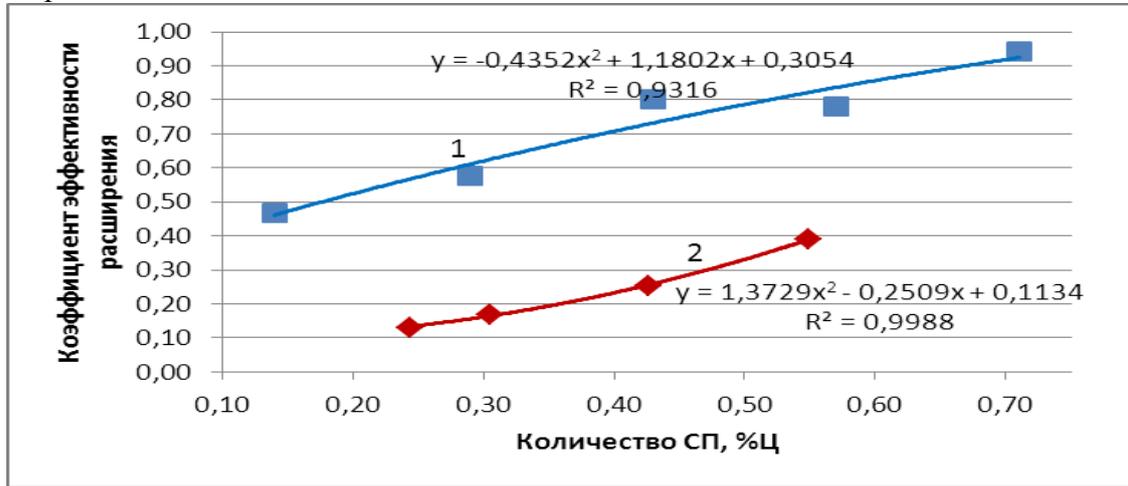


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности расширения от количества СП:
 1 – данные при П/Ц = 2, В/Ц = 0,5; 2 – данные при П/Ц = 1,6, В/Ц = 0,34

Fig. 5. Dependence of the efficiency of expansion on the number of superplasticizer:
 1 - data for П / Ц = 2, В / Ц = 0,5; 2 - data at П / Ц = 1,6, В / Ц = 0,34

Полученные данные говорят о том, что с увеличением дозировки СП повышается эффективность расширения растворной смеси, это может быть связано с тем, что при введении СП повышается вязкость растворной смеси, которая способствует расширению без нарушения сплошности и потери образующегося в смеси газа. Наряду с влиянием дозировки СП следует отметить влияние соотношения П/Ц на процесс расширения, что связано с изменением как концентрации, так и удельной поверхности заполнителя.

На рис. 6 представлены результаты исследования влияния модуля крупности заполнителя на расширение растворной смеси.

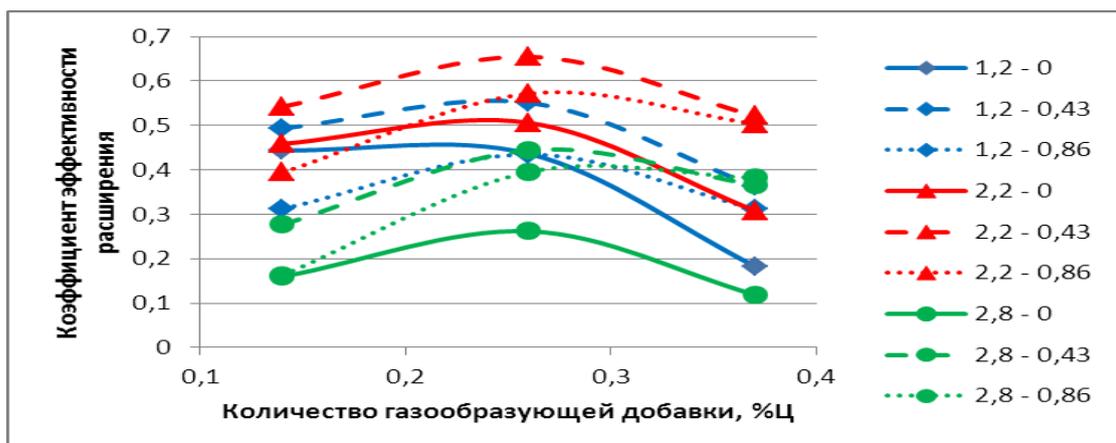


Рис.6. Зависимость коэффициента эффективности расширения от количества ГД:
 1,2 ... 2,8 – модуль крупности песка; 0 ... 0,86 – дозировка СП, %Ц

Fig.6. Dependence of the expansion efficiency factor on the number of gas-forming additive: 1,2 ... 2,8 - module of the size of sand; 0 ... 0,86 - dosage of the joint venture, % C

Анализируя полученные данные можно отметить, что все составы вне зависимости от модуля крупности заполнителя и количества СП имеют наиболее эффективную дозировку ГД 0,25%Ц.

По количеству СП оптимальным значением является 0,43%Ц, по модулю крупности заполнителя значение 2,2.

На рис. 7, 8 представлены результаты исследования влияния соотношения П/Ц на расширение растворной смеси.

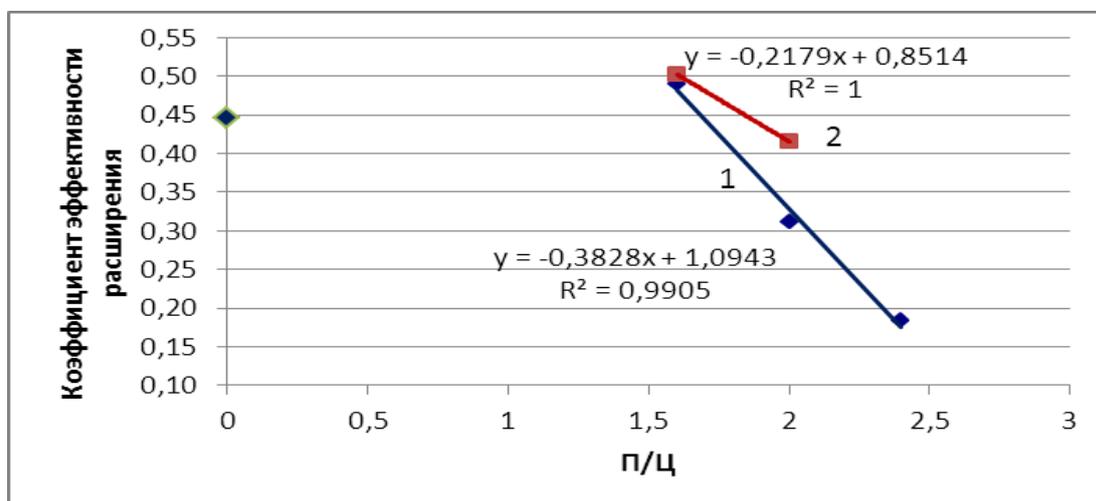


Рис.7. Зависимость коэффициента эффективности расширения от соотношения П/Ц:

1 – данные при дозировке СП 0,43%Ц; 2 – данные при дозировке СП от 0,43 до 0,67%Ц

Fig.7. Dependence of the coefficient of efficiency of expansion on the ratio of П / Ц:

1 – data at dosage of SP 0,43% Ц; 2 - data at a dosage of the superplasticizer from 0,43 to 0,67%

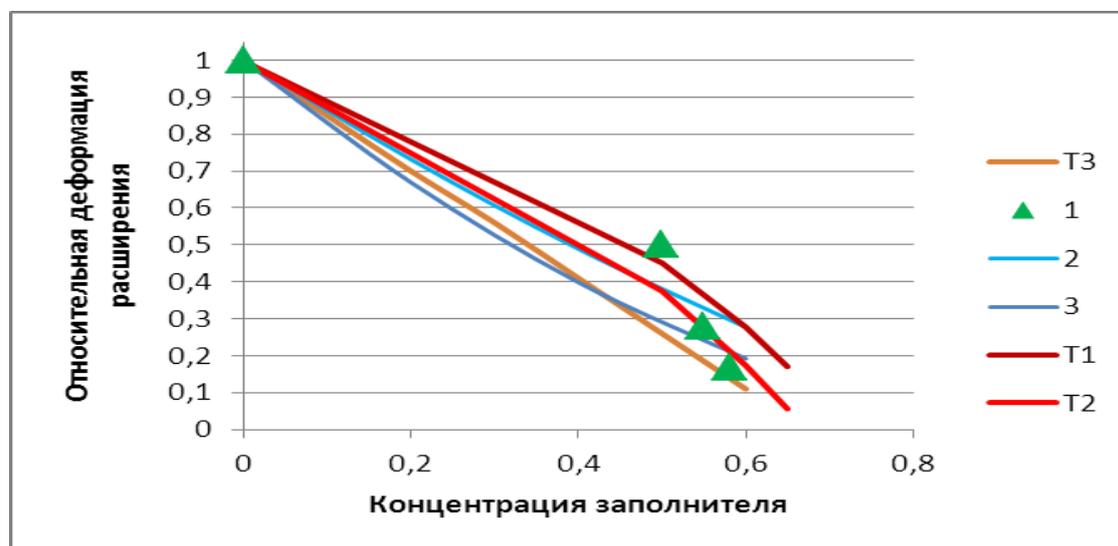


Рис.8 Зависимость относительного расширения от концентрации заполнителя:

1 – данные авторов; 2 – данные по формуле (3) при К=1,4; 3 – данные по формуле (3) при К=1,8; T1 – данные по формуле (4) при к=0,79; T2 – данные по формуле (4) при к=0,9; T3 – данные Чмель Г.В. [18] по расширению

Fig.8 Dependence of relative expansion on aggregate concentration:

1 - the data of the authors; 2 - data on the formula (3) with K = 1,4; 3 - data on the formula (3) at K = 1,8; T1 - data according to the formula (4) with k = 0,79; T2 - data according to formula (4) with k = 0,9; T3 - data Chmel G.V. [18] to expand

Усадка бетона с концентрацией заполнителя связаны зависимостью вида:

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{бс}}} = \left(\frac{\varepsilon_{\text{ц}}}{\varepsilon_{\text{бс}}} \right)^3 = (1 - V)^{3k} \quad (3)$$

$$k = 1,4 - 1,8$$

Из представленных данных следует, что данная зависимость не может быть использована при описании полученной зависимости, так как не отражает ее характера. Расширение бетона с концентрацией заполнителя по данным [13] связано линейной зависимостью, которая не подходит для описания.

В связи с этим, для описания зависимости относительных деформаций расширения от концентрации заполнителя авторами предлагается формула следующего вида:

$$\frac{\Delta V_{\text{бс}}}{\Delta V_{\text{цт}}} = 1 + k * \text{Ln}(1 - V) \quad (4)$$

$$k = 0,79 - 0,9.$$

Обсуждение результатов. Варьируя рецептурно-технологические факторы, а именно количество ГД от 0,13 до 0,44%Ц, количество СП от 0,14 до 0,86%Ц, модуль крупности заполнителя от 1,2 до 2,8, соотношение П/Ц от 0 до 2,4, при оптимальном соотношении В/Ц от 0,37 до 0,42 можно управлять процессом расширения бетонной смеси и получать расширение от 6,03 до 63,99% от первоначального объема.

Увеличение объема растворной смеси может происходить в условиях ограничения возможного расширения, т.е. растворная смесь увеличивается в объеме больше, чем ей это позволяет пространство.

Такие условия называются стесненностью расширения и могут влиять как на структуру цементного камня посредством изменения плотности и пористости, так и на прочностные показатели.

Для оценки условий, в которых находится смесь, авторами предложено использовать показатель – коэффициент стесненности расширения:

$$K_{\text{фикс}} = \frac{\Delta V_{\text{фикс}}}{\Delta V_{\text{св.}}} \quad (5)$$

где $\Delta V_{\text{фикс}}$ – возможный объем изменения системы, %

$\Delta V_{\text{св.}}$ - изменение объема системы в свободном (не стесненном) состоянии.

Значение коэффициента $K_{\text{фикс}}$ лежит в пределах от 0 до 1.

При $K_{\text{фикс}} = 0$ дополнительная пористость будет нулевая, при $K_{\text{фикс}} = 1$ дополнительная пористость будет равна дополнительной пористости в свободном состоянии. Задачей являлось нахождение промежуточных значений, выявление зависимостей влияния $K_{\text{фикс}}$ на прочностные показатели и выявление оптимального значения данного параметра.

К числу факторов, влияющих на кинетику твердения, относятся не только рецептурные (состав и дозировка добавки, минералогический состав ПЦ клинкера, состав бетона, наличие химических добавок), но и технологические (тонкость помола цемента, температура твердения и т.д.), что делает задачу управления процессами структурообразования достаточно сложной.

Для учета влияния условий твердения на прочность бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением авторами предложено использование коэффициента условий твердения, равного отношению предела прочности на сжатие для бетонов с двухстадийным расширением при заданных условиях твердения к пределу прочности на сжатие для бетонов с двухстадийным расширением при нормальных условиях твердения (6).

$$K_{ут} = R_i / R_{н.у.} \quad (6)$$

R_i – предел прочности на сжатие для бетонов с двухстадийным расширением при заданных условиях твердения;

$R_{н.у.}$ – предел прочности на сжатие для бетонов с двухстадийным расширением при нормальных условиях твердения.

Чем выше значение данного коэффициента, тем более благоприятными являются условия твердения по отношению к показателю прочности.

В табл. 2 представлены результаты исследования влияния условий твердения на прочность образцов.

Таблица 2. Условия твердения
Table 2. Conditions of hardening

Условия/№	1	2	3	4	5	6	7 (Э)	8	9
Температура, °С	20	20	20	20	35	35	20	5	5
Степень заполненности цилиндров, доли	1	0,95	1	0,95	1	0,95	1	1	0,95
Среда твердения	воздух	воздух	вода	вода	воздух	воздух	воздух	воздух	воздух
Коэффициент условий твердения $K_{ут}$	1	1	0,83	0,67	1,09	0,86	1,23	0,69	0,51

Известно, что прочность бетона является функцией нескольких переменных, таких как: В/Ц отношение, активность ПЦ, качество заполнителя и т.д., регулируя которые можно добиться необходимой прочности.

Однако введение в состав бетона добавок, изменение условий выдерживания образцов, ограничение объема может влиять на прочность, вследствие воздействия, как на кинетику процессов гидратации, так и на структурообразование цементного камня [19, 20].

Авторами предложено учитывать влияние рецептурно-технологических факторов при помощи введения корректирующих коэффициентов. Корректирующий коэффициент можно представить в общем виде:

$$K_i = (a * P + 1) * \frac{R_{отн.,i}}{R_{отн.}} \quad (7)$$

где, P – дополнительная пористость,

$R_{отн.}$ – относительная прочность без добавочного эталона/ эталона хранящегося в н.у., полученная по формуле Рышкевича,

$R_{отн.,i}$ – относительная прочность состава с добавкой/ состава, хранящегося в условиях отличных от н.у.,

a – коэффициент учитывающий вид добавки/ условия твердения.

Влияние исследованных рецептурно-технологических факторов:

– ГД a = -1,36

– СП a = 3,66

– модуль крупности заполнителя a = -0,56

– ограничение объема a = 0,53

– РД a = -0,81

– РД совместно с НТФ a = -1,02

– ограничение объема и совместное введение ГД, СП, РД и НТФ a = -5,64

– длительность твердения в воде:

28 суток a = -7,18; 90 суток a = -12,34

Представленные на рис. 9, 10 данные говорят о том, что прочность скелета возрастает, как с увеличением продолжительности твердения в воде, так и с повышением температуры твердения.

