

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 44, №4, 2017.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Volume 44, No.4, 2017.

HERALD

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

Журнал основан в 1997 году.
Выходит 4 раза в год

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

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека).

Журнал включен в российские и международные открытые репозитории научной информации; подключен к международной системе библиографических ссылок и находится в директории журналов открытого доступа: CrossRef; Google Scholar; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Соционет, КиберЛенинка.

© Учредитель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2017.

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

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

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

© Founder Daghestan State Technical University, 2017.

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 44, №4, 2017

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, зав.кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

Андреев В.И., д.т.н., профессор, зав.кафедрой Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, 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, зав.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., профессор Азербайджанского государственного экономического университета, г. Баку, Азербайджанская республика.

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

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

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

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

Казачек В.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института жилища - НИПТИС им. Атаева С.С., директор ООО «Мобильная диагностика в строительстве», г. Минск, Республика Беларусь.

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, директор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Россия.

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

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

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

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

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

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

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.

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

Оборин М.С., д.э.н., профессор Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Россия.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия.

Сопредседатели:

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

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

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

Члены редакционного совета

Бабанлы М.Б.-О., д.т.н., профессор, ректор Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская республика.

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

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

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

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 44, №4 Махачкала, 2017 – 240с.

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

Адрес учредителя:
367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».
Тел./факс: 8722)623715; (8722)623964
e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru
Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕХАНИКА 8

Агаханов Э.К., Магомедэминов Н.С., Раджабов Р.Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИТНОМ ИЗДЕЛИИ СТАНДАРТНЫМ
ОПТИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛОМ 8

Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А.

ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ЗЕНКЕР-
МЕТЧИК 19

Злобина И.В., Морозов Д.В., Павлов С.П.

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ
ВОЛОКНАМИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 29

Петровский В.А., Рубан А.Р., Саламех А.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС 40

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ 49

Бекренев Н.В., Луков Д.В.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 49

Лобанов И.Е.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСРЕДНЁННОГО ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ТРУБ С ШЕРОХОВАТЫМИ
СТЕНКАМИ И ШЕРОХОВАТЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛОВ С ОДНОСТОРОННИМ ТЕПЛОВЫМ
НАГРУЖЕНИЕМ 58

Хураמיшина Р.А.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО
НАГНЕТАТЕЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ 72

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 87

Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И.

ЗАВИСИМОСТЬ ОШИБОК В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ОТ
МЕТОДОВ РАСЧЕТА (СФЕР И ГИПЕРБОЛОИДОВ) 87

Дровникова И.Г., Змеев А.А., Попов А.Д., Rogozin E.A.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАЛИЗАЦИИ
СЕТЕВЫХ АТАК В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 99

Лосев А.С.

БУТСТРЕП МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ
ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ 114

Силенок Ю.В., Яковлев В.Л. МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ	122
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	132
<i>Агаханова К.М.</i> РАЗДЕЛЕНИЕ ВЫТЯЖНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ЗОНЫ В ЖИЛЫХ ДОМАХ	132
<i>Жильникова Т.Н., Корянова Ю.И., Несветаев Г.В.</i> ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТВЕРДЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕТОНОВ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ С ДВУХСТАДИЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В ВОДЕ	141
<i>Инжуматов И.С., Мезенцев В.В., Назиров Р.А., Рожков А.Ф., Хованский М.Е.</i> ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГВОЗДЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	151
<i>Кравчук В. Ю., Рымаров А. Г.</i> СИСТЕМА РЕВЕРСИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЙ	161
<i>Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К.</i> СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКСЕЛЕРОГРАММ РЕАЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	170
<i>Оцоков К.А.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕКУЧЕСТИ СМЕСИ НА СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА НА МЕСТНОМ СЫРЬЕ	184
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	194
<i>Абдулхаликова П.А., Павлюченко Е.И.</i> ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЛИЗИНГОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	194
<i>Иванов Н.А., Кожушкина И.В., Оборин М.С., Шерешева М.Ю.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ВЗАИМОВЫГОДНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ И РАЙОННЫХ ЦЕНТРОВ	207
<i>Разаханова Ф.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЫНКЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ	223
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	234

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. V o l u m e 4 4 , N o . 4 , 2 0 1 7 .

<p>Editor-in-Chief: Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia.</p> <p>Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia.</p> <p>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. Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, 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. Mushfiq E. Guliev, Doctor of Economics, Professor, Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan. Alexey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia. Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia. 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. Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus. Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, Professor, Director Institute of Nanoengineering in Electronics, Spintronics and Photonics National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia. Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland. Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia. Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia. Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia. Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia. Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia. Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Rizwan G. Mitarov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Gregor V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. Matvey S. Oborin, Doctor of Economics, Professor, Perm State University, Perm, Russia. Elena I. Pavlyuchenko, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Evgenii A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia. Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia. Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia. Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. Yousuf N. Emirov, Doctor of Physics and Mathematics, research associate, Nanotechnology Research and Education Center, University of South Florida, USA.</p> <p align="center">Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p align="center">The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia. Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia. Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia.</p> <p align="center">Members of the editorial Board Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan. Islam I. Dianzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan. Vvacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia. Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p>	<p>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>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science</p> <p>Volume 44, No.4 Makhachkala, 2017 –240p.</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 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>
--	---

CONTENTS

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE

MECHANICS 8

Elifkhan K. Agakhanov, Nazhmudin S. Magomedeminov, Rustam G. Radzhabov

STRESS MODELING IN COMPOSITE PRODUCTS USING STANDARD OPTICALLY SENSITIVE MATERIAL 8

Nurulla M. Vagabov, Ali Z. Kurbanov, Marina A. Magomedova

INDUSTRIAL APPROBATION OF COMBINED COUNTERSINK-TAP TOOL 19

Irina V. Zlobina, Danila V. Morozov, Sergey P. Pavlov

VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS REINFORCED BY CARBON FIBRES 29