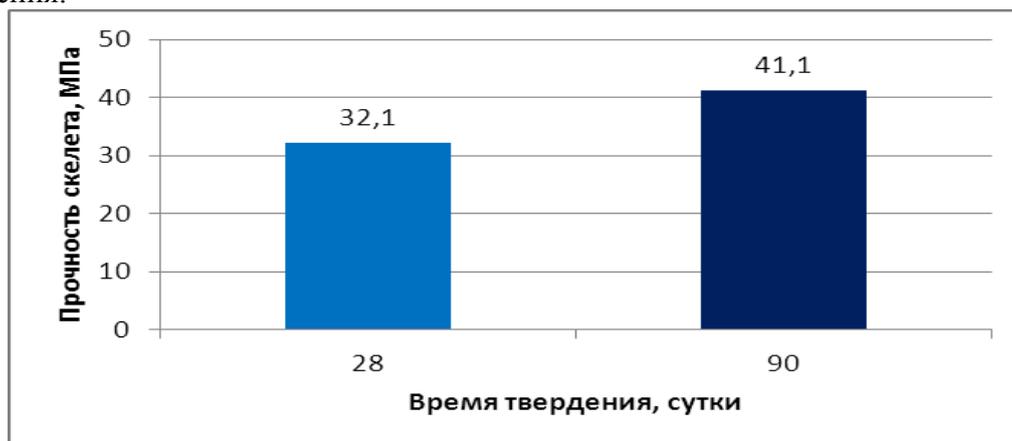


Рис.9. Зависимость прочности скелета от продолжительности твердения
Fig.9. Dependence of the strength of the skeleton on the duration of hardening
- температура твердения: 5 °С а = -8,296; 20 °С а = -4,052; 35 °С а = -7,45

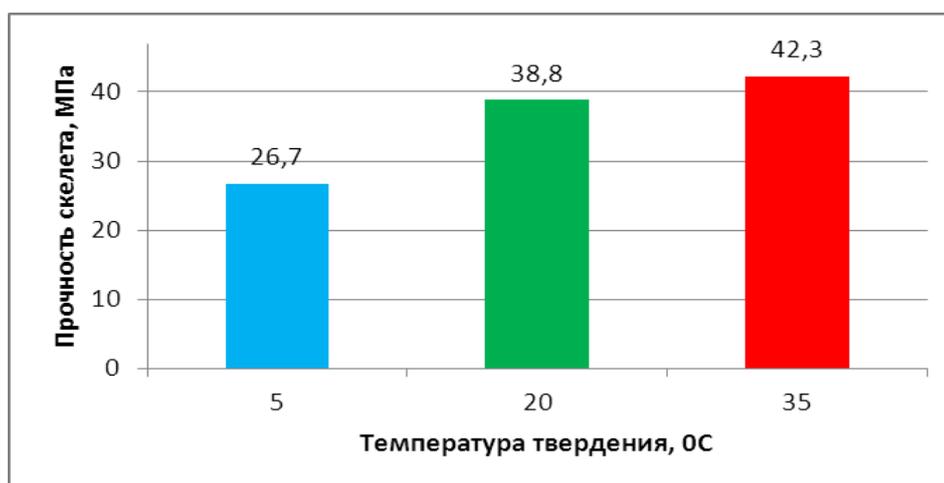


Рис.10. Зависимость прочности скелета от температуры твердения
Fig.10. Dependence of the strength of the skeleton on the hardening temperature

Таким образом, путем введения корректирующих коэффициентов в зависимости от вида добавки/ условий твердения можно рассчитать состав бетонной смеси для получения заданной прочности.

Вывод:

1. Увеличение количества газообразующей добавки от 0,13 до 0,44% от массы Ц, при дозировке СП от 0,14 до 0,86% в зависимости от вида СП значение коэффициента эффективности газовыделения может изменяться до 8 раз (!), от 39,4 до 311%.

2. Увеличение количества газообразующей добавки от 0,13 до 0,44% от массы Ц, при дозировке СП от 0,14 до 0,86%, в зависимости от модуля крупности заполнителя в пределах от 1,2 до 2,8 при соотношении П/Ц от 0 до 2,4, величины В/Ц от 0,37 до 0,42 увеличение объема мелкозернистой бетонной смеси на первой стадии расширения изменяется в пределах от 6 до 64%. Значение коэффициента эффективности расширения смеси изменяется на порядок (! от 0,09 до 0,94).

3. Уточнена зависимость относительного увеличения объема бетонной смеси на первой стадии расширения от концентрации заполнителя и увеличения объема цементного те-

ста. При концентрации заполнителя в пределах 0,4-0,6 увеличение объема бетонной смеси составляет 0,6 – 0,18 от увеличения объема цементного теста.

4. В зависимости от величины коэффициента стесненности при оптимальных значениях рецептурных факторов возможно повышение относительной прочности до 18%.

5. Учитывая коэффициент условий твердения возможно определить благоприятные условия выдерживания бетона для инъектирования с двухстадийным расширением.

6. Путем введения корректирующих коэффициентов в зависимости от вида добавки/ условий твердения можно рассчитать состав бетонной смеси для получения заданной прочности.

Библиографический список:

1. Давидюк А.Н., Несветаев Г.В. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня // Строительные материалы. 2010. - № 1. С. 44-46

2. Демьянова В.С., Калашников В.И., Ильина И.Е. Сравнительная оценка влияния отечественных и зарубежных суперпластификаторов на свойства цементных композиций // Строительные материалы. 2002. - №9. С. 4-6

3. К вопросу оценки блокирующей функции суперпластификаторов на кинетику твердения цементов / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, А.С. Мишин, Ю.С. Кузнецов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции: Композиционные строительные материалы. Теория и практика. – Пенза, 2002. С. 54-60

4. Калашников В.И., Демьянова В.С., Борисов А.А. Классификационная оценка цементов в присутствии суперпластификаторов для высокопрочных бетонов // Известия вузов. Строительство. 1999.- № 1. С. 39-42

5. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня из пластифицированных и непластифицированных композиций / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Е.Ю. Селиванова, А.С. Мишин, А.П. Кандауров // Современные проблемы строительного материаловедения: Седьмые академические чтения РААСН. ч. 1. – Белгород, 2001. С. 171 – 179

6. Контракция портландцемента в присутствии суперпластификаторов и минеральных модификаторов / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардумян, Та Ван Фан, Л.А. Хомич, А.М. Блягоз // Новые технологии. - Майкоп: ФГБОУ ВПО «МГТУ», вып. 4. 2012. С. 125-128

7. Несветаев Г.В. Оценка эффективности суперпластификаторов: Дни современного бетона/ Мат-лы 11 межд. науч.-практ. конф. / ООО «Будиндустрия ЛТД», Запорожье, 2012. С. 19-27

8. Несветаев Г.В., Виноградова Е.В. О влиянии суперпластификаторов и расширяющей добавки на тепловыделение портландцемента в ранний период твердения/ Наука, техника и технология XXI века: Мат-лы второй Всероссийской научно-технической конференции. Ч. 2. – Нальчик: КБГУ, 2005. С. 130 – 135

9. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Гиперпластификаторы «Melflux» для сухих строительных смесей и бетонов // Строительные материалы. 2010. - №3. С. 38 – 40

10. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Потапова Ю.И. О тепловыделении портландцемента в присутствии суперпластификаторов // Научное обозрение. 2014.- №8. С. 907-913

11. Несветаев Г.В., Тимонов С.А., Чмель Г.В. К оценке эффективности суперпластификаторов // Железобетон, строительные материалы и технологии в третьем тысячелетии. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2001. С.29-32

12. Оценка эффективности суперпластификаторов / Г.В. Несветаев, Г.В. Чмель, М.А. Ужахов, А.В. Жуков, Е.В. Виноградова, А.В. Налимова, Т.В. Тен // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы 3-й межд. конф. – Ростов-на-Дону, 2004. С.274 – 280

13. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны: Издательство АСВ, 2006. - 368с.

14. Батраков В.Г. Комплексные модификаторы свойств бетона // Бетон и железобетон. – 1977. - № 7. – С. 4-6

15. Каприелов С.С., Шеренфельд А.В., Батраков А.В., Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1996. - №6. С. 6-10
16. Несветаев Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах// Строительные материалы. 2006. - № 10. – С. 23-25
17. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава// Строительные материалы. – 2009. - № .5. – С. 54-57
18. Чмель Г.В. Модифицирование расширяющихся вяжущих веществ с целью управления собственными деформациями и прочность бетонов // Автореф. дис. канд. техн. наук./ Ростов-на-Дону, 2004. 20 с.
19. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Влияние нитрилотриметилфосфоновой кислоты на процессы структурообразования напрягающих цементов // Наукоедение. 2015. №. 5 (7).С. 1-17. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN515.pdf>, свободный. Загл. с экрана.
20. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Влияние условий твердения бетона с двухстадийным расширением на деформативно-прочностные показатели // Наукоедение. 2015. №. 5 (7).С. 1-15. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf>, свободный. Загл. с экрана.

References:

1. Davidyuk A.N., Nesvetaev G.V. Vliyanie nekotorykh giperplastifikatorov na poristost, vlazhnostnyye deformatsii i morozostoykost tsementnogo kamnya. Stroitelnyye materialy. 2010;1:44-46. [Davidyuk A.N., Nesvetaev G.V. Influence of some giperplasticizers on porosity, humidity deformation and frost resistance of a cement stone. Constructional materials. 2010;1:44-46. (In Russ.)]
2. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Ilyina I.E. Sravnitel'naya otsenka vliyaniya otechestvennykh i zarubezhnykh superplastifikatorov na svoystva tsementnykh kompozitsiy. Stroitelnyye materialy. 2002;9:4-6. [Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Ilyina I.E. Comparative evaluation of the impact of domestic and foreign superplasticizers on the properties of cement compositions. Constructional materials. 2010;1:44-46.(In Russ.)]
3. Demyanova V.S. Kalashnikov V.I. Mishin A.S., Kuznetsov Yu.S. K voprosu otsenki blokiryuyushchey funktsii superplastifikatorov na kinetiku tverdeniya tsementov. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Kompozitsionnye stroitelnyye materialy. Teoriya i praktika. Penza; 2002. 54-60. [Demyanova V.S. Kalashnikov V.I. Mishin A.S., Kuznetsov Yu.S. To the question of blocking the function of superplasticizers on the kinetics of hardening cement. Collection of scientific works of the International Scientific-Practical Conference: Composite building materials. Theory and practice. Penza; 2002. 54-60. (In Russ.)]
4. Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Borisov A.A. Klassifikatsionnaya otsenka tsementov v prisutstvii superplastifikatorov dlya vysokoprochnykh betonov. Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 1999;1: 39-42. [Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Borisov A.A. Classification assessment of cements in the presence of superplasticizer for high-strength concrete. News of Higher Institutions. Building. 1999;1: 39-42. (In Russ.)]
5. Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Selivanova E.Yu., Mishin A.S., Kandaurov A.P. Usadka i usadochnaya treshchinostoykost tsementnogo kamnya iz plastifitsirovannykh i neplastifitsirovannykh kompozitsiy. Sovremennyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya: Sedmye akademicheskie chteniya RAASN. Ch. 1. Belgorod; 2001. 171–179. [Kalashnikov V.I., Demyanova V.S., Selivanova E.Yu., Mishin A.S., Kandaurov A.P. Shrinkage and shrinkage crack of cement paste of plasticized and unplasticized compositions. Modern problems of building materials: Seventh academic reading RAASN. Pt.1. Belgorod; 2001. 171–179. (In Russ.)]
6. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S., Fan T.V., Khomich L.A., Blyagoz A.M. Kontraktsiya Portland tsementa v prisutstvii superplastifikatorov i mineralnykh modifikatorov. Novyye tekhnologii. Makop: FGBOU VPO "MGTU"; 2012;4:125-128. [Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S., Fan T.V., Khomich L.A., Blyagoz A.M. Contraction of Portland cement in the presence of superplasticizers and mineral modifiers. New Technologies. Maikop: MSTU; 2012;4:125-128. (In Russ.)]

7. Nesvetaev G.V. Otsenka effektivnosti superplastifikatorov: Dni sovremennogo betona. Mat-ly 11 mezhd. nauch.-prakt. konf. OOO "Budindustriya LTD". Zaporozhye; 2012. 19-27. [Nesvetaev G.V. Evaluating the effectiveness of superplasticizers: days of contemporary concrete. Proc. of 1 Int. Scientific-Practical. Conf. LLC Budindustriya Ltd. Zaporozhye; 2012. 19-27. (In Russ.)]

8. Nesvetaev G.V., Vinogradova E.V. O vliyaniy superplastifikatorov i rasshiryayushchey dobavki na teplovydelenie portlandtsementa v ranniy period tverdeniya. Nauka, tekhnika i tekhnologiya KhKhI veka: Mat-ly vtoroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch. 2. Nalchik: KBGU; 2005. 130-135. [Nesvetaev G.V., Vinogradova E.V. On the influence of superplasticizers and expanding additives on heat Portland cement in the early period of hardening. Science, technology and the technology of the XXI century: Materials of the Second All-Russian Scientific and Technical Conference. Pt. 2. Nalchik: KBSU; 2005. 130-135. (In Russ.)]

9. Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N. Giperplastifikatory "Melflux" dlya sukhikh stroitelnykh smesey i betonov. Stroitelnyye materialy. 2010;3:38–40. [Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N. Giperplasticizers "Melflux" for dry building mixes and concrete. Construction materials. 2010;3:38–40. (In Russ.)]

10. Nesvetaev G.V., Korchagin I.V., Potapova Yu.I. O teplovydelenii portlandtsementa v prisutstvii superplastifikatorov. Nauchnoye obozrenie. 2014;8:907-913. [Nesvetaev G.V., Korchagin I.V., Potapova Yu.I. On the heat dissipation of Portland cement in the presence of superplasticizers. Scientific Review. 2014;8:907-913. (In Russ.)]

11. Nesvetaev G.V., Timonov S.A., Chmel G.V. K otsenke effektivnosti superplastifikatorov. Zhelezobeton, stroitelnyye materialy i tekhnologii v tretyem tysyacheletii. Rostov-na-Donu: RGSU; 2001. 29-32. [Nesvetaev G.V., Timonov S.A., Chmel G.V. To the assessment of effectiveness of superplasticizers. Reinforced concrete, building materials and technology in the third millennium. Rostov-on-Don: RSUCI; 2001, 29-32 (In Russ.)]

12. Nesvetaev G.V., Chmel G.V., Uzhakhov M.A., Zhukov A.V., Vinogradova E.V., Nalimova A.V., Ten T.V. Otsenka effektivnosti superplastifikatorov. Beton i zhelezobeton v tretyem tysyacheletii: Materialy 3-y mezhd. konf. Rostov-na-Donu; 2004. 274–280. [Nesvetaev G.V., Chmel G.V., Uzhakhov M.A., Zhukov A.V., Vinogradova E.V., Nalimova A.V., Ten T.V. Evaluating the effectiveness of superplasticizers. Concrete and reinforced concrete in the third millennium: Proceedings of the 3rd Int. Conf. Rostov-on-Don; 2004. 274-280 (In Russ.)]

13. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony. Izdatelstvo ASV; 2006. 368 s. [Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete. ASV Publ.; 2006. 368 p. (In Russ.)]

14. Batrakov V.G. Kompleksnyye modifikatory svoystv betona. Beton i zhelezobeton. 1977;7:4-6. [Batrakov V.G. Complex modifiers of concrete properties. Concrete and reinforced concrete. 1977;7:4-6. (In Russ.)]

15. Kaprielov S.S., Sherenfeld A.V., Batrakov A.V. Modifitsirovannyye betony novogo pokoleniya: realnost i perspektiva. Beton i zhelezobeton. 1996;6:6-10. [Kaprielov S.S., Sherenfeld A.V., Batrakov A.V. Modified concretes new generation: reality and prospects. Concrete and reinforced concrete. 1996;6:6-10. (In Russ.)]

16. Nesvetaev G.V. Effektivnost primeneniya superplastifikatorov v betonakh. Stroitelnyye materialy. 2006;10:23-25. [Nesvetaev G.V. The effectiveness of superplasticizers in concrete. Construction materials. 2006;10:23-25. (In Russ.)]

17. Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N. Samouplotnyayushchiesya betony: prochnost i proektirovanie sostava. Stroitelnyye materialy. 2009;5:54-57. [Nesvetaev G.V., Davidyuk A.N. The self-consolidating concrete: durability and design of structure. Construction materials. 2009;5:54-57. (In Russ.)]

18. Chmel G.V. Modifitsirovanie rasshiryayushchikhsya vyazhushchikh veshchestv s tselyu upravleniya sobstvennymi deformatsiyami i prochnost betonov. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.

Rostov-na-Donu, 2004. 20 s. [Chmel G.V. Modifying expanding binders to manage their own deformations and strength of concrete. Abstract of PhD thesis. Rostov-on-Don; 2004. 20 p. (In Russ.)]

19. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Vliyanie nitrilotrimetilfosfonovoy kisloty na protsessy strukturoobrazovaniya napryagayushchikh tsementov. *Naukovedenie*. 2015;5(7):1-17. [Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Influence nitrilotrimetilfosfonic acid on structure formation processes straining cements. *Science studies*. 2015;5(7):1-17. (In Russ.)]. Available from: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN515.pdf>, svobodnyy. Zagl. s ekrana.

20. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Vliyanie usloviy tverdeniya betona s dvukhstadiynym rasshireniem na deformativno-prochnostnye pokazateli. *Naukovedenie*. 2015;5(7):1-15. [Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Influence of conditions of concrete hardening with a two-stage expansion on deformability and strength indicators. *Science studies*. 2015;5(7):1-15. (In Russ.)]. Available from: <http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf>

Сведения об авторах

Несветаев Григорий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, академия строительства и архитектуры.

Жильникова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства, академия строительства и архитектуры.

Корянова Юлия Игоревна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии строительного производства, академия строительства и архитектуры.

Information about the authors.

Grigory V. Nesvetaev – Dr. Sc.(Technical), Prof., Department technology of construction production, academy of civil engineering and architecture

Tatjana N. Zhilnikova – Cand. Sc.(Technical), Assoc.Prof., Department technology of construction production, academy of civil engineering and architecture.

Yulia I. Koryanova - Cand. Sc.(Technical), Senior lecturer, Department technology of construction production, academy of civil engineering and architecture

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 25.09.2016.

Принята в печать 29.11.2016.

Conflict of interest

Received 25.09.2016.

Accepted for publication 29.11.2016.

Для цитирования: Атуева Э.Б., Исалова М.Н., Шабанова М.М. Повышение эффективности функционирования коммунального хозяйства на основе использования механизмов муниципально-частного партнерства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):167-174. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-167-174

For citation: Atueva E.B., Isalova M.N., Shabanova M.M. Increasing the functional effectiveness of municipal service systems through municipal-private partnership mechanisms. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43 (4): 167-174. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-167-174

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 65.44

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-167-174

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ МУНИЦИПАЛЬНО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА

Атуева Э.Б.¹, Исалова М.Н.², Шабанова М.М.³

¹⁻³ Дагестанский государственный технический университет,
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,

¹e-mail:enara555@yandex.ru, ²e-mail:is-mar@mail.ru, ³e-mail:madinash@inbox.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является поиск методов повышения эффективности функционирования коммунального хозяйства, поскольку вопрос развития коммунального хозяйства сегодня стоит на повестке дня многих муниципальных образований современной России. Причиной этому является значительная изношенность инженерной инфраструктуры. В условиях ограниченности средств бюджета неизбежно встает вопрос о том, как эффективнее расходовать имеющиеся средства и при этом решить возникающие проблемы городской инфраструктуры. **Метод.** Использован механизм муниципально-частного партнерства, способствующий существенным образом снижению нагрузки на муниципальный бюджет. В основу выбора модели муниципально-частного партнерства рекомендован метод парных сравнений альтернативных моделей. Альтернативные модели муниципально-частного партнерства ранжируются в порядке их предпочтительности по совокупности заданных критериев сравнения. **Результат.** Приведены результаты анализа развития коммунального хозяйства в городе Махачкала. Обоснована необходимость развития муниципально-частного партнерства в сфере коммунального хозяйства города. Предложена структурно-логическая модель муниципально-частного партнерства в коммунальной сфере города с закреплением за каждым из участников муниципально-частного партнерства конкретных функций. **Вывод.** Доказано, что муниципально-частное партнерство выступает как форма оптимизации исполнения муниципальными органами власти своих функций по бесперебойному обеспечению населения города качественными жилищно-коммунальными услугами и созданию благоприятной городской среды. Использование предложенной методики позволит оценить альтернативные модели и выбрать наиболее оптимальную модель муниципально-частного партнерства для реализации конкретного проекта в сфере коммунального хозяйства города.

Ключевые слова: коммунальное хозяйство, муниципально-частное партнерство, структурно-логическая модель, модели муниципально-частного партнерства

ECONOMIC SCIENCE

INCREASING THE FUNCTIONAL EFFECTIVENESS OF MUNICIPAL SERVICE SYSTEMS THROUGH MUNICIPAL-PRIVATE PARTNERSHIP MECHANISMS

*Enara B. Atueva*¹, *Marzhanat N. Isalova*², *Madina M. Shabanova*³.

¹⁻³Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

¹e-mail:enara555@yandex.ru, ²e-mail:is-mar@mail.ru, ³e-mail:madinash@inbox.ru

Abstract: Objectives. Due to the issue of public utility development becoming a key concern for many Russian municipalities, this study aims to evaluate methods for increasing the efficiency of municipal services. The reason for this is the severe dilapidation of the physical infrastructure. Given the limited budget, the question inevitably arises as to how to most effectively spend the funds available and at the same time solve emerging urban infrastructure problems. **Method.** Use of the municipal-private partnership mechanism can significantly reduce the burden on the municipal budget. The method of paired comparisons of alternative models is recommended on the basis of the choice of the municipal-private partnership model. Alternative models of municipal-private partnership are ranked in preference against a plurality of predetermined comparison criteria. **Results.** The results of an analysis of the development of municipal services in the city of Makhachkala are presented. The necessity for municipal-private partnerships to be developed in the area of urban public utilities is substantiated. A structural-logical model of municipal-private partnership in the communal area of the city is proposed with the concrete functions assigned to each of the members of the municipal-private partnership. **Conclusion.** It is demonstrated that municipal-private partnerships serve as a means of optimising the performance of municipal functions with respect to the seamless provision of quality housing and communal services to the city's population and creation of a favourable urban environment. Use of the proposed method allows alternative models to be evaluated and the optimal model of municipal-private partnership selected for the implementation of a specific project in the area of urban public utilities.

Keywords: municipal utilities, municipal-private partnership, structural and logical model, municipal-private partnership model

Введение. Муниципальное образование призвано обеспечить населению комфортную и безопасную среду обитания, предусматривающую, в том числе: нормативное качество жилищно-коммунальных услуг и надежность систем коммунальной инфраструктуры, оптимизацию затрат на производство коммунальных ресурсов и затрат по эксплуатации жилищного фонда, использование инновационных возможностей предоставления коммунальных услуг.

Постановка задачи. Учитывая высокую социальную значимость коммунального хозяйства, в настоящее время многократно возрастает необходимость обеспечения эффективного воспроизводственного процесса в этой сфере. Но на сегодняшний день, несмотря на все реформы, проводимые в этой отрасли, остаются нерешенными следующие проблемы в развитии этой сферы. К наиболее важным из них относятся: прогрессирующий износ инженерной инфраструктуры; низкое качество предоставляемых коммунальных услуг; рост тарифов на оплату коммунальных услуг; высокий уровень задолженности предприятий коммунального хозяйства перед поставщиками электроэнергии и тепла; низкий уровень инвестиционной привлекательности сферы коммунального хозяйства.

Все эти проблемы в полной мере можно отнести и к г. Махачкале. В муниципальном образовании «город Махачкала» очень высок уровень износа объектов коммунальной инфраструктуры, что сохраняет возможность чрезвычайных ситуаций в жилищной сфере. Так, в 2014 году он составлял в сфере водоснабжения и водоотведения - более 70 %; в сфере га-

зоснабжения - до 65 %; в сфере производства и распределения тепловой энергии и горячей воды - порядка 70–80% [8].

Высокий уровень изношенности инженерной инфраструктуры приводит к существенным потерям в сетях. В Махачкале этот показатель составляет 12%, в то время как среднероссийский показатель равен 9% [10].

Общая протяженность сетей водоснабжения в городе составляет 1752,7 км, в том числе сеть уличной водопроводной сети - 494200 м. На сегодняшний день нуждается в замене 211800 м. Износ инженерных коммуникаций приводит к проблемам с обеспечением водой населения города и ее качеством.

Усугубляет ситуацию и то, что водопроводные очистные сооружения города были запущены более 50 лет назад. За весь этот период капитальный ремонт на них не производился, что привело к многократному уменьшению пропускной способности водопроводных очистных сооружений города, и на сегодняшний день эта цифра составляет всего 68,5 тыс. куб. м/сут., что соответствовало потребности города на момент строительства действующих очистных сооружений [8,10].

Изношенная система коммунальной инфраструктуры г. Махачкалы не позволяет обеспечить должный уровень качества коммунальных услуг, предоставляемых потребителям. Кроме того, это приводит к сверхнормативным потерям в сетях, снижению коэффициента полезного действия теплоэнергетического оборудования, повышению риска возникновения аварийных ситуаций. Аналогичная картина наблюдается и в состоянии улично-дорожной сети г. Махачкалы, которая большей частью не соответствует социальным и экономическим потребностям населения, а главное, и не соответствует уровню столицы субъекта Российской Федерации. Большое влияние на состояние улично-дорожной сети оказывает отсутствие продольных и поперечных уклонов на отдельных улицах, что приводит к образованию застоев воды.

К серьезным проблемам с жизнеобеспечением города можно отнести и нерешенность вопросов водоотведения, и необходимость модернизации канализационной системы, и утилизацию бытовых отходов. До сих пор большинство улиц города не оснащены ливневой канализацией, но даже и в имеющейся ливневой канализации не предусмотрена очистка сточных вод. В этой связи, крайне остро стоит проблема завершения строительства канализационного тоннеля от Махачкалы до Каспия, увеличения мощности очистных сооружений, что позволит снизить риск загрязнения побережья и акватории Каспийского моря.

Минимальная необходимость в средствах на строительство, частичное восстановление и модернизацию объектов коммунальной инфраструктуры и уличных дорожных сетей города на 2016 г. составляет 1979, 8 млн. рублей [8]. Такой объем средств не может быть обеспечен только за счет бюджетных инвестиций.

Именно поэтому, требуется создание условий для привлечения средств внебюджетных источников на основе использования механизмов муниципально-частного партнерства (МЧП), что позволит существенно снизить нагрузку на муниципальный бюджет, применить наиболее передовые и современные технологии при строительстве, реконструкции и эксплуатации объектов коммунальной инфраструктуры.

Методы исследования. О необходимости использования механизмов муниципально-частного партнерства указано и в Концепции федеральной целевой программы «Комплексная программа модернизации и реформирования жилищно-коммунального хозяйства на 2010–2020 годы», где в качестве одного из приоритетных направлений развития отрасли предусмотрено развитие системы управления имуществом комплексом коммунальной сферы с использованием концессионных соглашений и иных механизмов государственно-частного партнерства [7].

В отраслях коммунальной сферы, особенностью которых является наличие естественных локальных монополий, осуществляется специальное правовое регулирование привлечения инвестиций. Так, Федеральным законом от 30.12.2004 г. № 210-ФЗ «Об основах

регулирования тарифов организаций коммунального комплекса» определяется общий порядок разработки и утверждения инвестиционных программ организаций коммунального комплекса [3]. Порядок разработки и утверждения инвестиционных программ систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения регулируется Федеральным законом от 07.12.2011 г. № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [4], систем теплоснабжения - Федеральный закон от 27.07.2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении» [5].

Также в соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» могут разрабатываться муниципальные программы повышения энергетической эффективности с привлечением внебюджетных источников финансирования [6].

В ходе исследования установлено, что организационно-правовой формой муниципально-частного партнерства в коммунальном хозяйстве города может быть акционерное общество. Его учредителями должны выступить администрация города и частные компании, специализирующиеся на реконструкции и модернизации инженерно-коммунальной инфраструктуры. На рис.1 представлена структурно-логическая модель МЧП в коммунальной сфере г. Махачкала.

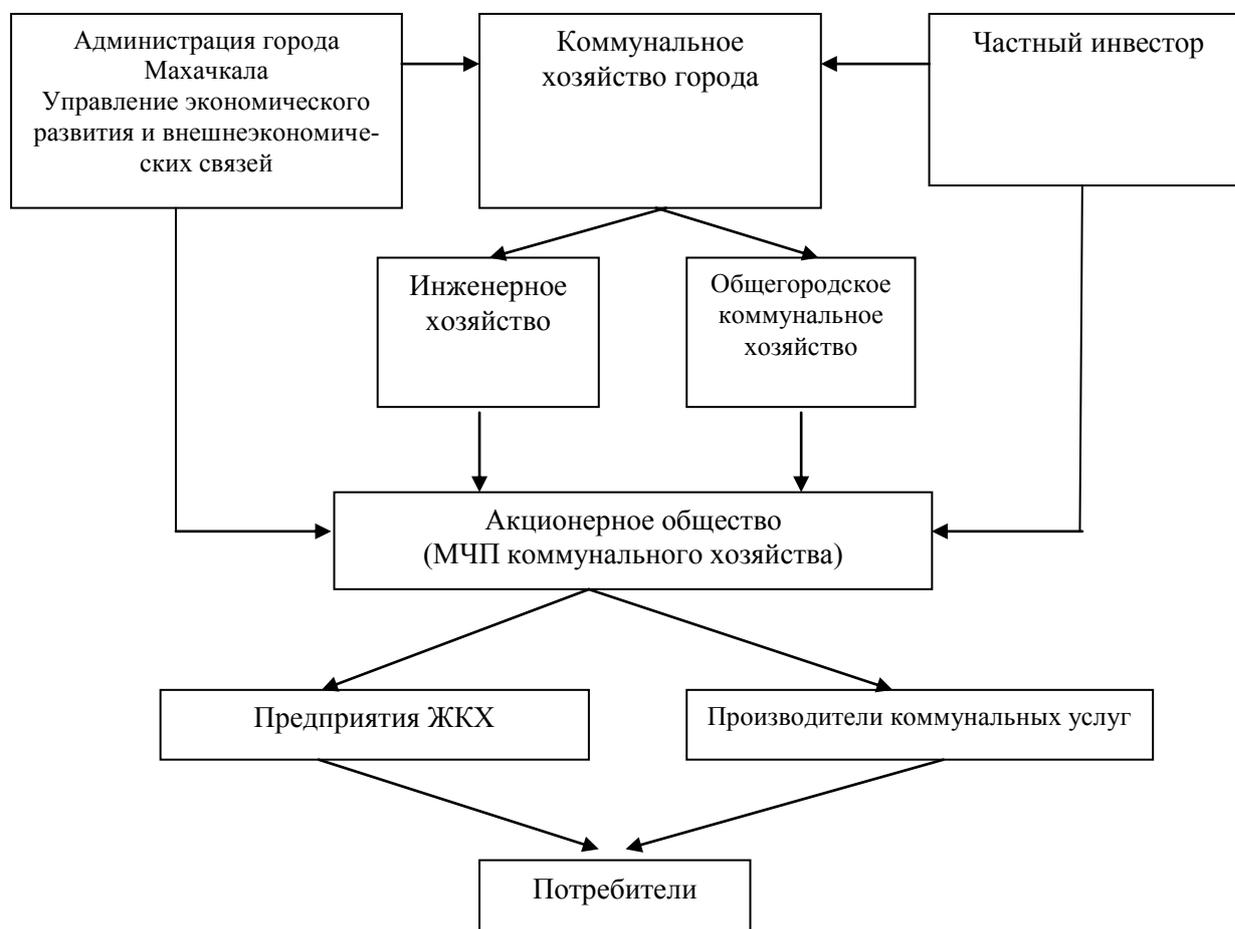


Рис. 1. Структурно-логическая модель муниципально-частного партнерства в г. Махачкала

Fig. 1. Structural and logical model of municipal-private partnership in Makhachkala

Согласно представленной модели за каждым из участников МЧП должны быть закреплены определенные функции:

- администрация города формирует нормативно-правовую базу для деятельности МЧП, обеспечивает предоставление земельных участков и объектов инфраструктуры, (если

речь идет о реконструкции), административную поддержку реализуемых проектов, частичное финансирование или предоставление гарантий;

- частные инвесторы участвуют в конкурсе на право заключения договора о муниципально-частном партнерстве на предмет оказания качественных жилищно-коммунальных услуг, реконструкции или капитальному ремонту имеющейся коммунальной сети;
- предприятия жилищно-коммунального хозяйства и производители коммунальных услуг являются непосредственным исполнителем бесперебойного снабжения населения качественными услугами.