Valeri A. Petrovsky, Anatoliy R. Ruban, Ali Salamekh

SOME SAMPLE TEST RESULTS FOR ABRASIVE WEAR 40

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING 49

Nikolaj V. Bekrenev, Dmitriy Yu. Lukov

ULTRASONIC MULTIFREQUENCY GENERATOR FOR ENSURING ULTRASONIC FORMATION OF COMPOSITE MATERIALS 49

Igor' E. Lobanov

REGULARITIES OF THE AVERAGE HEAT EXCHANGE FOR PIPES WITH ROUGH WALLS AND ROUGH FLAT CHANNELS UNDER ONE-SIDED THERMAL LOADING..... 58

Regina A. Khuramshina

PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF THE CENTRIFUGAL SUPERCHARGER'S TECHNICAL CONDITION DURING OPERATION 72

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT 87

Gaidarbek K. Aslanov, Tagirbek G. Aslanov, Kurbanmagomed D. Kurbanmagomedov, Boris I. Shakhtarin
INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATE DETERMINATION ERRORS ON CALCULATION METHODS (SPHERES AND HYPERBOLOIDS) 87

Irina G. Drovnikova, Anatoly A. Zmeev, Anton D. Popov, Evgenii A. Rogozin

METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE PROBABILITY-TIME CHARACTERISTICS OF NETWORK ATTACKS IN THE SIMULATION MODELLING SOFTWARE ENVIRONMENT 99

Alexsandr S. Losev

BOOTSTRAPPING METHODS FOR CONSTRUCTING CONFIDENCE INTERVALS FOR THE ESTIMATION OF MODEL PARAMETERS OF THE ZONAL DISINTEGRATION OF ROCKS AROUND UNDERGROUND EXCAVATIONS 114

Yuri V. Silenok, Vadim L. Yakovlev

METHODOLOGY OF EVALUATING THE EFFICIENCY OF INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN THE MANAGEMENT OF COMPLEX DYNAMIC OBJECTS 122

BUILDING AND ARCHITECTURE	132
<i>Kaminat M. Agakhanova</i> ZONING OF EXHAUST GRAVITATIONAL VENTILATION SYSTEMS IN RESIDENTIAL BUILDINGS	132
<i>Tatjana N. Zhilnikova, Yulia I. Koryanova, Grigory V. Nesvetaev</i> EFFECT OF HARDENING TIME ON DEFORMATION-STRENGTH INDICATORS OF CONCRETE FOR INJECTION WITH A TWO-STAGE EXPANSION DURING HARDENING IN WATER	141
<i>Ivan S. Inzhutov, Vladislav V. Mezentsev, Rashit A. Nazirov, Alexander F. Rozhkov, Maxim E. Khovansky</i> THE INFLUENCE OF THE MOISTURE CONTENT OF WOOD ON THE STRENGTH PROPERTIES OF NAILED CONNECTIONS	151
<i>Valery Yu. Kravchuk, Andrey G. Rymarov</i> REVERSIBLE VENTILATION SYSTEM FOR ADMINISTRATIVE BUILDINGS	161
<i>Khairulla M. Muselemov, Osman M. Ustarkhanov, Abusupyan K. Yusupov</i> STATISTICAL ANALYSIS OF ACCELEROGRAMS OF REAL STRONG EARTHQUAKES	170
<i>Kamil A. Otsokov</i> EFFECT OF WATER-CEMENT RATIO ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE MADE OF LOCAL RAW MATERIALS	184
ECONOMIC SCIENCE	194
<i>Patimat A. Abdulkhalikova, Elena I. Pavlyuchenko</i> DEVELOPMENT FEATURES OF LEASING RELATIONS IN CONSTRUCTION	194
<i>Nikolay A. Ivanov, Irina V. Kozhushkina, Matvey S. Oborin, Marina Yu. Sheresheva</i> METHODOLOGY FOR FORMING MUTUALLY BENEFICIAL NETWORK INTERACTION BETWEEN SMALL CITIES AND DISTRICT CENTRES	207
<i>Fatima M. Razakhanova</i> ISSUES CONCERNING IMPORT SUBSTITUTION OF BUILDING MATERIALS IN THE CONSTRUCTION MARKET	223
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	234

Для цитирования: Агаханов Э.К., Магомедэминов Н.С., Раджабов Р.Г. Моделирование напряжений в композитном изделии стандартным оптически чувствительным материалом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):8-18. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-8-18

For citation: Agakhanov E.K., Magomedeminov N.S., Radzhabov R.G. Stress modeling in composite products using standard optically sensitive material. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(4):8-18. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-8-18

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621. 923

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-8-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИТНОМ ИЗДЕЛИИ СТАНДАРТНЫМ ОПТИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Агаханов Э.К.¹, Магомедэминов Н.С.², Раджабов Р.Г.³

¹⁻³Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: elifhan@bk.ru, ²e-mail: nazhmudin@mail.ru, ³e-mail: asf_smik_dgtu@mail.ru

Резюме. Цель. Рассматривается вопрос физического моделирования напряжений в составном объемном теле вращения сложной формы при сложном распределении нагрузок. Согласно критериям подобия, напряжения, деформации и перемещения от объемных сил снижаются пропорционально масштабу подобия геометрических размеров, что усложняет их прямое моделирование методом фотоупругости с использованием моделей из широко применяемых эпоксидных материалов. **Метод.** На основании принципа независимости действия сил исходная задача представлена в виде суммы двух задач. В первой однородной задаче напряжения в теле вращения от центробежных сил моделируются обычным методом «замораживания». Для решения второй неоднородной задачи производится «замораживание» напряжений в области модели, соответствующих действующим в ней центробежным силам. При комнатной температуре к ней приклеиваются модели, находящиеся в естественном состоянии, и производится «отжиг» составленной модели. **Результат.** Получены картины полос в срезах и компоненты радиальных, тангенциальных и осевых напряжений на контурах в сечениях моделей методами нормального просвечивания и численного интегрирования уравнения равновесия. По критериям моделирования установлена формула перехода от напряжений в моделях к напряжениям в натурной конструкции. Получены результаты анализа влияния соотношения плотностей материалов, из которых составлено тело, на напряженное состояние всей конструкции.