В целях реализации конкретных проектов в водоснабжении, водоотведении, тепло-снабжении, электроснабжении в рамках действующих программ комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры администрация города направляют частному инвестору предложения по наиболее крупным проектам (например, строительство очистных сооружений, реконструкция станции водоснабжения, утилизация бытовых отходов и т.д.).

Совместно с частным инвестором принимается решение о выборе модели муниципально-частного партнерства. В сфере коммунального хозяйства, наиболее часто применяемые модели – это аренда, концессионное соглашение, создание закрытых паевых инвестиционных фондов недвижимости [1,2,9,12,13].

Для принятия решения по каждому проекту и выбору модели муниципально-частного партнерства можно воспользоваться методом парных сравнений альтернативных моделей [2]. Сравнивая попарно модели муниципально-частного партнерства по различным критериям: риск, прибыльность, стоимость проекта и т.д. формируется матрица парных сравнений $A = (a_{ij})$, элементами которой a_{ij} является уровень преимущества альтернативы u_i над u_j , определяемый по шкале Саати (таблица 1):

Таблица 1. Матрица парных сравнений

Table 1. Matrix of paired comparisons

	Риск	Прибыльность	Стоимость проекта	Удельный вес критерия
Риск	1	3	5	0,637
Прибыльность	1/3	1	3	0,258
Стоимость проекта	1/5	1/3	1	0,105

- 1 – если отсутствует преимущество элемента u_i над u_j ;
- 3 – если имеется слабое преимущество u_i над u_j ;
- 5 – если имеется существенное преимущество u_i над u_j ;
- 7 – если имеется явное преимущество u_i над u_j ;
- 9 – если имеется абсолютное преимущество u_i над u_j ;
- 2, 4, 6, 8 – промежуточные сравнительные оценки.

Альтернативные модели МЧП ранжируются в порядке их предпочтительности по совокупности заданных критериев сравнения [17,18].

Для того, чтобы определить веса предпочтительности выбора альтернативной модели, следует найти максимальное собственное значение матрицы A – и соответствующий ему собственный вектор $w = (w_1, \dots, w_n)$, т.е. такой ненулевой вектор w для L , при котором выполняется равенство: $A_w = L_w$.

Но при этом, прежде чем произвольно составленную матрицу парных сравнений использовать для вычисления вектора $w = (w_1, \dots, w_n)$, необходимо убедиться в ее согласованности. Матрица A является согласованной, если $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$; $i, j, k = 1 \dots n$.

Для этого необходимо сравнить индекс согласованности:

$$I_c = \frac{L_{max} - n}{n-1} \quad (1)$$

со случайным n индексом (СИ), который сгенерирован для матриц порядка от 1 до 15 на базе 100 случайных выборок. Матрица считается согласованной, если отношение данных величин меньше 0,15.

Обсуждение результатов. Алгоритм численного расчета вектора $w = (w_1, \dots, w_n)$ следующий. Для каждой строки матрицы A вычисляют произведение ее членов и берут из произведения корень степени n , получая вектор $a = (a_1, \dots, a_n)$.

Элементы вектора $a = (a_1, \dots, a_n)$ нормируют так, чтобы сумма его элементов была равна единице, то есть формируют нормированный вектор $s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$. С этой целью элементы вектора $a = (a_1, \dots, a_n)$, полученные как среднее геометрическое, делят на сумму средних геометрических.

Для каждого столбца j матрицы A составляют сумму его элементов b_j . Покоординатно перемножаются векторы b и s и суммируются полученные произведения. Полученная сумма есть L_{\max} . Рассчитывается индекс и отношение согласованности (ИС) и (ОС).

Если отношение согласованности $ОС < 0,15$, то составленная экспериментальная матрица парных сравнений приемлемо согласована, а вектор $s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$ есть вектор $w = (w_1, \dots, w_n)$ (приоритеты сравниваемых альтернатив) [11,14,15,16].

Вывод. Использование приведенной выше методики позволит оценить альтернативные модели и выбрать наиболее оптимальную модель муниципально-частного партнерства для реализации конкретного проекта в сфере коммунального хозяйства г. Махачкала.

Развитие муниципально-частного партнерства является одним из перспективных направлений решения проблем в сфере коммунального хозяйства города.

Муниципально-частное партнерство выступает как форма оптимизации исполнения муниципальными органами власти своих функций по бесперебойному обеспечению населения города качественными жилищно-коммунальными услугами и созданию благоприятной городской среды.

Библиографический список:

1. «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 224-ФЗ.
2. «О концессионных соглашениях». Федеральный Закон от 21.07.2005 г. №115.
3. «Об основах регулирования тарифов организаций коммунального комплекса». Федеральный закон от 30.12.2004 № 210-ФЗ.
4. «О водоснабжении и водоотведении». Федеральный закон от 07.12.2011 г. № 416-ФЗ.
5. «О теплоснабжении». Федеральный закон от 27.07.2010 г. № 190-ФЗ.
6. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности». Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ.
7. Концепция федеральной целевой программы «Комплексная программа модернизации и реформирования жилищно-коммунального хозяйства на 2010–2020 годы»: Распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2010 г. № 102-р.
8. Программа экономического и социального развития муниципального образования городской округ «город Махачкала» на 2016-2018 гг.: Постановление Главы города Махачкалы от 24 декабря 2015 г. № 5031.
9. Агитаев Е. Развитие государственно-частного партнерства в ЖКХ Российской Федерации // Социальная политика и социальное партнерство. – 2011. – № 3. – С. 43–56.
10. Атуева Э.Б., Дусилаева Х.М., Шабанова М.М. Приоритетные направления развития жилищно-коммунального хозяйства//Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2015. - № 38. – С. 141-147.
11. Илларионов М.Г. Применение метода анализа иерархий в принятии управленческих решений //Институт экономики, управления и права: сайт. – URL: <http://www.ieml.ru/economproblem/2009/1/x3.html>

12. Лихачев В., Илларионов В., Лебедева. - М.: Российские механизмы государственно-частного партнерства // Издания Совета Федерации. URL: <http://www.council.gov.ru/journalsf/cat3/journal12/2009/number308.html>.
13. Сутягина Н.И. Модели государственно-частного партнерства в жилищно-коммунальной сфере // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, № 2 (1), с. 254–261.
14. Eleonora Patacchini. Giuseppe Venanzoni. Peer effects in the demand for housing quality. *Journal of Urban Economics*, September 2014, volume 83, pp. 6-17.
15. Hideo Konishi. Entrepreneurial land developers: Joint production, local externalities, and mixed housing developments. *Journal of Urban Economics*, May 2013, volume 75, pp. 68-793.
16. Soo Mi Jang, Hye Sun Bang and Sunju Sohn. A Mixed Methodological Study of Integrated Case Management: Improving Partnership between Public and Private Sectors *Indian Journal of Science and Technology*, vol 8(S7), 339–344, April 2015*
17. Hills J.; Hubert F.; Tomann H.; Whitehed C. Shifting Subsidy from Bricks and Mortar to People // Experiences in Britain and West Germany, *Housing Studies*. 1990 №5(3). PP. 147-167 161.
18. Hubert F. Zur Reform des Wohngeldes, *Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. 1996. № 116(4). PP. 631-654 162.

References:

1. «О государственном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 224-ФЗ [«On public-private partnerships (PPPs) and municipal-private partnerships (MPPs) in the Russian Federation and the introduction of amendments to certain legislative acts of the Russian Federation». Federal Law of 13 July, 2015, No 224-FL. (In Russ.)]
2. «О концессионных соглашениях». Федеральный закон от 21.07.2005 г. №115. [«On concession agreements». Federal law of 21.07.2005, No 115. (In Russ.)]
3. «Об основах регулирования тарифов организаций коммунального комплекса». Федеральный закон от 30.12.2004 № 210-ФЗ. [«On Fundamentals tariff regulation organizations municipal complex». The general order of development and approval of investing programs of the organizations of a municipal complex is determined. Federal Law of 30.12.2004, No 210-FL. (In Russ.)]
4. «О водоснабжении и водоотведении». Федеральный закон от 07.12.2011 г. № 416-ФЗ. [«On water supply and wastewater disposal». Federal Law of 07.12.2011, No 426-FL. (In Russ.)]
5. «О теплоснабжении». Федеральный закон от 27.07.2010 г. № 190-ФЗ. [«On heat supply». Federal Law of 27.07.2010, No 190-FL. (In Russ.)]
6. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ. [«On energy conservation and increasing energy efficiency». Federal Law of 23.11.2009, No 261-FL. (In Russ.)]
7. Концепция федеральной целевой программы «Комплексная программа модернизации и реформирования жилищно-коммунального хозяйства на 2010–2020 годы»: Распоряжение Правительства РФ от 2 февраля 2010 г. № 102-р. [Concept of the Federal target program «Complex program of modernization and reformation of the housing and utility for 2010-2020»: Government Order of the RF of 2 February 2010 No 102-p (In Russ.)]
8. Программа экономического и социального развития муниципального образования городской округ «город Махачкала» на 2016-2018 гг.: Постановление Главы города Махачкалы от 24 декабря 2015 г. № 5031. [Program of economic and social development of the urban municipality «Makhachkala» for 2016-2018. The resolution of the Head of Makhachkala of December 24, 2015, No 5031. (In Russ.)]

9. Agitayev E. Razvitiye gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v ZhKKh Rossiyskoy Federatsii. Sotsialnaya politika i sotsialnoye partnerstvo. 2011;3:43–56. [Agitayev E. Development of the state-municipal partnership in housing and utility sector of the Russian Federation. Social politics and social partnership. 2011;3:43–56. (In Russ.)]
10. Atueva E.B., Dusilaeva Kh.M., Shabanova M.M. Prioritetnyye napravleniya razvitiya zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015;38:141-147. [Atueva E.B., Dusilaeva Kh.M., Shabanova M.M. Priority directions for the development of housing and utility sector. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;38:141-147.(In Russ.)]
11. Illarionov M.G. Primenenie metoda analiza ierarkhiy v prinyatii upravlencheskikh resheniy. Institut ekonomiki, upravleniya i prava: sayt. [Illarionov M.G. Implementation of the hierarchy analysis method in managerial decision-making (In Russ.)]. Available from: <http://www.ieml.ru/economproblem/2009/1/x3.html>
12. Likhachev V., Illarionov V., Lebedeva M. Rossiyskie mekhanizmy gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Izdaniya Soveta Federatsii. [Likhachev V., Illarionov V., Lebedeva M. Russian mechanisms of state and private partnership. Publications of the Federation Council. (In Russ.)]. Available from: <http://www.council.gov.ru/journalsf/cat3/journal12/2009/number308.html>
13. Sutyagina N.I. Modeli gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v zhilishchno-kommunalnoy sfere. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2012;2(1):254–261. [Sutyagina N.I. Models of state and private partnership in the housing and utility sector. Herald of Lobachevsky Nizhny Novgorod University. 2012;2(1):254–261. (In Russ.)]
14. Patacchini E., Venanzoni G. Peer effects in the demand for housing quality. Journal of Urban Economics. September 2014;83:6-17.
15. Konishi H. Entrepreneurial land developers: Joint production, local externalities, and mixed housing developments. Journal of Urban Economics. May 2013;75:68-793.
16. Jang S.M., Bang H.S., Sohn S. A Mixed Methodological Study of Integrated Case Management: Improving Partnership between Public and Private Sectors. Indian Journal of Science and Technology. April 2015;8(S7):339–344.
17. Hills J., Hubert F., Tomann H., Whitehed C. Shifting Subsidy from Bricks and Mortar to People. Experiences in Britain and West Germany. Housing Studies. 1990;5(3):147-167.
18. Hubert F. Zur Reform des Wohngeldes. Zeitschrift fur Wirtschafts und Sozialwissenschaften. 1996;116(4):631-654.

Сведения об авторах.

Атуева Энара Бадурсултановна – кандидат экономических наук, доцент

Исалова Маржанат Нуруланевна – доктор экономических наук, профессор
заведующая кафедрой бухгалтерского учета

Шабанова Мадина Мухидиновна – доктор экономических наук, профессор
заведующая кафедрой государственного и муниципального управления

Information about the authors.

Enara B.Atueva– Cand. Sc. (Economic), Assoc.Prof.

Marzhanat N.Isalova – Dr. Sc. (Economic), Prof., Department of accounting.

Madina M.Shabanova – Dr. Sc. (Economic), Prof., Department of state and municipal management.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 16.09.2016.

Принята в печать 20.11.2016.

Conflict of interest

Received 16.09.2016.

Accepted for publication 20.11.2016.

Для цитирования: Байрамуков С.Х., Долаева З.Н., Каппушева М.Б. Динамическое планирование показателей оптимальности энергетической модернизации жилищного фонда. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):175-183. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-175-183

For citation: Bayramukov S.H., Dolaeva Z.N., Kappusheva M.B. Dynamic planning indicators for optimising the energy modernisation of residential housing stock. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4):175-183. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-175-183

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 528.2/3

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-175-183

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ЖИЛИЩНОГО ФОНДА

Байрамуков С.Х.¹, Долаева З.Н.², Каппушева М.Б.³

¹⁻³Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия,
369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36.

¹e-mail: salis_pochta@mail.ru, ²e-mail: dolaeva.zu@mail.ru, ³e-mail: kafedratspism@mail.ru

Резюме: *Цель.* В статье рассматривается проблема оптимизации энергетической модернизации жилищного фонда. **Методы.** Разработана математическая модель оптимизации процесса проведения энергетической модернизации с применением методов динамического программирования. **Результаты.** Предлагаемая методика комплексной оценки эффективности энергосберегающих мероприятий позволяет повысить качество принятия решений по восстановлению жилищного фонда, повышению его энергоэффективности; применение методов математического моделирования позволяет реализовать проект распределения финансовых средств таким образом, что реализация организационно-технологических решений последовательного выполнения мероприятий приведет к максимальному положительному социально-экономическому эффекту. Разработанная математическая модель позволяет максимизировать количество качественного жилья за счет реализации энергосберегающих и других мероприятий при модернизации жилищного фонда. Проанализирована проблема обновления жилищного фонда. Введено понятие энергетической модернизации жилищного фонда. Выделены основные энергосберегающие технологии в модернизации жилья. Приведена схема оптимального распределения средств на проведение энергосберегающих мероприятий. Предположено, что оптимальное решение получено независимо от числа шагов и исходного запаса вкладываемых средств. **Вывод.** Энергетическая модернизация жилищного фонда приводит к снижению затрат граждан на жилищно-коммунальные услуги, способствует повышению интегрального показателя комфортности. На основе приведенной схемы динамического планирования оптимального распределения средств на проведение энергосберегающих мероприятий реализована обобщенная методика оптимального управления жилищным фондом.

Ключевые слова: жилищный фонд, энергетическая модернизация энергоэффективность, оптимизация, динамическое программирование

ECONOMIC SCIENCE

DYNAMIC PLANNING INDICATORS FOR OPTIMISING THE ENERGY MODERNISATION OF RESIDENTIAL HOUSING STOCK

Salis K. Bayramukov¹, Zuriyat N. Dolaeva², Madina B. Kappusheva³

¹⁻³North-Caucasian State Humanitarian and Technological Academy,

36 Stavropolskaya Str., Cherkessk 369001, Russia

¹e-mail: salis_pochta@mail.ru, ²e-mail: dolaeva.zu@mail.ru, ³e-mail: kafedratspism@mail.ru

Abstract: Objectives. In the article, the problem of the optimisation of the energy modernisation of residential housing is examined. **Methods.** A mathematical model for the optimisation of energy use is developed with the use of dynamic programming techniques. **Results.** The proposed method of assessing the effectiveness of comprehensive energy-saving measures can improve the quality of decision-making on housing recovery and increase its energy modernisation. The application of mathematical modeling allows for the distribution of funds to projects so that the implementation of organisational and technological solutions consistently implement measures that will lead to optimal social and economic effects. The developed mathematical model also allows the amount of quality housing to be maximised through the implementation of energy-saving and other measures when upgrading the housing stock. Problems concerning the renovation of housing stock are analysed. The concept of housing energy modernisation is introduced. The principal energy-saving technologies in housing modernisation are distinguished. A schema for the optimal allocation of funds for energy-saving measures is described. It is assumed that the optimal solution is obtained independently of the number of steps and the initial supply of invested capital. **Conclusion.** The energy modernisation of the housing stock leads to a reduction in the expenditures of citizens on housing and utilities services, contributing to an increase in the integral index of comfort. A generalised method for optimal control of the housing stock is implemented on the basis of the provided schema for dynamic scheduling of the optimal distribution of funds for energy-saving measures.

Keywords: housing stock, energy efficiency modernisation, optimisation, dynamic programming

Введение. Развитие и обновление жилищной сферы непосредственно связано с социальной политикой страны, поэтому задача модернизации жилищного фонда является не только актуальной, но и имеет принципиальное значение для ее эффективной реализации [1, 2]. В настоящее время жилищная сфера требует особого внимания со стороны государства, которое должно регулировать процесс ее непрерывного развития.

Проблемы энерго- и ресурсосбережения в жилищной и коммунальной сфере регионов, оптимального процесса управления техническим состоянием жилищного фонда находятся в центре внимания таких исследователей, как В. Я. Мищенко, С.Г. Шеина, Л.Н.Чернышева, Е.Г. Гашо, Д. Вольфберг, Г.Асланян, Г.С. Иванова, В.В. Клименко, и др. Научно-методические основы исследования воспроизводственной политики в жилищной сфере широко отражены в работах С.А. Болотина, А.В. Афанасьева, К.А. Багриновского, О.Э. Бессоновой, А.П. Иванова, Ю.А. Куликова, В.Ф. Касьянова, А.Н. Кирилловой, Н.Б. Косарева, Ю.Н. Кулакова, М.С. Будникова, А.В. Гинзбурга, П.Г. Грабового, Б.В. Прыкина, В.М. Серова, С.Б. Сиваева, С.Р. Хачатряна А.А. Гусакова, Е.А. Гусаковой, Н.И. Ильина, В.Я. Любовного, С.В. Николаева, В.Я. Осташко, и др. [1-7].

В контексте проблемы исследования рассмотрим жилищную сферу как многокритериальную систему, развитие которой зависит от конечного множества факторов. Определение наиболее значимых факторов, влияющих на динамику изменения жилищного фонда, имеет основополагающее значение. Четкое определение этих взаимосвязей внутри рассмат-

риваемой системы ведет к адекватному учету и прогнозированию состояния жилищного фонда.

Постановка задачи. При исследовании вопроса проведения энергетической модернизации объектов жилой недвижимости важно дифференцировать и упорядочить, учитывая при этом экономические показатели, состав и структуру работ. Вместе с тем, постоянно повышается оплата за жилищно-коммунальные услуги, что определяет важность применения при модернизации энерго- и ресурсосберегающих технологий [3]. В связи с этим, оптимальное распределение денежных средств на проведение мероприятий приводит к максимальному положительному социально-экономическому эффекту.

Методы исследования. В решении проблем энергосбережения в жилищном фонде и оптимизации экономических показателей энергоэффективности метод динамического программирования (планирования), основанный американским математиком Р. Беллманом, применяется впервые [8]. Предложенный нами подход позволяет повысить положительный экономический эффект от реализации энергосберегающих мероприятий.

Под понятием энергетической модернизацией жилищного фонда примем проведение энергосберегающих мероприятий в процессе реализации ремонтно-строительных работ при его комплексном обновлении [4]. Заметим, что энергетическая модернизация предполагает внедрение различных видов энергосберегающих технологий в процесс эксплуатации жилищного фонда с целью повышения энергетической эффективности и экономической рентабельности конкретного проекта (рис. 1).

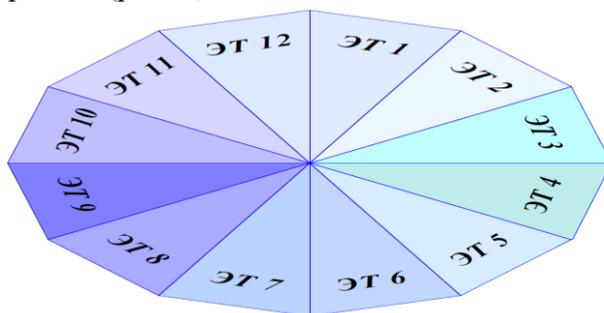


Рис.1. Система энергетической модернизации жилищного фонда
Fig.1. System of energy modernization of housing stock

Экономическая рентабельность мероприятий по энергосбережению напрямую связана с выбором организационно-технологических решений по модернизации жилья и объемом проводимых работ [5, 6].

Выделим следующие виды энергосберегающих мероприятий:

- установка штор из ПВХ-пленки в межрамное пространство окон (ЭТ №1);
- автоматизация освещения в местах общего пользования (ЭТ №2);
- организация автоматизированного теплового пункта (ЭТ №3);
- применение автоматических дверных доводчиков на входных дверях (ЭТ №4);
- применение автоматических сенсорных смесителей (ЭТ №5);
- улучшение теплозащитных свойств ограждающих конструкций здания (стен) (ЭТ №6);
- улучшение теплозащитных свойств кровли (ЭТ №7);
- утепление наружных дверей (ЭТ №8);
- использование датчиков движения (ЭТ №9);
- монтаж теплоотражающих конструкций за радиаторами отопления (ЭТ №10);
- теплоизоляция (восстановление теплоизоляции) внутренних трубопроводов систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) в неотапливаемых подвалах и чердаках (ЭТ №11);
- промывка трубопроводов системы отопления, снижение тепловых и гидравлических потерь за счет удаления внутренних отложений с поверхностей радиаторов и разводящих трубопроводов (ЭТ №12) [4, 7].

В ходе исследования предложено рассмотреть обобщенную задачу планирования работ по проведению энергетической модернизации с использованием двух видов энергосберегающих мероприятий I и II на период m лет.

Количество средств x , вложенное в мероприятие I, дает за один год доход

$$f(x) = A \cdot x \quad (1)$$

и за счет этого уменьшается до

$$\varphi(x) = A' \cdot x. \quad (2)$$

Количество средств y , вложенное в мероприятие II, дает за один год доход

$$g(y) = B \cdot y \quad (3)$$

и уменьшается до

$$\psi(y) = B' \cdot y. \quad (4)$$

Требуется произвести распределение ресурсов Z_0 между проведением мероприятий I и II на каждый год планируемого периода [8, 9].

Условное оптимальное управление x_m^* на последнем шаге (количество средств, выделенное в мероприятие I находится как значение x_m , при котором достигает максимума доход на последнем шаге:

$$W_m^*(Z_{m-1}) = \max_{0 \leq x_m \leq Z_{m-1}} \{w_m(Z_{m-1}, x_m)\},$$

где,

$$w_m(Z_{m-1}, x_m) = A \cdot x_m + B \cdot (Z_{m-1} - x_m) = (A - B) \cdot x_m + B \cdot Z_{m-1}, \quad A \neq B. \quad (5)$$

График функции $w_m = w_m(Z_{m-1}, x_m)$ в зависимости от аргумента x_m изображается при заданном Z_{m-1} некоторым графиком (рис.2).

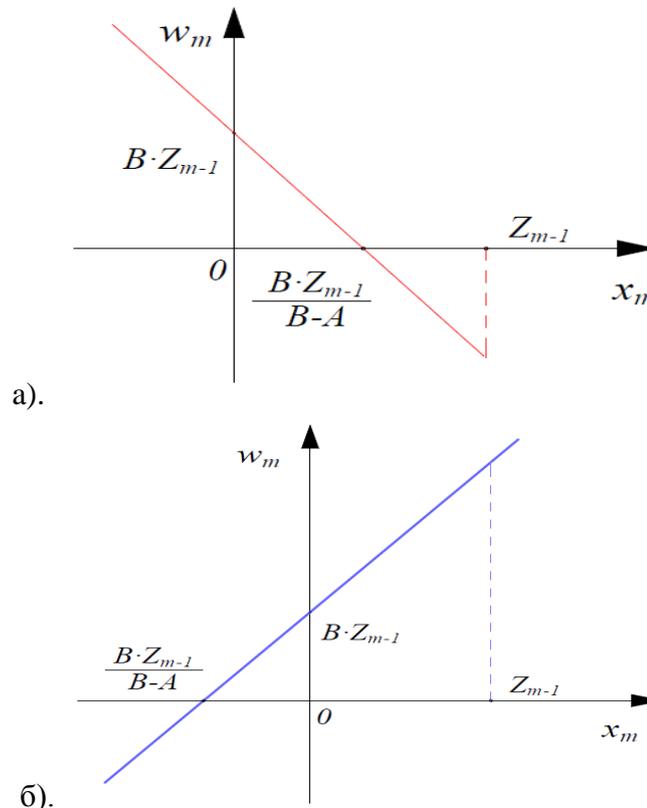


Рис.2. Графики функций $w_m = w_m(Z_{m-1}, x_m)$ а) при $B > A$; б) при $B < A$.

Fig.2. Graphs of functions a) for $B > A$; B) for $B < A$.

Максимальное значение может достигаться только на границах промежутка $(0, Z_{m-1})$. Чтобы определить, на какой именно границе, подставим в формулу (5) $x_m = 0$ и $x_m = Z_{m-1}$.

Исходя из представленных графиков, очевидно, что в случае убывающей функции максимальное значение $w_m = B \cdot Z_{m-1}$ при $x_m = 0$.

Во втором случае, при $x_m = Z_{m-1}$ достигается максимальное значение функции w_m , равное величине $A \cdot Z_{m-1}$ [10 - 12].

Следовательно, максимум дохода на последнем шаге не зависит от Z_{m-1} и ее значение зависит от величин A и B , а это значит, что в начале последнего года все имеющиеся средства нужно вкладывать в мероприятие I при $B < A$ или в мероприятие II при $B > A$.

Это и естественно, так как доход от выбранного мероприятия больше, а затраты средств нас уже не интересует (следующего шага не будет) [13-16].

При этом оптимальном управлении последний год принесет нам доход $w_m = B \cdot Z_{m-1}$ или $w_m = A \cdot Z_{m-1}$.

Перейдем к распределению средств на $(m-1)$ -й год.

Пусть мы подошли к нему с запасом средств Z_{m-2} [15].

Найдем условный максимальный доход за два последних года:

$$W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = \max_{0 \leq x_{m-1} \leq Z_{m-2}} \{A \cdot x_{m-1} + B \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1}) + W_m^*(Z_{m-1})\}$$

$$\text{Но } Z_{m-1} = A' \cdot x_{m-1} + B' \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1})$$

и, следовательно,

$$W_m^*(Z_{m-1}) = B \cdot (A' \cdot x_{m-1} + B' \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1})) \text{ или } W_m^*(Z_{m-1}) = A \cdot (A' \cdot x_{m-1} + B' \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1})).$$

Отсюда получим

$$W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = \max_{0 \leq x_{m-1} \leq Z_{m-2}} \{A \cdot x_{m-1} + B \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1}) + A \cdot (A' \cdot x_{m-1} + B' \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1}))\}$$

или $W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = \max_{0 \leq x_{m-1} \leq Z_{m-2}} \{A \cdot x_{m-1} + B \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1}) + B \cdot (A' \cdot x_{m-1} + B' \cdot (Z_{m-2} - x_{m-1}))\}.$

Выражение в фигурных скобках снова представляет собой полином первой степени относительно x_{m-1} , а его график – прямую линию; функция, исходя из полученных параметров, может быть возрастающей или убывающей (рис. 2.): $x_{m-1} = 0$ и $x_{m-1} = Z_{m-2}$ [9, 17, 18].

В первом случае (при $x_{m-1} = 0$) получим $W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = (B + A \cdot B') \cdot Z_{m-2}$

или $W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = (1 + B') \cdot B \cdot Z_{m-2}$;

во втором случае (при $x_{m-1} = Z_{m-2}$) $W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = (1 + A') \cdot A \cdot Z_{m-2}$

или $W_{m-1,m}^*(Z_{m-2}) = (A + A' \cdot B) \cdot Z_{m-2}$.

Откуда ясно, что максимум «дохода» зависит от значений величин: A, B, A', B' .

Перейдем к $(m-2)$ -му шагу. Здесь нужно максимизировать величину $W_{m-2,m-1,m}^*(Z_{m-3})$ по аналогичному принципу.

Таким образом, оптимальное управление будет найдено.

Заметим, что это решение будет получено независимо ни от числа шагов m , ни от исходного запаса средств Z_0 .

Допустим, что для проведения энергетической модернизации жилищного фонда выделяется объем денежных средств C , руб. Для проведения энергетической модернизации выделим 4 укрупнённых вида энергосберегающих технологий ($n=4$). Мероприятия, которые могут быть взаимозаменяемыми, рассматриваются отдельно.

В качестве наиболее важной информации для разработки модели и ее решения, выберем ряд свойств: виды мероприятий и их удельная стоимость; тарифы на оплату коммунальных услуг; энергетическая и экономическая эффективность. Также запланируем создание фонда резервных средств, которые будут использованы на проведение ремонтно-строительных работ, не предусматривающих энергосберегающие эффекты, такие как отделочные работы, работы по обновлению территории вокруг рассматриваемых объектов и другие работы. Накопление средств в создаваемый фонд будет идти в виде процента средств от экономического эффекта энергетической модернизации жилищного фонда.

Обсуждение результатов. На основе предложенного алгоритма и оптимизированного программного комплекса проведен численный эксперимент.

Предложенный алгоритм позволяет определить оптимальный вариант распределения средств. Входные данные для проведения расчета выбраны из нормативных документов, статистических данных о динамике изменения жилищного фонда Карачаево-Черкесской республики. Результаты расчетов приведены в виде диаграммы на рис. 3.

Из представленных в статье графиков (рис. 2 и 3), видно, что любой процесс энергетической модернизации, состоящей из разного количества и качества энергосберегающих мероприятий, можно на основе показателей суммы вложений, оптимизировать за счет распределения средств, приводящих к максимальному экономическому эффекту.

Схема оптимального распределения средств на проведение энергосберегающих мероприятий является эффективной и имеет ряд преимуществ.

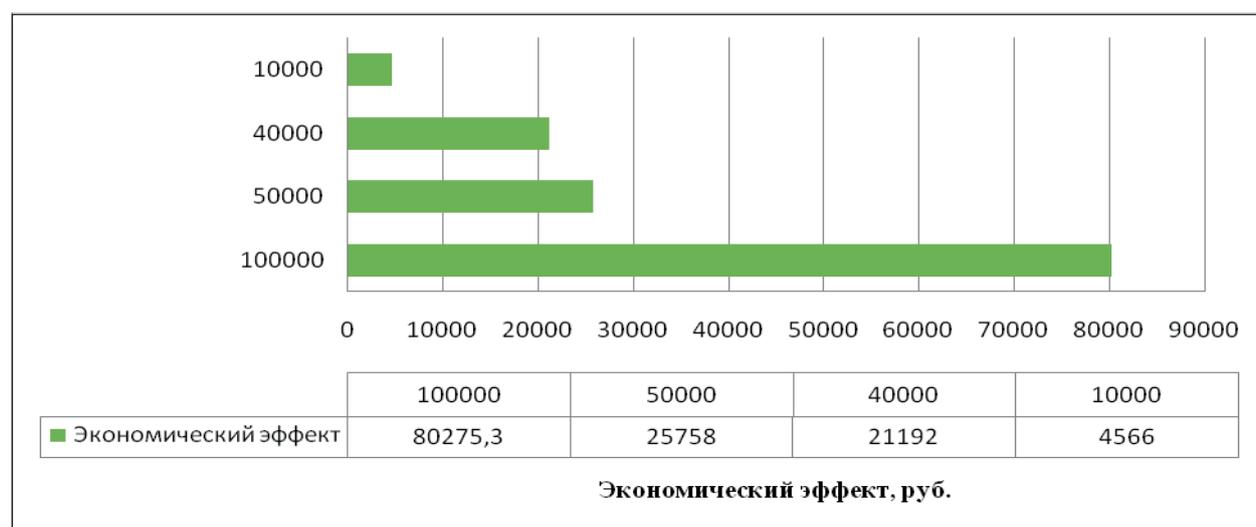


Рис. 3. Схема оптимального распределения выделяемых средств

Fig. 3. Scheme of optimal distribution of allocated funds

Во-первых, по описанной схеме будет найдено оптимальное управление, это решение будет получено независимо от числа шагов и исходного запаса вкладываемых средств.