Вывод. Осевые напряжения по сравнению с радиальными и тангенциальными имеют незначительную величину, кроме того, отношение плотностей составного тела оказывает как количественное, так и качественное влияние на напряженное состояние конструкции.

Ключевые слова: физическое моделирование, напряжения, составное объемное тело вращения, центробежные силы, метод фотоупругости, метод «замораживания»

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

STRESS MODELING IN COMPOSITE PRODUCTS USING STANDARD
OPTICALLY SENSITIVE MATERIAL

*Elifkhan K. Agakhanov*¹, *Nazhmudin S. Magomedeminov*², *Rustam G. Radzhabov*³

¹⁻³Daghestan State Technical University,

¹⁻³70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: elifhan@bk.ru, ²e-mail: nazhmudin@mail.ru, ³e-mail: asf_smik_dgtu@mail.ru

Abstract. Objectives The problem of physically modelling stresses in a compound solid body of revolution having a complex shape and with a complex load distribution is considered. According to the similarity criteria of stress, deformations and displacements from the volume forces decrease proportionally to the scale of similarity of geometric dimensions, which complicates their direct modelling by the photoelasticity method typically using models made from epoxy materials. **Methods** Based on the principle of the independent action of the forces, the initial problem is represented as the sum of two problems. In the first uniform problem, the stresses in the body of revolution from the centrifugal forces are simulated by the conventional “freezing” method. In order to solve the second nonuniform problem, the stresses in the region of the model, corresponding to the acting centrifugal forces, are “frozen”. The models are glued in a natural state at room temperature, and the compound model is annealed. **Results** The band patterns in sections as well as components of radial, tangential and axial stresses on contours and in sections of models are obtained by the methods of normal transmission and numerical integration of the equilibrium equation. According to the modelling criteria, the formula for the transition from stresses in models to stresses in the natural structure is established. The results of the analysis of the effect of a body's material density ratio on the stress state of the entire structure are obtained. **Conclusion** Axial stresses have insignificant value as compared to radial and tangential stresses; in addition, the ratio of the densities of the compound body has both a quantitative and qualitative influence on the stress state of the structure.

Keywords: physical modelling, stresses, compound solid body of revolution, centrifugal forces, photoelasticity method, “freezing” method

Введение. Моделирование задач механики деформируемого твердого тела осуществляется с помощью критериев подобия, на основании которых составляется модель, определяются условия нагружения, и осуществляется переход от замеренных на модели величин к соответствующим величинам натурной конструкции [1-5].

Множители подобия напряжений $K_\sigma(t)$, деформаций $K_\varepsilon(t)$, перемещений $K_u(t)$, геометрических размеров K_L , объемных сил $K_F(t)$ и модуля упругости K_E при моделировании задач теории ползучести и задач теории упругости (в задачах теории упругости множители подобия становятся постоянными коэффициентами, т. е. масштабами подобия) связаны соотношениями [6]:

$$\frac{K_L K_F(t)}{K_\sigma(t)} = 1, \quad \frac{K_L K_F(t)}{K_\varepsilon(t) K_E} = 1, \quad \frac{K_L^2 K_F(t)}{K_u(t) K_E} = 1. \quad (1)$$

Из соотношений (1) следует, что напряжения, деформации и перемещения от объемных сил снижаются пропорционально масштабу подобия геометрических размеров. Эта особенность усложняет прямое моделирование даже самого простого вида объемных сил (массовых сил) методом фотоупругости с использованием моделей из широко применяемых эпоксидных материалов.

Общие методы исследования напряжений и деформаций обычно регистрируют их с не-

достаточной чувствительностью. При моделировании задач с разными характеристиками ν, E, γ, α в областях тела, в отличие от задач, когда они в области всего тела имеют постоянную величину, требуется соблюдение дополнительных соотношений между множителями подобия (масштабами) [17]:

$$\begin{aligned}K_{\nu 1} &= K_{\nu 2} = \dots = K_{\nu n} = 1, \\K_{E1} &= K_{E2} = \dots = K_{En}, \\K_{F1}(t) &= K_{F2}(t) = \dots = K_{Fn}(t), \\K_{\alpha \Delta T} &= 1 \quad K_{\alpha 1} = K_{\alpha 2} = \dots = K_{\alpha n},\end{aligned}\tag{2}$$

где: n – число областей с разными характеристиками.

Эти условия создают некоторые ограничения и трудности при использовании традиционных приемов. Они связаны с тем, что возможности получения оптически активных материалов с разными характеристиками ограничены [3, 11].

Определенные возможности для решения таких задач открываются с использованием свойств полимеров, проявляемых в процессе полимеризации (методы полимеризации, стесненной усадки и фиксации температурных напряжений) [16]. Кроме того, разрабатываются методы, специально предназначенные для определения напряжений от действия механических нагрузок и температуры на моделях из стандартного оптически чувствительного материала в задачах с разными характеристиками в областях тела [1, 5, 7, 10, 18]. Сюда же примыкает метод механического моделирования температурных напряжений [2] и метод изучения напряжений на вязкоупругих моделях [19].

Учитывая наличие этих методов, позволяющих получать эффективные решения, при рассмотрении задачи на действие объемных сил прием равенство характеристик ν, E, α в областях тела.

Постановка задачи. В инженерной практике, особенно в машиностроении, все больше находят применение составные (композитные) конструкции (изделия), составленные из материалов с разными объемными массами [9].

В ранее проведенных экспериментальных исследованиях авторы ограничивались однородными вращающимися телами [13,15]. Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния составных конструкций сводится к решению сложных систем дифференциальных уравнений в частных производных, прямое решение которых связано с большими математическими трудностями [4, 8, 12, 21-23].