Во-вторых, предложенная методика комплексной оценки эффективности энергосберегающих мероприятий позволит повысить качество принятия решений по восстановлению жилищного фонда, повышению его энергоэффективности.

Применение методов математического моделирования позволит реализовывать проекты распределения финансовых средств таким образом, что реализация организационно-технологических решений последовательного выполнения мероприятий в жилищной сфере приведет к максимальному положительному социально-экономическому эффекту [19, 20].

Вывод: В настоящее время особое значение приобретает эффективное управление процессом обновления жилищного фонда. Результаты проведенного исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что проведение энергетической модернизации жилищного фонда приводит к понижению затрат граждан на жилищно-коммунальные услуги, способствует повышению интегрального показателя комфортности.

2. На основе приведенной схемы динамического планирования оптимального распределения средств на проведение энергосберегающих мероприятий реализована обобщенная методика оптимального управления жилищным фондом.

3. Установлено, что из возможных вариантов управления энергетической модернизацией жилищного фонда будет однозначно выбрано оптимальное управление независимо от числа шагов и исходного запаса вкладываемых средств.

4. Предложена математическая модель, позволяющая максимизировать количество качественного жилья за счет реализации энергосберегающих и других мероприятий при модернизации жилищного фонда.

Библиографический список:

1. Байрамуков С.Х. О методах динамического программирования процессов комплексной модернизации жилищного фонда / С.Х. Байрамуков, З.Н. Долаева, А.О. Омаров // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. - №3 (Том 38). - С. 56-63.
2. Ларин С.Н. Модернизация воспроизводства жилищного фонда региона на основе внедрения энергосберегающих технологий / С.Н. Ларин // Экономический анализ: теория и практика. - 2013. - № 17 (320). - С. 33-39.
3. Колмогоров О.И. Энергоэффективная модернизация при капитальном ремонте объектов жилищного фонда / О.И. Колмогоров // Вестник гражданских инженеров. - 2012. - № 6 (35). - С. 234-238.
4. Байрамуков С.Х. Эффективность энергетической модернизации жилищного фонда / С.Х. Байрамуков, З.Н. Долаева // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №4. - URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2015/3452.
5. COUCH, C., SYKES, O. & BÖRSTINGHAUS, W. 2011. Thirty years of urban regeneration in Britain, Germany and France: The importance of context and path dependency. *Progress in Planning*, 75, 1-52.
6. Cheong-Hoon Baek, Sang-Hoon Park. Changes in renovation policies in the era of sustainability Original Research Article *Energy and Buildings*. 2012. No 47, Pp. 485-496.
7. Sheina S.G. Environmental aspects of programme realization of energy saving in the housing stock in Rostov-on-Don / S.G. Sheina, E.V. Martynova // Annual International Symposium «Environmental, Engineering – Economic and Legal Aspects for Sustainable Living». Program abstracts. – Hannover, Germany, 2013. – P. 85-86.
8. Bellman R., Kalaba R. *Dynamic Programming and Statistical Communication Theory*, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Col. 43, 1957, pp. 749-751.
9. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования / Е.С. Вентцель – М.: Наука, 1964. – 176 с.
10. Чуканов С.В. Экономическое поведение и метод динамического программирования на бесконечном временном интервале / С.В. Чуканов // Математическое моделирование. – 2003. - том 15, номер 3. –С. 109–121
11. Матряшин И.П. Математическое программирование /И.П.Матряшин, В.К.Макеева – М.: Высшая школа, 1978. – 160 с.
12. Ларионов А.И. Экономико-математические методы в планировании /А.И.Ларионов, Т.И. Юрченко– М.: Высшая школа, 1984. – 224 с.
13. Струченков В.И. Динамическое программирование в задачах планирования реализации частично возобновляемых ресурсов / В.И. Струченков // Информационные технологии. - 2016. -№ 2 (Т. 22). - С.94-99.
14. Струченков В.И. Динамическое программирование с использованием множеств Парето в задачах планирования реализации возобновляемых ресурсов / В.И. Струченков // Информационные технологии. - 2016. - № 3 (Т. 22). - С. 187-191.
15. Ченцов А.Г. Динамическое программирование в одной нестационарной задаче маршрутизации / А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. - 2012. - № 3. - С. 151-154.
16. Ченцов А.Г. Динамическое программирование в задаче маршрутизации с ограничениями и стоимостями, зависящими от списка заданий / А.Г. Ченцов, А.А. Ченцов // Доклады Академии наук. - 2013. - № 1 (Т. 453). - С. 20.

17. Овчинников В.Г. К алгоритмам динамического программирования оптимальных процессов / В.Г. Овчинников // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. - 2012. - № 3 (28). - С. 215-218.
18. Dolaeva Z.N. Research of residential real estate pricing / Z.N.Dolaeva, M.M. Kidakoeva // Sciences of Europe. - 2016. - № 8 (8). – С. 85 – 88.
19. Carol C. Menassa. Evaluating sustainable retrofits in existing buildings under uncertainty Original Research Article Energy and Buildings. 2011. No 43, Issue 12. Pp. 3576-3583.
20. Clapp John M., Eichholtz Piet, Lindenthal Thies. Real option value over a housing market cycle. Original Research Article Regional Science and Urban Economics. 2013. No 43, Issue 6. Pp. 862-874.

References:

1. Bayramukov S.Kh., Dolaeva Z.N., Omarov A.O. O metodakh dinamicheskogo programmirovaniya protsessov kompleksnoy modernizatsii zhilishchnogo fonda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Tekhnicheskie nauki. 2015;3(38):56-63. [Bayramukov S.Kh., Dolaeva Z.N., Omarov A.O. On the dynamic programming method of the processes of integrated modernization of housing facilities. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;3(38):56-63.(In Russ.)]
2. Larin, S.N. Modernizatsiya vosproizvodstva zhilishchnogo fonda regiona na osnove vnedreniya energosberegayushchikh tekhnologiy. Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. 2013;17(320):33-39. [Larin, S.N. Modernization of the regional housing stock on the basis of adoption of energy-efficient technologies. Economic analysis: theory and practice. 2013;17(320):33-39. (In Russ.)]
3. Kolmogorov, O.I. Energoeffektivnaya modernizatsiya pri kapitalnom remonte obektov zhilishchnogo fonda. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2012;6(35):234-238. [Kolmogorov, O.I. Energy efficient modernization at general overhaul of housing facilities. 2012;6(35):234-238. (In Russ.)]
4. Bayramukov S.Kh., Dolaeva Z.N. Effektivnost energeticheskoy modernizatsii zhilishchnogo fonda. Inzhenernyy vestnik Dona. 2015;4. [Bayramukov S.Kh., Dolaeva Z.N. Efficiency of energy modernization of housing facilities Engineering Bulletin of Don. 2015;4. (In Russ.)] Available from: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3452.
5. Couch C., Sykes O., Börstinghaus W. Thirty years of urban regeneration in Britain, Germany and France: The importance of context and path dependency. Progress in Planning. 2011;75:1-52.
6. Cheong-Hoon B., Sang-Hoon P.. Changes in renovation policies in the era of sustainability. Original Research Article Energy and Buildings. 2012;47:485-496.
7. Sheina S.G., Martynova E.V. Environmental aspects of programme realization of energy saving in the housing stock in Rostov-on-Don. Annual International Symposium “Environmental, Engineering – Economic and Legal Aspects for Sustainable Living”. Program abstracts. Hannover, Germany, 2013. 85-86.
8. Vellman R., Kalaba R. Dynamic Programming and Statistical Communication Theory. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA, Col.; 1957;43:749-751.
9. Venttsel, E.S. Elementy dinamicheskogo programmirovaniya. M.: Nauka; 1964. 176 s. [Venttsel, E.S. Elements of dynamic programming. Moscow: Nauka; 1964. 176 p. (In Russ.)]
10. Chukanov, S.V. Ekonomicheskoye povedenie i metod dinamicheskogo programmirovaniya na beskonechnom vremennom intervale. Matematicheskoye modelirovanie. 2003;15(3):109–121. [Chukanov, S.V. Economic behavior and dynamic programming method for infinite time interval. Mathematical modeling. 2003;15(3):109–121. (In Russ.)]
11. Matryashin I.P., Makeeva V.K. Matematicheskoye programmirovaniye. M.: Vysshaya shkola; 1978. 160 s. [Matryashin I.P., Makeeva V.K. Mathematical programming. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 160 p. (In Russ.)]

12. Larionov A.I., Yurchenko T.I. Ekonomiko-matematicheskie metody v planirovanii. M.: Vysshaya shkola; 1984. 224 s. [Larionov A.I., Yurchenko T.I. Economic-mathematical methods in planning. Moscow: Vysshaya shkola; 1984. 224 p. (In Russ.)]

13. Struchenkov, V.I. Dinamicheskoye programmirovaniye v zadachakh planirovaniya realizatsii chastichno vozobnovlyaemykh resursov. Informatsionnyye tekhnologii. 2016;2(22):94-99. [Struchenkov, V.I. Dynamic programming for planning of implementation of partially renewable resources. Information technology. 2016;2(22):94-99. (In Russ.)]

14. Struchenkov, V.I. Dinamicheskoye programmirovaniye s ispolzovaniem mnozhestv Pareto v zadachakh planirovaniya realizatsii vozobnovlyaemykh resursov. Informatsionnyye tekhnologii. 2016;3(22):187-191. [Struchenkov, V.I. Dynamic programming with the use of Pareto sets in the task of planning for the implementation of renewable resources. Information technology. 2016;3(22):187-191. (In Russ.)]

15. Chentsov A.G., Chentsov P.A. Dinamicheskoye programmirovaniye v odnoy nes-tatsionarnoy zadache marshrutizatsii. Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012;3:151-154. [Chentsov A.G., Chentsov P.A. Dynamic programming for one unsteady routing task. Proceedings of the Institute of Mathematics and Informatics of the Udmurt State University. 2012;3:151-154. (In Russ.)]

16. Chentsov A.G., Chentsov A.A. Dinamicheskoye programmirovaniye v zadache marshrutizatsii s ogranicheniyami i stoimostyami, zavisyashchimi ot spiska zadaniy. Doklady Akademii nauk. 2013;1(453):20. [Chentsov A.G., Chentsov A.A. Chentsov A.G., Chentsov A.A. Dynamic programming in the routing task with constraints and costs depending on the job list. Reports of Academy of Sciences. 2013;1(453):20. (In Russ.)]

17. Ovchinnikov, V.G. K algoritmam dinamicheskogo programmirovaniya optimalnykh protsessov. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki. 2012;3(28):215-218. [Ovchinnikov, V.G. To the dynamic programming algorithms of optimal processes. Bulletin of Samara State Technical University. Physics and Mathematics Series. 2012;3(28):215-218. (In Russ.)]

18. Dolaeva Z.N., Kidakoeva M.M. Research of residential real estate pricing. Sciences of Europe. 2016;8(8):85–88. [(In Russ.)]

19. Menassa C.C. Evaluating sustainable retrofits in existing buildings under uncertainty. Original Research Article Energy and Buildings. 2011;43(12):3576-3583.

20. Clapp J.M., Eichholtz P., Lindenthal T. Real option value over a housing market cycle. Original Research Article Regional Science and Urban Economics. 2013;43(6):862-874.

Сведения об авторах.

Байрамуков Салис Хамидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и управления недвижимостью.

Долаева Зурьят Ньюжуровна – старший преподаватель кафедры строительства и управления недвижимостью.

Каппушева Мадина Биляловна – магистрант.

Information about the authors.

Salis K. Bayramukov – Dr. Sc. (Technical), Prof., Department of building and estate management.

Zuriyat N. Dolaeva – Senior lecturer.

Madina B. Kappusheva – Undergraduate.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 16.09.2016.

Принята в печать 29.11.2016.

Conflict of interest

Received 16.09.2016.

Accepted for publication 29.11.2016.

Для цитирования: Доржиева Э.Л. Совершенствование методов оценки эффективности инновационного развития российских корпораций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):184-196. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-184-196

For citation: Dorzhieva E.L. Improved methods for evaluating the effectiveness of innovation development in russian corporations. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43 (4): 184-196. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-184-196

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338

DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-184-196

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ КОРПОРАЦИЙ

Доржиева Э.Л.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
e-mail: delh@rambler.ru

Резюме: *Цель.* Инновационная деятельность становится одним из ключевых факторов эффективного развития и роста конкурентоспособности экономики России. Важная роль в этом процессе отводится промышленным корпорациям. В этой связи возрастает необходимость совершенствования методов оценки эффективности инновационного развития российских корпораций. **Метод.** В работе использованы методы формальной логики, а также системный анализ, позволяющие рассматривать корпорацию как систему, включающую различные направления (составляющие) инновационной деятельности. **Результат.** Рассмотрены различные подходы к определению основных дефиниций инноватики, предложена авторская классификация инноваций. Выделены признаки инновационно активной промышленной корпорации, а также показаны возможные причины разной инновационной активности корпораций; выделены составляющие системы показателей инновационной деятельности: финансовая; потребительская; процессная; развития и обучения; рисковая. Обоснована необходимость включения в состав системы показателей инновационной деятельности рискованной составляющей. Показаны способы достижения целей по каждому направлению инновационной деятельности, а также предложен методический подход, позволяющий осуществлять постоянный контроль над реализацией инновационной стратегии развития. Представлен алгоритм оценки реализации инновационной стратегии развития промышленной корпорации. **Вывод.** Теоретико-методологические разработки позволяют не только ориентироваться в многообразии инноваций, но определять и устанавливать взаимосвязи и взаимозависимости между различными инновациями, осуществлять анализ, оценку и прогнозирование для эффективного развития инновационной деятельности российских корпораций.

Ключевые слова: инновации, классификация инноваций, инновационная активность, корпорации

ECONOMIC SCIENCE

IMPROVED METHODS FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATION DEVELOPMENT IN RUSSIAN CORPORATIONS

Erzhena L. Dorzhieva

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russia,

e-mail: delh@rambler.ru

Abstract: Objectives. Innovative activity is a key factor in the effective development and growth of competitiveness in the Russian economy. An important role in this process is played by industrial corporations. Against this background, there is an increased need for improving the effectiveness of methods for evaluating the innovation development of Russian corporations. **Methods.** Formal logic as well as system analysis methods were used in the research, allowing us to consider the corporation as a system that includes a variety of innovational directions (elements). **Results.** The article discusses various approaches to the determination of the basic definitions of innovation; a classification of innovation is proposed. The attributes of innovative activity of industrial corporations are distinguished together with an outline of the possible causes of various innovative corporate activities; components of the system of indicators of innovation activity are isolated: financial; consumer; process; development and training; risk management. The need for the indices of the innovation activity of the risk component to be included in the composition of the system is substantiated. It is shown how the objectives for each area of innovation may be achieved in tandem with a methodological approach that allows continuous monitoring of the implementation of innovative development strategies. An algorithm for evaluating the implementation of innovative strategies contributing to the development of industrial corporations is presented. **Conclusion.** Theoretical and methodological development can be used not only to navigate the variety of innovations but also to determine and establish the relationship and interdependence between the various innovations as well as carry out analysis, assessment and forecasting for the effective development of innovative activity of Russian corporations.

Keywords: innovation, classification of innovations, innovation activity, corporations

Введение. Повышение экономической роли инноваций и инновационной деятельности, изменение темпов, направлений и механизмов развития инновационных процессов являются ключевыми факторами, определяющими стратегию развития большинства стран мира. В современных условиях важнейшими задачами российской экономики является переход на инновационный путь развития, диверсификация экономики и создания условий для реализации инновационного потенциала. Достижение поставленных задач в значительной степени зависит от инновационной деятельности российских промышленных корпораций.