Таким образом, в настоящее время многие практически важные задачи для составных объемных тел не могут быть решены только теоретическим путем. В первую очередь к ним следует отнести определение напряженно-деформированного состояния составных конструкций сложной формы и при сложном распределении нагрузок [14, 20].

Методы исследования. Рассмотрим объемное тело вращения, составленное из двух материалов с плотностями ρ_1 и ρ_2 (рис. 1).

Данная составная конструкция вращается с угловой скоростью $\omega_{\text{нат}}$ и находится под действием объемных центробежных сил

$$F_x = \rho_1 \omega_n^2 x, \quad F_y = \rho_1 \omega_n^2 y, \quad F_z = 0 \quad \text{в } V_1,\tag{3}$$

$$F_x = \rho_2 \omega_n^2 x, \quad F_y = \rho_2 \omega_n^2 y, \quad F_z = 0 \quad \text{в } V_2.\tag{4}$$

Решение исходной задачи, используя принцип независимости действия сил, представим в виде суммы двух задач:

1. Во всей области составного тела ($v=v_1+v_2$) действуют объемные силы

$$F_x = \rho_2 \omega_{\text{нат}}^2 x, \quad F_y = \rho_2 \omega_{\text{нат}}^2 y, \quad F_z = 0 \quad \text{в } V.\tag{5}$$

2. Составное тело находится под действием объемных сил

$$F_x = (\rho_1 - \rho_2)\omega_{нат}^2 x, F_y = (\rho_1 - \rho_2)\omega_{нат}^2 y, F_z = 0 \quad \text{в } V_1, \quad (6)$$

$$F_x = F_y = F_z = 0 \quad \text{в } V_2 \quad (7)$$

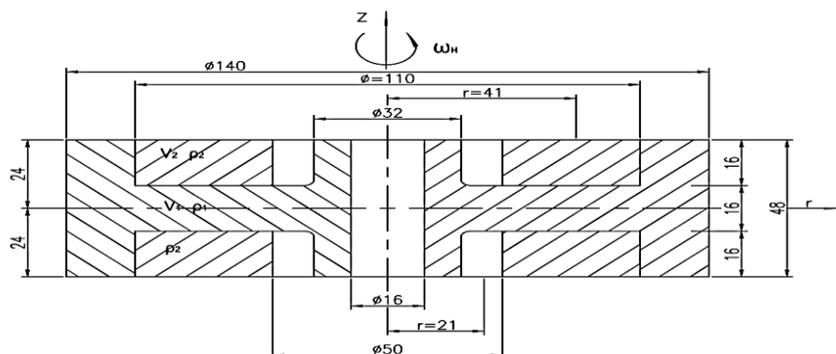


Рис. 1. Составное тело вращения под действием центробежных сил
 Fig. 1. Composite body of rotation under the action of centrifugal forces

При моделировании этих задач используется стандартный оптически чувствительный материал с характеристиками:

$$T_{зам} = 130^{\circ}C, E_{зам} = 20,0 \text{ МПа}, \nu_{зам} = 0,5, \sigma_{0зам}^{(1,0)} = 0,046 \text{ МПа}.$$

Напряжения в однородном теле вращения от центробежных сил в первой задаче моделируются обычным методом: в модели области V при вращении с угловой скоростью $\omega_{мод}$ производится «замораживание» напряжений, соответствующих искомому.

Для решения второй задачи в модели области V_1 производится «замораживание» напряжений, соответствующих действующим в ней центробежным силам. Далее к модели области V_1 при комнатной температуре приклеиваются модели области V_2 , находящиеся в естественном состоянии, и производится «отжиг» составленной модели.

На рис. 2 представлены картины полос в меридиональных срезах моделей при нормальном просвечивании.

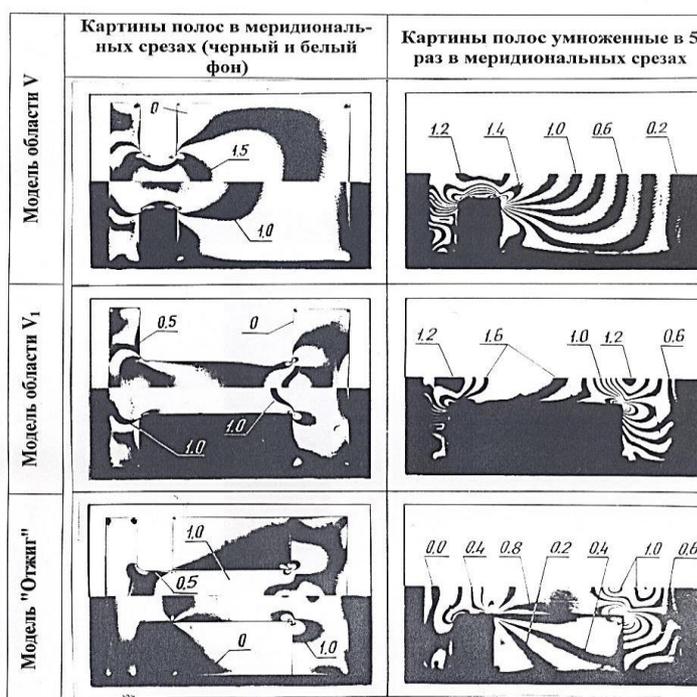


Рис. 2. Картины полос при нормальном просвечивании
 Fig 2. Samples of bands with normal X-ray radiation

Методами нормального просвечивания срезов и численного интегрирования уравнения равновесия вдоль оси z были получены компоненты радиальных σ_r , тангенциальных σ_θ и осевых σ_z напряжений на контурах и в двух сечениях моделей. Эпюры напряжений в моделях показаны на рис. 3-5.