Эффективная система стратегического управления инновационной деятельностью позволит российским промышленным корпорациям преодолеть технологическое отставание и стать конкурентоспособными на мировом рынке. Так, Н. Розенберг и Л.Е. Бирдцелл связывают экономическое развитие стран Запада с осуществлением непрерывного поиска возможностей и адаптации изменений, благоприятных для дальнейшего роста, то есть с инновациями [1]. Выбор и реализация инновационной стратегии развития корпорации предполагают оценку всех форм инновационной деятельности, проявляющихся в инновациях различного типа, и охватывают все стороны хозяйственной деятельности.

Постановка задачи. Для решения проблемы перехода российских корпораций на путь инновационного развития необходимо исследовать теоретические аспекты инновационной экономики. Исследование теории инновационного развития требует, прежде всего, изучения таких ключевых понятий, как инновации и их классификация, инновационный процесс и инновационная деятельность.

Следует заметить, что формирование теоретических основ изучения инноваций началось еще в начале XX века. Йозеф Шумпетер – один из основоположников инновационной теории.

Несмотря на широкое применение термина «инновация», основой всех трактовок являются новизна, социально-экономическая эффективность, результативность, производственная востребованность и применимость. В качестве организационных инноваций рассматривал укрупнение фирмы, позволяющее получать экономию от масштаба. Он разработал концепцию «предпринимательской фирмы» – особого экономического агента, действующего через конкуренцию со стороны новых товаров, новых технологий, новых источников сырья или новых типов организации. Целью предпринимательской фирмы является не максимизация прибыли через минимизацию издержек, а поиски стратегического преимущества на основе продуктовых, технологических или организационных инноваций [2].

Как показало проведенное исследование, до сих пор в экономической литературе нет единого подхода к определению понятия «инновация». Инновацию характеризуют как процесс, результат, метод, объект. Например, Б. Санто рассматривает инновацию как «общественный, технический и экономический процесс, который через практическое использование идей и изобретений приводит к созданию лучших по свойствам изделий, технологий, и в случае, если она ориентируется на экономическую выгоду, на прибыль, ее появления на рынке может принести добавочный доход...» [3]. Б. Твисс также под инновацией понимает процесс, «... в котором идея или изобретение приобретает экономический смысл» [4]. П.Друкер характеризовал инновации как «особый инструмент предпринимателей, средство, с помощью которого они стремятся осуществить новый вид бизнеса или услуг» [5]. Несмотря на широкое применение термина «инновация», основой всех трактовок являются новизна, социально-экономическая эффективность, результативность, производственная востребованность и применимость.

В проекте стратегии Минэкономразвития РФ «Инновационная Россия-2020» инновация определяется как «вывод на рынок нового товара или услуги, внедрение нового процесса производства, освоение новой бизнес-модели, создание новых рынков» [6]. В рекомендациях Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) по сбору и анализу данных по инновациям дано следующее определение понятия: «Инновация – это внедрение нового или существенно улучшенного продукта или процесса, нового маркетингового или организационного метода организации производства».

Необходимым условием инновации является то, что продукт, процесс или метод должны быть новыми или существенно улучшенными, когда компания разработала и внедрила инновацию быстрее других. Таким образом, инновация – важное конкурентное преимущество корпорации, в осуществлении которой корпорация видит потенциально высокую прибыль и/или другие положительные характеристики.

Экономическая эффективность инноваций проявляется в изменении таких показателей, как рост производительности труда, снижение издержек производства и транзакционных издержек, энергоемкости, увеличение производства продукции. То есть реализация инновационной стратегии должна отражать эффективность инновационной деятельности, которая определяется ее способностью достигать максимальных результатов с наименьшими затратами трудовых, материальных, финансовых ресурсов и времени на единицу продукции. Сложившаяся в настоящее время практика оценки эффективности деятельности корпораций, главным образом по объему реализации или уровню рентабельности, в условиях активных инфляционных процессов не позволяет говорить об объективной оценке результатов инновационной деятельности. Следовательно, необходим методический подход к оценке эффективности инновационной деятельности, отражающий выбор и реализацию инновационной стратегии корпорации в целом или отдельных составляющих.

Методы исследования. Для понимания способов управления инновациями необходимо изучить разнообразные сферы и способы их применения, рассмотреть классификацию

инноваций. Классификация представляет собой познавательный и практический процесс с целью определения структуры и систематизации инноваций по различным признакам. Классификация позволяет не только ориентироваться в многообразии инноваций, но и определять и устанавливать взаимосвязи и взаимозависимости между различными инновациями; осуществлять анализ, оценку и прогнозирование.

Существует множество подходов к классификации инноваций по различным признакам. Классификационный признак представляет собой отличительное свойство данной группы инноваций, ее главную особенность. Инновации разных типов могут быть связаны с различными фазами социально-экономического и научно-технического развития.

Г. Менш выделил базисные инновации, они способствуют появлению новых отраслей и новых рынков, улучшающие инновации (повышают эффективность использования базисных инноваций или расширяют для них рынок) и «псевдоинновации» (улучшают качество предмета или незначительно изменяют элементы технологического процесса). Критерием классификации технологических инноваций по Г. Меншу является степень радикальности инновации.

Базисные или радикальные (прорывные) инновации ведут к значительному повышению функциональности по сравнению с существующими аналогами. Такие инновации обычно создаются в отделах НИОКР, при этом исследования, как правило, изначально не ориентированы на определенную рыночную потребность.

Улучшающие инновации, или инкрементальные (пошаговые) инновации, – это постоянное совершенствование продукта или бизнес-процесса, что часто служит ответом на определенную потребность рынка. Эффективные пошаговые инновации являются следствием ориентации компании на потребителя.

Так же, как Г. Менш, Ю.В. Яковец различает инновации по степени радикальности и предлагает выделять следующие типы инноваций:

1) базисные инновации, которые реализуют крупнейшие изобретения и становятся базой для революционных переворотов в технике;

2) улучшающие инновации, предусматривающие реализацию изобретений среднего уровня и служащие основой для создания новых моделей и модификаций данного поколения техники или технологии, заменяющих устаревшие модели более эффективными либо расширяющих сферу применения этого поколения, а также существенно видоизменяющих используемые технологии;

3) микроинновации, улучшающие отдельные производственные или потребительские параметры выпускаемых моделей техники и применяемых технологий на основе использования мелких изобретений, что способствует более эффективному производству этих моделей либо повышению эффективности их использования;

4) псевдоинновации [7].

Применительно к деятельности корпорации российские ученые И.Б. Гурков и В.С. Тубалов предлагают следующую классификацию инноваций [8]: продуктовые; процессные; технические; управленческие технологии; организационные внутрифирменные; организационные межфирменные.

Продуктовые инновации – изменение в товарах и услугах. Продуктовые инновации представляют собой усовершенствованные варианты существующих товаров (расширяют рынки существующих отраслей) или абсолютно новые товары (формируют новые рынки и отрасли).

Технологические инновации направлены на улучшение технологии производства товаров. Однако то, что в одной отрасли может считаться технологической инновацией, в другой отрасли в то же время может рассматриваться как инновационный продукт. Для гибкого автоматизированного производства новый тип промышленного оборудования является инновационным продуктом. То же оборудование для его покупателя будет считаться инновационной технологией, если станет составным элементом нового процесса производства.

Процессные инновации - изменение того, как это делается. Технические инновации включают продукты, процессы и технологии, применяемые для производства товаров или оказания услуг. Административные инновации относятся к изменениям в организационных структурах и административных процессах и, как правило, напрямую связаны с управлением корпорацией.

Организационные инновации часто служат необходимой предпосылкой технологических инноваций и в значительной степени определяют эффективность деятельности корпорации.

Согласно О. Уильямсону, современную корпорацию следует в основном понимать как продукт серии организационных инноваций, целью и результатом которых является минимизация транзакционных издержек (необходимые затраты на институциональное, организационное и информационное обеспечение любой деятельности) [9]. О. Уильямсон говорит о том, что если договориться о совместной разработке и передаче знаний сложно и дорого (т.е. рыночные транзакционные издержки велики), то тогда координация в рамках интегрированной структуры более привлекательна, чем рыночная.

С другой стороны, одной из главных целей создания промышленной корпорации выступает повышение эффективности производства. В ходе производственной интеграции создается возможность инновационной синергии, заключающейся в концентрации ресурсов на разработке и освоении ключевых, радикальных инноваций.

Инновационная синергия повышает технологические компетенции всей корпорации и способствует достижению низких издержек и лучшему качеству продукции в корпоративных бизнесах [9]. Согласно рекомендациям «Руководство Осло» по сбору и анализу данных по инновациям, различают следующие типы базовых инноваций: продуктовые, процессные, маркетинговые и организационные (табл.1).

Таблица 1. Базовые типы инноваций
Table 1. Basic types of innovation

Продуктовые	Процессные	Маркетинговые	Организационные
Появление на рынке новых товаров и услуг либо значительное усовершенствование существующих. Значительное улучшение подразумевает использование новых компонентов, материалов, способа предоставления услуг.	Внедрение нового или значительно улучшенного метода производства. Процессная инновация также включает в себя существенные изменения в используемом оборудовании или программном обеспечении.	Реализация новых маркетинговых методов, подразумевающих значительные изменения в дизайне продукта, упаковке, продвижении продукта на новые рынки. Применяется, как к новым, так и к существующим продуктам, но впервые осуществляется фирмой.	Применение новой или значительные изменения в существующей структуре или методах управления, обеспечивающих повышение знаний, качества продукции, эффективность трудовых процессов и организации рабочих мест, снижение транзакционных издержек.

В российской практике сложилось так, что инновациям в управлении, осуществляемым корпорациями, уделяется незначительное внимание, а развитие корпораций связывают исключительно с техническими и технологическими инновациями. Однако эффективность управления корпорацией отражается на показателях эффективности нового оборудования и технологий. П. Друкер отмечает, что инновация – это не техническое, а экономическое понятие, подразумевающее изменения на всех уровнях менеджмента: внутрифирменного управления, управления производством, управления персоналом.

Следует различать управление корпорацией и корпоративное управление. Следовательно, корпоративное управление – система взаимоотношений корпорации с акционерами и другими «стейкхолдерами» (заинтересованными лицами). Это могут быть группы лиц, орга-

низации или отдельные лица, влияющие на деятельность корпорации, которая, в свою очередь, зависит от них.

На современном этапе корпорации начали оценивать взаимодействие со стейкхолдерами как инструмент, который может способствовать инновациям в создании продуктов и организации процессов, усиливать ориентацию стратегических решений на устойчивость как внутри, так и вовне корпорации. Эффективное стратегическое взаимодействие со стейкхолдерами может:

- 1) обеспечить лучшее управление рисками и репутацией;
- 2) объединить ресурсы для решения проблем и достижения целей корпорации;
- 3) комплексно оценивать внешнюю среду корпорации, включая развитие рынков и определение новых стратегических возможностей;
- 4) получать от стейкхолдеров информацию, что может привести к разработке инноваций;
- 5) вызывать доверие между корпорацией и ее стейкхолдерами.

Управление корпорацией, или корпоративный менеджмент, охватывает внутренние процессы корпорации – разработку и принятие стратегических и оперативных решений в маркетинге, финансах, производстве, управлении персоналом. Классик менеджмента Ф. Тейлор подчеркивал, что хорошая организация работ, даже со старым оборудованием, всегда лучше плохой организации с новым оборудованием. Инновации в управлении долгое время являлись наименее привлекательными для изучения специалистами. Но в настоящее время инновации в управлении все больше воспринимаются руководителями корпораций как необходимый элемент стратегии развития и обеспечения долгосрочной конкурентоспособности.

Г. Хэмел определяет стратегические инновации как способность переосмыслить существующую бизнес-модель способами, которые создают новую ценность для потребителей, стейкхолдеров и конкурентное преимущество. Стратегическая инновация – это создание стратегий развития, новых категорий продуктов, услуг и бизнес-моделей, которые меняют деятельность и производят существенную, новую ценность для потребителей, клиентов и корпорации. Стратегические инновации иногда называют инновацией бизнес-модели. Инновационная бизнес-модель предполагает экспериментирование с новыми стратегиями, с новыми концепциями бизнеса. Стратегические инновации – инновации в продуктах и услугах, бизнес-моделях, бизнес-процессах, изменяющие деятельность и позиционирование корпорации по отношению к конкурентам [10].

По нашему мнению, вследствие финансовых и нефинансовых целей инновационных стратегий развития промышленных корпораций для их реализации необходимо формирование системы показателей инновационной деятельности (финансовых и качественных), которые характеризуют степень достижения целей инновационного развития по каждому направлению деятельности.

Предлагаемый методический подход к реализации инновационной стратегии развития промышленной корпорации базируется на методе сбалансированной системы показателей Д. Нортон и Р. Каплана [1]. На наш взгляд, система показателей оценки инновационной деятельности промышленной корпорации должна учитывать:

- 1) соответствие инновационной стратегии развития интересам стейкхолдеров;
- 2) обеспечение минимизации инновационных рисков;
- 3) возможность развития и обновления материально-технической, технологической базы корпорации;
- 4) рост потенциала корпорации для выхода на новые рынки при реализации инновационной стратегии;
- 5) влияние результатов реализации инновационной стратегии на социальную сферу.

В список показателей инновационной деятельности следует включать те показатели, которые позволят оценить степень достижения поставленных целей инновационного развития корпорации (табл. 1). Цель промышленной корпорации и инновационная стратегия

развития корпорации выступают основой для формирования системы показателей инновационной деятельности в целом [5].

Для отбора показателей, которые будут использоваться в системе показателей инновационной деятельности корпорации, необходимо сформировать экспертную группу. Формализовать процедуру оценки показателей можно на основе применения балльной системы оценки. Показатели, получившие наибольшее количество баллов в ходе экспертной оценки, будут включены в систему ключевых показателей инновационной деятельности.

Предлагаемая система показателей инновационной деятельности, включает в себя следующие составляющие: финансовая; потребительская; процессная; развития и обучения; рисковая. На наш взгляд, необходимость включения в систему показателей инновационной деятельности рискованной составляющей обусловлена высокой степенью неопределенности, характерной для любой инновационной деятельности, и, как следствие, высоким уровнем риска.

Таблица 1. Показатели инновационной деятельности промышленной корпорации
Table 1. Indices of innovation activity of an industrial corporation

Составляющие системы показателей инновационной деятельности	Показатели инновационной деятельности промышленной корпорации
Финансовая составляющая	Затраты на внутренние и внешние научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки
	Процентное соотношение затрат на НИОКР
	Прибыль от продажи лицензий на созданные продукты/ технологии
	Прибыль от реализации инновационных продуктов
	Уровень снижения издержек за счёт внедрения инновационных решений
Потребительская составляющая	Показатель лояльности клиентов
	Показатель удовлетворённости клиентов
	Доля рынка
	Число новых заказов
Рискованная составляющая	Коммерческие риски
	Финансовые риски
	Производственные риски
	Экологические риски
Составляющая процессов	Количество поддерживаемых патентов, поданных патентных заявок, а также используемых патентов
	Количество разработанных технологий снижения времени прохождения информации, количество внутренних инноваций
	Соотношение разработанных технологий и приобретённых технологий
	Количество проданных лицензий на технологии
	Время цикла разработки инновационной продукции
	Доля инновационной продукции
Составляющая обучения и развития	Коэффициент текучести кадров, %
	Расходы на обучение персонала
	Удовлетворённость сотрудников
	Доля сотрудников с высшим образованием
	Участие сотрудников в совершенствовании

Для прогнозирования последствия в условиях неопределенности и вероятности последствий возможных отклонений в реализации инновационной стратегии развития, а также для разработки адекватных последствиям предупреждающих мер необходимо эффективное управление инновационными рисками [13, 14].

В процессе оценки величины риска для выбора критического уровня анализируемых рисков исследуются начальные условия возможного события или обстоятельства, последовательность потенциально опасных событий, любые смягчающие факторы и характеристики, а также природа и частота возможных негативных последствий идентифицированных опасностей. Эти критерии и меры распространяются на все направления деятельности и включают значения неопределенностей оценок [12]. Целью оценивания рисков является принятие решений, основанных на анализе рисков, что устанавливает приоритет принятия решений по рискам, на которые необходимо реагировать в первую очередь [11]. Анализ рисков реализации инновационной стратегии развития промышленной корпорации целесообразно проводить с учетом особенностей ее инновационной деятельности, с применением различных методов [17-19].