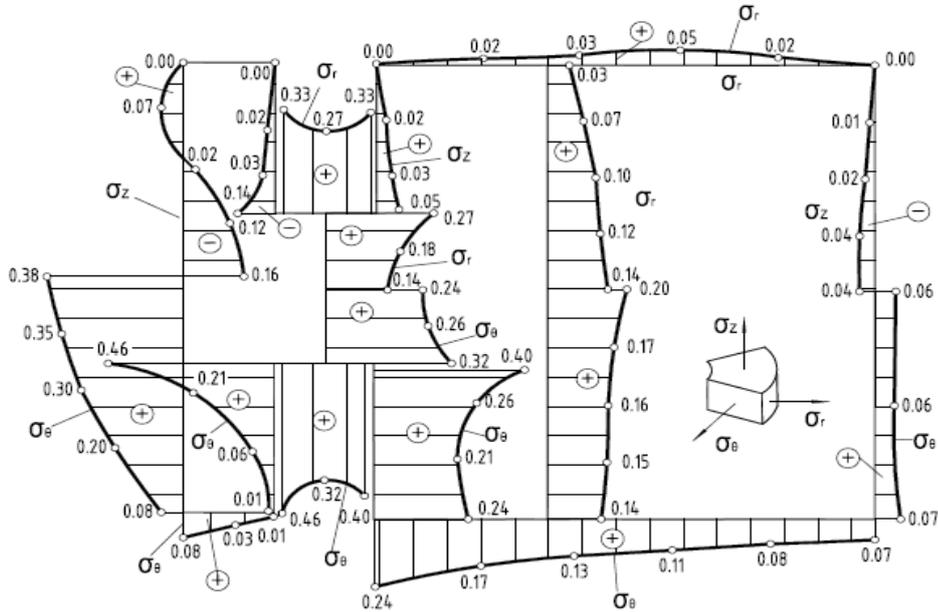


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_r , σ_θ и σ_z [МПа] в модели области V

Fig. 3. Stress diagrams, σ_r , σ_θ and σ_z [MPa] in the region V

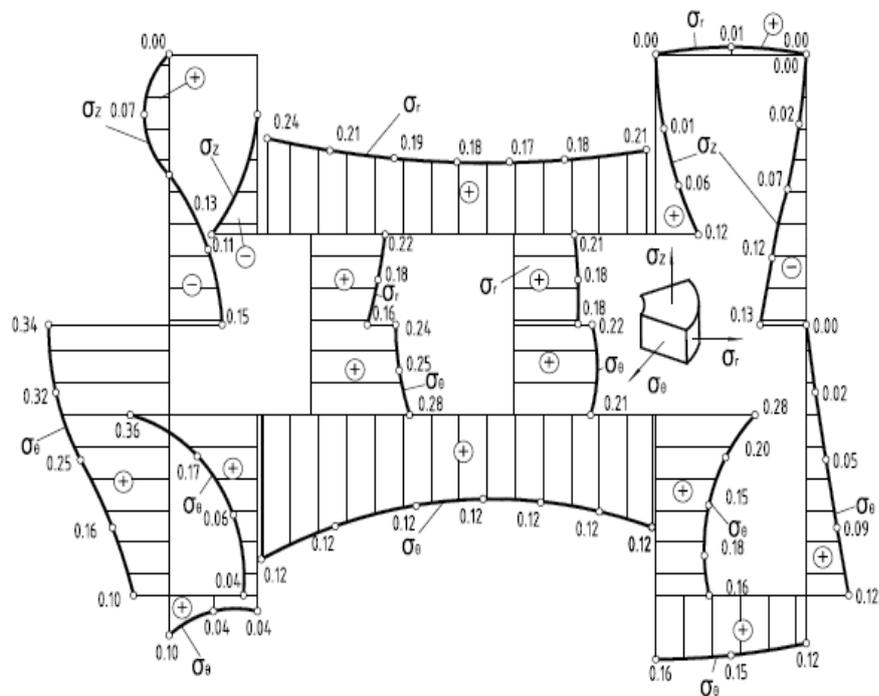


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_r , σ_θ и σ_z [МПа] в модели области V₁

Fig. 4. Stress patterns σ_r , σ_θ and σ_z [MPa] in the region model V₁

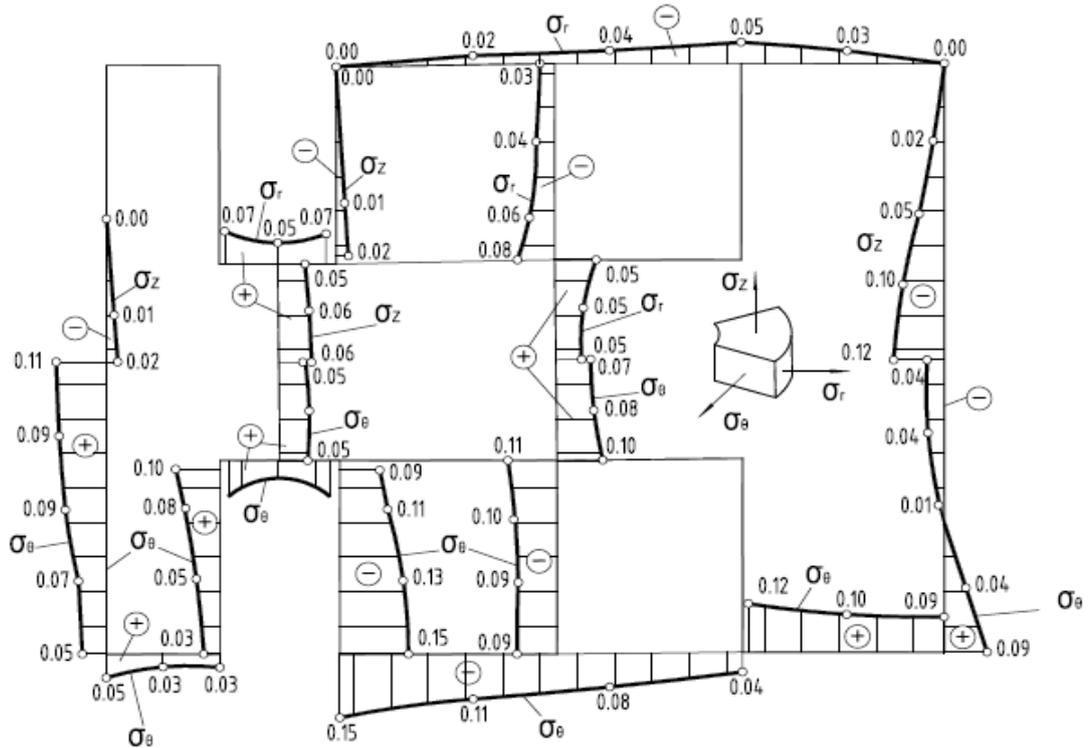


Рис. 5. Эпюры напряжений σ_r , σ_θ и σ_z [МПа] в модели, составленной из областей V_1 и V_2 , после отжига