Необходимо провести анализ всех видов рисков: внешней макросреды (государственная политика, социальная политика, экономическая политика, международные экономические отношения и др.), внешней микросреды корпорации (взаимоотношения с поставщиками, потребителями/заказчиками, кредиторами) и внутренней среды корпорации.

На наш взгляд, существующие классификации инноваций необходимо дополнить с учетом следующих классификационных признаков: по назначению, по масштабам применения, в зависимости от стратегической цели корпорации, по степени риска, по отношению к предыдущему состоянию. В связи с этим предложена обобщенная классификация инноваций промышленной корпорации (табл. 2).

Таблица 2. Классификация инноваций промышленной корпорации
Table 2. Classification of innovations of an industrial corporation

Классификационный признак	Инновации			
	По срокам разработки	краткосрочные		среднесрочные
По сфере деятельности	управленческие	технологические	маркетинговые	социальные
По степени новизны	базисные		улучшающие	
По созданию	собственные		совместные	приобретенные
По объектам управления	продуктовые		процессные	
По финансовым затратам	высокозатратные		среднезатратные	низкозатратные
По назначению (предложено автором)	увеличение доходов	рост производства	рост лояльности клиентов	социальный эффект
По масштабам применения (предложено автором)	корпорация	предприятие	отдел	цех, производственная площадка
В зависимости от стратегической цели корпорации (предложено автором)	опережающего роста		постепенного роста	удержания доли рынка
По степени риска (предложено автором)	с высокой степенью риска		со средней степенью риска	с низкой степенью риска
По отношению к предыдущему состоянию (предложено автором)	заменяющие		дополняющие	нейтральные

Кроме того, по мнению автора, данные классификационные признаки тесно связаны с выбором инновационной стратегии развития российских корпораций.

Анализ основных классификаций инноваций позволил раскрыть разнообразные области и способы их использования на макроуровне, однако существующие в настоящее время классификации инноваций не дают четкого представления об особенностях инноваций на микроуровне, в рамках отдельных российских корпораций.

Обсуждение результатов. Применение системы показателей инновационной деятельности в рамках модели планирования и управления корпорацией будет способствовать обеспечению связи стратегических целей и тактических задач. Инновационные стратегии должны быть представлены в виде взаимосвязанных показателей для достижения намеченных целей.

Для обеспечения реализации инновационных стратегий промышленных корпораций в непрерывном процессе необходимы их периодическая корректировка и обновление. Система ключевых показателей инновационной деятельности позволяет своевременно выявить проблемы в системе управления, определить причины их возникновения и разработать мероприятия для их устранения.

Для реализации составляющей обучения и развития предлагается осуществлять подготовку и техническое обучение кадров посредством заключения договоров с образовательными учреждениями; с целью мотивации и стимулирования труда размер премии работников должен зависеть от их вклада в реализацию стратегии, который определяется по результатам ежегодной оценки достижения индивидуальных целей сотрудников. Они должны быть привязаны к целям корпорации, установленным в функциональных планах их подразделений. Результаты достижения индивидуальных целей рекомендуется оценивать с помощью определения эффективности деятельности сотрудников.

Рост удовлетворенности клиентов является целью реализации потребительской составляющей в результате решения следующих задач: высокое качество изделий; поддержка эксплуатации производимой продукции; послепродажное обслуживание [2].

Для реализации финансовой составляющей необходимо решение следующих задач: развитие за счет собственных средств; развитие за счет заемных средств; софинансирование. При реализации финансовой составляющей инновационной стратегии за счет собственных средств необходимо учитывать определенное соотношение между прибылью и амортизацией для осуществления модернизации.

Инновационное развитие за счет внешнего финансирования осуществляется на основе привлечения кредитов и займов. Большое значение отводится нахождению оптимальной пропорции между собственным и заемным капиталом, необходимым для реализации инновационной стратегии корпорации.

Необходимость привлечения заемного капитала определяется ожидаемым повышением эффективности работы корпорации. В случае если эффективность прогнозируется на уровне выше текущей, то привлечение дополнительных источников для реализации инновационной стратегии является целесообразным [20]. Сравнение различных методов финансирования позволяет корпорации выбирать оптимальный вариант финансового обеспечения инновационной стратегии.

Оценка эффективности реализации инновационной стратегии может осуществляться по двум уровням:

1. Эффективность реализации инновационной стратегии по каждому направлению инновационной деятельности (составляющей).

2. Степень достижения поставленных стратегических целей инновационной деятельности корпорации в целом.

Алгоритм оценки эффективности реализации инновационной стратегии промышленной корпорации (рис. 1) состоит из шести последовательных этапов.

методологические рекомендации для организации инновационной деятельности в отдельной корпорации и стране в целом.

Предлагаемый в статье методический подход отражает процесс оценки эффективности отдельных составляющих инновационной деятельности и их влияния на результативность инновационной стратегии корпорации в целом.

Библиографический список:

1. Розенберг Н. Как Запад стал богатым (Экономическое преобразование индустриального мира) [Текст] Н. Розенберг. – Новосибирск: Экор, 1995. – 352 с.
2. Шумпетер Й. Теория экономического развития (Исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры): пер. с англ. [Текст] / Й. Шумпетер. – М.: Прогресс, 1982. – 455 с.
3. Санто Б. Инновация как средство экономического развития / Б. Санто; пер. с венг. Б. В. Сазонова. – Москва: Прогресс, 1990.
4. Твисс Б. Управление нововведениями [Текст] / Б. Твисс. – Москва: Экономика, 2009. – 272 с.
5. Друкер П.Ф. Бизнес и инновации [Текст] / П.Ф. Друкер. – Москва: Вильямс, 2009. – 292 с.
6. Инновационная стратегия России – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://in-povus.biz/media/uploads/resources/Innovative-Russia-2020>
7. Яковец Ю. В. Эпохальные инновации XXI века / Ю.В. Яковец. – Москва: Экономика, 2004. – 439 с.
8. Gurkov I. B., Filippov S. Innovation Processes in the Russian Manufacturing Subsidiaries of Multinational Corporations: An Integrated View from Case Studies // Journal of East - West Business. 2013. Vol. 19. No. 4. P. 260-290.
9. Уильямсон О.И. Экономические институты капитализма. Фирмы, рынки и «отношенческая» контракция [Текст] / О.И. Уильямсон. – Санкт-Петербург: Лениздат, 1996
10. Прахалад К.К. Пространство бизнес-инноваций: создание ценности совместно с потребителем: пер. с англ. [Текст] / К.К. Прахалад, М.С. Кришнан. – Москва: Альпина Паблишерз: Юрайт, 2014. – 255 с.
11. Руководство Осло: рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. – Москва, 2011
12. Ребязина В. А. Инновационная деятельность российских компаний: результаты эмпирического исследования [Текст] / В.А. Ребязина, С.П. Куц, А.В. Красников, М.М. Смирнова // Российский журнал менеджмента. – 2011.– Т. 9, № 3.
13. Чесбро Г. Открытые инновации. Создание прибыльных технологий [Текст] / Г. Чесбро. – Москва: Поколение, 2007.
14. Каплан Р. Сбалансированная система показателей: от стратегии к действию / Р. Каплан, Д. Нортон. – Москва: Олимп-бизнес, 2011. – 320 с.
15. Доржиева Э.Л. Стратегия развития корпораций: инновационный вектор / Э. Л. Доржиева, Н. П. Лукьянчикова / Иркутск: Изд-во Иркутского гос. технического ун-та, 2014, - 159 с.
16. Карачаровский В. В. Об эффекте инновационной деятельности в российской экономике на макро- и мезоуровнях // XIV Апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества: в 4-х книгах. Книга 3 / Отв. ред.: Е. Г. Ясин. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2014. С. 338-348.
17. OECD, Main Science and Technology Indicators; Key Figures. Paris, 2014
18. Sherer F. M. Industrial market structure and economic performance. Chicago: RandMcNally, 1970.
19. Swann G.M. P. Universities and business innovation in Innovation in UK: Indicators and Insights, 2006.

20. Teece, D.J., Pisano, G. The dynamic capabilities of firms: an introduction. *Industrial and Corporate Change* 3(3), 2014. - P. 537–556.

References:

1. Rozenberg N. *Kak Zapad stal bogatym (Ekonomicheskoye preobrazovanie industrialnogo mira)*. Novosibirsk: Ekor; 1995. 352 s. [Rozenberg N. *How the West became rich (the economic transformation of the industrial world)*. Novosibirsk: Ekor; 1995. 352 p. (In Russ.)]
2. Shumpeter Y. *Teoriya ekonomicheskogo razvitiya (Issledovanie predprinimatelskoy pribyli, kapitala, kredita, protsenta i tsikla konyunktury)*: per. s angl. M.: Progress; 1982. 455 s. [Shumpeter Y. *The theory of economic development (study of business profits, capital, credit, interest and cycle conditions)*: trans. from English. Moscow: Progress; 1982. 455 p. (In Russ.)]
3. Santo B. *Innovatsiya kak sredstvo ekonomicheskogo razvitiya*: per. s veng. B.V. Sazonova. M.: Progress; 1990. [Santo B. *Innovation as a tool for economic development*. Trans. from Hungarian by B.V. Sazonov. Moscow: Progress; 1990. (In Russ.)]
4. Tviss B. *Upravlenie novovvedeniyami*. M.: Ekonomika; 2009. 272 s. [Tviss B. *Managing innovation*. Moscow: Ekonomika; 2009. 272 p. (In Russ.)]
5. Druker P.F. *Biznes i innovatsii*. M.: Vilyams; 2009. 292 s. [Druker P.F. *Business and innovation*. Moscow: Williams; 2009. 292 p. (In Russ.)]
6. *Innovatsionnaya strategiya Rossii – 2020*. [The innovative strategy of Russia – 2020 (In Russ.)]. Available from: <http://in-novus.biz/media/uploads/resources/Innovative-Russia-2020>
7. Yakovets Yu.V. *Epokhalnyye innovatsii XXI veka*. M.: Ekonomika; 2004. 439 s. [Yakovets Yu.V. *The epochal innovations of the 21st century*. Moscow: Economics; 2004. 439 p. (In Russ.)]
8. Gurkov I.B., Filippov S. *Innovation Processes in the Russian Manufacturing Subsidiaries of Multinational Corporations: An Integrated View from Case Studies*. *Journal of East - West Business*. 2013;19(4):260-290. [(In Russ.)]
9. Uilyamson O.I. *Ekonomicheskies instituty kapitalizma. Firmy, rynki i "otnoshencheskaya" kontraktatsiya*. Sankt Petersburg: Lenizdat; 1996. [Uilyamson O.I. *The economic institutions of capitalism. Firms, markets, and "relational" contracting*. St. Petersburg: Lenizdat; 1996. (In Russ.)]
10. Prakhlad K.K., Krishnan M.S. *Prostranstvo biznes-innovatsiy: sozдание tsennosti sovместno s potrebitелеm*: per. s angl. M.: Alpina Publisher; Yurayt; 2014. 255 s. [Prakhlad K.K., Krishnan M.S. *The space of business innovation. Creating value together with the consumer*: trans. from English. Moscow: Alpina Publ.; Yurayt; 2014. 255 p. (In Russ.)]
11. *Rukovodstvo Oslo: rekomendatsii po sboru i analizu dannykh po innovatsiyam*. M.; 2011 [Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. Moscow; 2011. (In Russ.)]
12. Rebyazina V.A., Kushch S.P., Krasnikov A.V., Smirnova M.M. *Innovatsionnaya deyatelnost rossiyskikh kompaniy: rezultaty empiricheskogo issledovaniya*. *Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta*. 2011;9(3). [Rebyazina V.A., Kushch S.P., Krasnikov A.V., Smirnova M.M. *Innovative activity of Russian companies: the results of empirical study*. *Russian Journal of Management*. 2011;9(3). (In Russ.)]
13. Chesbro H. *Otkrytye innovatsii. Sozдание pribylnykh tekhnologiy*. M.: Pokolenie; 2007. [Chesbrough H. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Moscow: Pokolenie; 2007. (In Russ.)]
14. Kaplan R., Norton D. *Sbalansirovannaya sistema pokazateley: ot strategii k deystviyu*. M.: Olimp-biznes; 2011. 320 s. [Kaplan R., Norton D. *Balanced Scorecard to Strategy*. Moscow: Olim Business; 2011. 320 p. (In Russ.)]
15. Dorzhieva E.L., Lukyanchikova N.P. *Strategiya razvitiya korporatsiy: innovatsionnyy vektor*. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo gos. tekhnicheskogo un-ta; 2014. 159 s. [Dorzhieva E.L.,

- Lukyanchikova N.P. Development strategy of corporations: innovative vector. Irkutsk: ISTU Publ., 2014. 159 p. (In Russ.)]
16. Karacharovskiy V.V. Ob effekte innovatsionnoy deyatelnosti v rossiyskoy ekonomike na makro- i mezourovnyakh. V kn.: XIV Aprelskaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva: v 4-kh knigakh. Kniga 3. Otv. red.: E.G. Yasin. M.: Izdatelskiy dom NIU VShE; 2014. 338-348 s. [Karacharovskiy V.V. On the effect of innovation activity in Russian economy at the macro - and meso-levels. XIV April International Academic Conference on Economics and Social Development: in 4 books. B. 3. In: E.G. Yasin (Ed.). Moscow: HSE Publ.; 2014. 338-348 p.(In Russ.)]
 17. OECD, Main Science and Technology Indicators; Key Figures. Paris; 2014.
 18. Sherer F.M. Industrial market structure and economic performance. Chicago: RandMcNally; 1970.
 19. Swann G.M.P. Universities and business innovation in Innovation in UK: Indicators and Insights. 2006.
 20. Teece D.J., Pisano G. The dynamic capabilities of firms: an introduction. Industrial and Corporate Change. 2014;3(3):537–556.

Сведения об авторе.

Доржиева Эржена Лхамажаровна – кандидат экономических наук, доцент, кафедра экономической теории и финансов.

Information about the author.

Erzhena L. Dorzhieva - Cand. Sc. (Economic), Assoc.Prof.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.09.2016.

Received 12.09.2016.

Принята в печать 20.12.2016.

Accepted for publication 20.12.2016.

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.);
- справку об авторах и ее электронную копию (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (отдела) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- две рецензии от докторов наук; подписи рецензентов должны быть заверены по месту их работы;
- сопроводительное письмо (1 экз.) для сторонних авторов.

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод» или «Заключение». Объем статьи не должен превышать 6-7 страниц машинописного текста, 5 рисунков или фотографий.

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 справа.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 100-250 слов или 850 знаков, 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

Строка с текстом «**Библиографический список**»: Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять от 20 до 30 наименований источников литературы, среди которых от 40 -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 The Harvard system of referencing.

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), год рождения, 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio 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.).

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).

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. Рукописи аспирантов публикуются бесплатно.

Адрес редакционного совета: 367030, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and half-tone (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 the author including electronic copy (1 copy.);
- departmental recommendation for publication on official letterhead (1 copy);
- two reviews by doctors of science; the signature must be certified by the reviewers according to their official academic position;
- cover letter (1 copy for third-party 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 paper should not exceed 9-10 pages of typescript and 5 images or photos.

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

Line with text "**Bibliography**": References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

References should consist of between 20 and 30 items of source literature, including 40–70% 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" or "Harvard" 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: last name, first name and patronymic (in full), year of birth, 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. The manuscripts of graduate students are published free of charge.

Address of the editorial board: pr. Imama Shamilya, 70, Makhachkala, Dagestan, 367030, Dagestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64.

Министерство образования и науки РФ



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 43 – №4 – 2016.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 43, No.4, 2016.

Верстка: Рамазанова Ф.М.

Адрес редакции:

367015, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государствен-
ный технический университет»

Тел./факс(8722)623715
(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Fatima M.Ramazanova

Editorial address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367015, Russia.

FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 24.12.2016 г. Сдано в печать 29.12.2016г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 27,06 Уч. изд.л. 26,55

Заказ № 359

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.