Fig. 5. Stress diagrams σ_r , σ_θ and σ_z [MPa] in the model, composed of regions V_1 and V_2 , after annealing

Согласно критериям моделирования объемной статической упругой задачи получаем формулу перехода от напряжений в моделях к напряжениям в натурной конструкции:

$$\sigma_{ij}^{(нат)} = K_\omega^2 K_\rho K_l \left[K \sigma_{ij}^{(мод)} + (1-K) \left(\overset{-(мод)}{\sigma_{ij}} - \overset{=(мод)}{\sigma_{ij}} \right) \right], \quad (8)$$

где: $K_\omega = \frac{\omega_{нат}}{\omega_{мод}}$, $K_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_{мод}}$, $K_l = \frac{l_{нат}}{l_{мод}}$, $K = \frac{\rho_2}{\rho_1}$;

$\overset{=(мод)}{\sigma_{ij}}$ – напряжения в модели области V;

$\overset{-(мод)}{\sigma_{ij}}$ – напряжения в модели области V_1 ;

$\overset{=(мод)}{\sigma_{ij}}$ – напряжения в модели, составленной из областей V_1 и V_2 , после отжига.

Обсуждение результатов. Проведенные экспериментальные исследования позволяют анализировать влияние соотношения плотностей материалов, из которых составлено тело, на напряженное состояние всей конструкции.

Результаты анализа представлены на рис. 6 и 7.

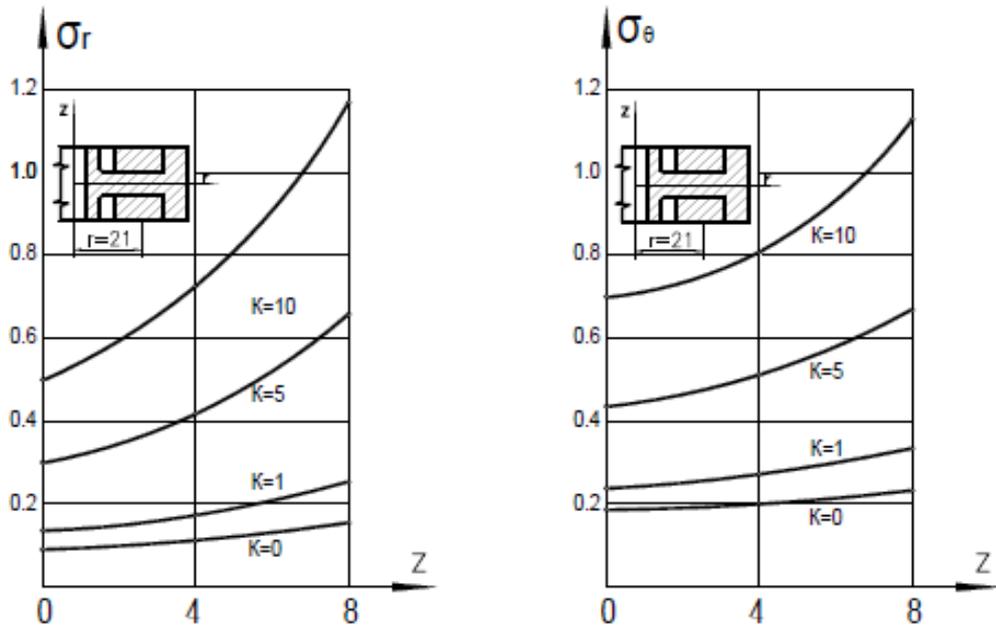


Рис. 6. Влияние параметра $K = \rho_2 / \rho_1$ на напряжения σ_r и σ_θ [МПа] в сечении $r = 21$ в долях $K_\omega^2 K_\rho K_\ell$

Fig. 6. Effect of the parameter $K = \rho_2 / \rho_1$ on the voltage σ_r and σ_θ [MPa] in section $r = 21$ in fractions $K_\omega^2 K_\rho K_\ell$

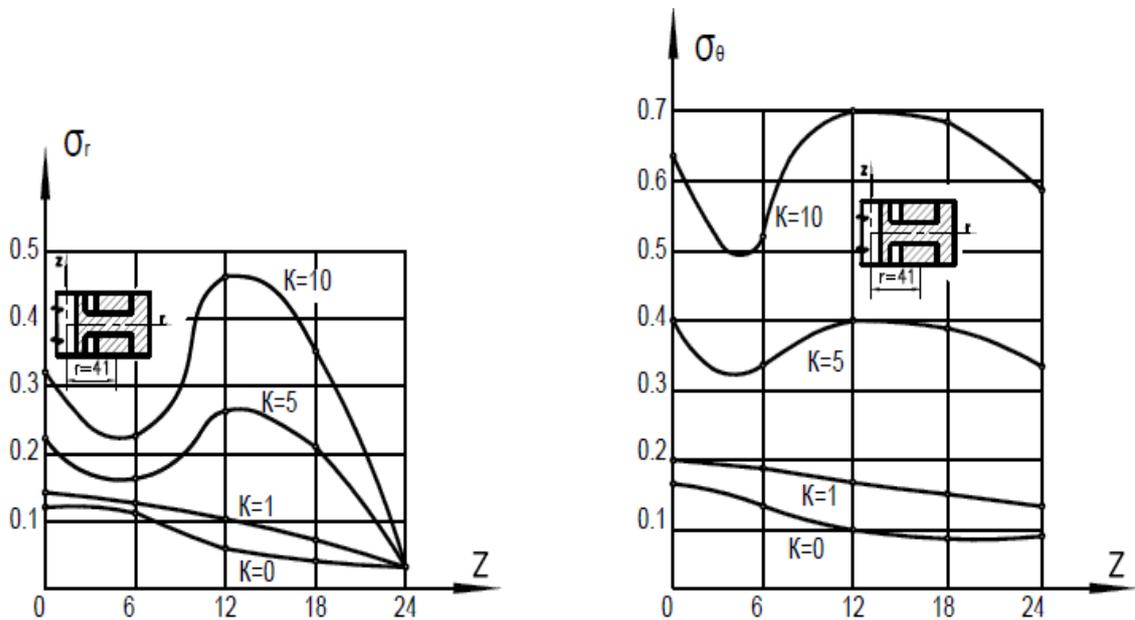


Рис. 7. Влияние параметра $K = \rho_2 / \rho_1$ на напряжения σ_r и σ_θ [МПа] в сечении $r = 41$ в долях $K_\omega^2 K_\rho K_\ell$

Fig. 7. Effect of the parameter $K = \rho_2 / \rho_1$ on the voltage σ_r and σ_θ [MPa] in section $r = 41$ in fractions $K_\omega^2 K_\rho K_\ell$

Для рассмотренной конструкции результаты исследования показали:

- напряжения σ_z по сравнению с σ_r и σ_θ имеют незначительную величину;
- отношение плотностей составного тела оказывает как количественное, так и качествен-

ное влияние на напряженное состояние конструкции.

Следовательно, изменяя соотношение плотностей частей составного тела, т.е. подбирая материалы с различными объемными массами, можно изменять величину и распределение напряжений в том или ином сечении конструкции, что представляет большой практический интерес.

Предположим, что в рассматриваемой составной конструкции требуется, чтобы в точках контура, лежащих на стыке двух материалов, не возникали растягивающие радиальные напряжения.

Растягивающих радиальных напряжений можно избежать соответствующим выбором отношения плотностей K .

Предположив, что в формуле (8) $\sigma_r^{(нам)} = 0$, получим уравнение

$$K_{\omega}^2 K_{\rho} K_l \left[K \sigma_r^{(mod)} + (1-K) \left(\overline{\sigma_r^{(mod)}} - \sigma_r^{(mod)} \right) \right] = 0, \quad (9)$$

из которого, при известных в результате эксперимента величинах $\sigma_r^{(mod)}$, $\overline{\sigma_r^{(mod)}}$ и $\sigma_r^{(mod)}$, и $K_{\omega}^2 K_{\rho} K_l \neq 0$, найдем

$$0,4K + 0,5(1-K) = 0$$

$$K=5$$

Таким образом, при $K \geq 5$ растягивающих радиальных напряжений в точках контура, лежащих на стыке двух материалов, не будет.

Вывод. Поскольку с изменением отношений плотностей частей составного тела происходят существенные изменения, как в величинах, так и в распределении напряжений, то при исследовании подобных конструкций необходимо учитывать неравенство объемных масс материалов составного тела.

Библиографический список:

1. Абдулалиев З.Э. Определение температурных напряжений в деталях из нескольких материалов. Заводская лаборатория. 1970, № 3, с. 347-349.
2. Абдулалиев З.Э., Пригоровский Н.И. Поляризационно-оптические исследования термоупругих напряжений в конструкциях из материалов с различными коэффициентами температурного расширения, Методы исследования напряжений в конструкциях. Под ред. Н. И. Пригоровского, М., 1976, с. 93-104.
3. Бляхман Е.М., Евстифорова А.К. Получение разномодульных материалов путем модификации эпоксидно-диановых смол алифатическими эпоксидными смолами. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, под ред. С.П. Шихобалова, Л. 1966, с. 121-125.
4. Божкова Л.В., Дзю Иун-шуй, Невельская Т.П. Смешанная задача теории упругости для трехслойной кольцевой области, Теор. и эксперим. исслед. прочн. и жесткости элементов строит. конструкций, Моск. гос. строит. ун-т, М., 1997, с. 54-58.
5. Варданыан Г.С., Гетрик В.И. О моделировании кусочно-однородных задач теории упругости поляризационно-оптическим методом//VIII Всесоюз. конф. по методу фотоупругости, Таллин, 1979, с. 33-37.
6. Варданыан Г.С. Прикладная механика: применение методов теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики деформируемого твердого тела, Учебное пособие, - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 174 с.
7. Варданыан Г.С., Фриштер Л.Ю. О моделировании одного класса кусочно-однородных задач теории упругости, Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1985, № 6, с. 3-10.
8. Василенко А.Т., Клименко Н.И. Исследование напряженного состояния вращающихся неоднородных анизотропных цилиндров, Прикл. мех. (Киев), 1999, 35, № 8, с. 29-34.
9. Клименко Н.И. Решение задач о напряженном состоянии вращающихся неоднородных в окружном направлении анизотропных полых цилиндров. Прикл. мех., Киев, 1999, 35, №12, с. 56-62.
10. Койнаш Ю.А., Котов Б.П. Моделирование разномодульных конструкций методом радиационной тени. Тр. ин-та, МИСИ, 1976, № 137, с.56-60.
11. Маршалкович А.С., Щелканов И.В., Пятышев Л.В., Дегтярева А.А. Разработка разномодульных эпоксид-

- ных полимерных материалов для моделирования композитных конструкций, Тр. ин-та, МИСИ, 1987, с. 156-163.
12. Олегин И. П. Решение некоторых классов задач теории упругости для тел вращения методом суперпозиций, Научн. вестник Новосиб. гос. тех. ун-т, 1996, №2, с. 57-67.
 13. Прейсс А.К., Граненко Ф.А. Применение метода «замораживания» к определению напряжений на вращающихся моделях, Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, Под ред. Н. И. Пригоровского, М., 1956, с. 271-279.
 14. Рябенков Н.Г. О выполнении условий свободной границы торца связующего в теории слоистых конструкции//Матер. 4-го Междунар. Симпозиума, Дин.и техно. Проблемы механики конструк. и сплошнх сред. Ярополец, 16-18 февр., 1998, М., 1998, с. 21-22.
 15. Сивчиков Б.Е. Исследование напряжений поляризационно-оптическим методом во вращающейся лопатке осевого компрессора. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, Под ред. С. П. Шихобалова, Л., 1960, с.332-340.
 16. Ушаков Б. Н. Исследование напряжений в композитных конструкциях, VIII Всесоюз. конф. по методу фотоупругости, Таллин. 1979, с. 283-290.
 17. Ушаков Б.Н., Фролов И.П. Напряжения в композитных конструкциях, М., Машиностроение, 1979, 134 с.
 18. Фриштер Л.Ю., Савостьянов В.Н. О представлении кусочно-однородной задачи теории упругости в виде суммы однородных задач, Вопросы математики, механики сплошнх сред и применения математических методов в строительстве, Сб. научн. тр. МГСУ, Москва, 1999, с. 169-178.
 19. Хесин Г.Л., Варданыан Г.С., Мовила Н.И. Моделирование напряженного состояния конструкций из разномодульных материалов на вязкоупругих моделях, Тр. ин-та, МИСИ, 1975, Вып. 125-126, с. 81-89.
 20. Шкелев Л.Т., Одионец Е.А. Приближенный метод решения пространственной задачи теории упругости, Киевск. нац. Ун-т стр-ва и архит., Киев, 1999, 8с., Деп. в ГНТБ Украины 26.07.99, №212-Ук. 99.
 21. Ashida Fumihiko, Tauchert Theodore. Control of a distribution of transient thermoelastic displacement in a composite circular disk, R. ISTAM, 2000, 20th, Intern. cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug.-2 Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, с. 166.
 22. Bossavit A. On the computation of strains and stresses in symmetrical articulated structures, Exploit. Symmetry Appl. and Numer. Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, с. 111-123.
 23. Jain Rajeev, Ramachandra K., Simha K.R.Y. Rotating anisotropic disc of uniform strength, Int. J. Mech., Sci., 1999, 41, №6, с. 639-648.

References:

1. Abdulaliev Z.E. Opredelenie temperaturnykh napryazhenii v detalyakh iz neskol'kikh materialov. Zavodskaya-laboratoriya. 1970; 3:347-349. [Abdulaliev Z.E. Determination of temperature stresses in details made of several materials. Industrial laboratory. 1970;3:347-349. (In Russ.)]
2. Abdulaliev Z.E., Prigorovskii N.I. Polyarizatsionno-opticheskie issledovaniya termouprugikh napryazhenii v konstruktivnykh iz materialov s razlichnymi koefitsientami temperaturnogo rasshireniya. Metody issledovaniya napryazhenii v konstruktivnykh (Pod red. N. I. Prigorovskogo). M.; 1976. S. 93-104. [Abdulaliev Z.E., Prigorovskii N.I. Polarisation-optical investigations of thermoelastic stresses in structures made of materials with different coefficients of thermal expansion. Methods for studying stresses in constructions. (Ed. N.I. Prigorovskii). Moscow; 1976. P. 93-104. (In Russ.)]
3. Blyakhman E.M., Evstiforova A.K. Poluchenie raznomodul'nykh materialov putem modifikatsii epoksidno-dianovykh smol alifaticeskimi epoksidnymi smolami. Polyarizatsionno-opticheskii metod issledovaniya napryazhenii (Pod red. S.P. Shikhobalova). L.; 1966. С. 121-125. [Blyakhman E.M., Evstiforova A.K. Preparation of different-modular materials by modification of epoxy-diane resins with aliphatic epoxy resins. Polarisation-optical method for studying stresses (Ed. S.P. Shikhobalov). L.; 1966. С. 121-125. (In Russ.)]
4. Bozhkova L.V., Dzyulun-shui, Nevel'skaya T.P. Smeshannaya zadacha teorii uprugosti dlya trekhslonoinol'tsevoiblasti. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i zhestkosti elementov stroitel'nykh konstruktiv. M.: Moskovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet; 1997. S. 54-58. [Bozhkova L.V., Dzyulun-shui, Nevel'skaya T.P. Mixed problem of the theory of elasticity for a three-layer annular region. Theoretical and experimental studies of the strength and rigidity of structural elements. Moscow: State University of Civil Engineering; 1997. P. 54-58. (In Russ.)]
5. Vardanyan G.S., Getrik V.I. O modelirovanii kusochno-odnorodnykh zadach teorii uprugost i polyarizatsionno-opticheskim metodom. VIII Vsesoyuznaya konferentsiya po metodu fotouprugosti. Tallin; 1979. S. 33-37. [Vardanyan G.S., Getrik V.I. On the simulation of piecewise-homogeneous problems of the theory of elasticity by the polarisation-optical method. The Proceedings of VIII All-Union Conference on the photoelasticity method. Tallin; 1979. P. 33-37. (In Russ.)]
6. Vardanyan G.S. Prikladnaya mekhanika: primeneniye metodov teorii podobiya i analiza razmernosti k modelirovaniyu zadach mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela. Uchebnoeposobie. M.: NITs INFRA-M; 2016. 174 s. [Vardanyan G.S. Applied mechanics: application of methods of similarity theory and analysis of dimensions to modelling problems of mechanics of a deforming solid. Tutorial. M.: NITs INFRA-M; 2016. 174 p. (In

- Russ.)]
7. Vardanyan G.S., Frishter L.Yu. O modelirovaniy odnogo klassa kusochno-odnorodnykh zadach teorii uprugosti. *Izv. AN Arm. SSR. Mekhanika*. 1985; 6:3-10. [Vardanyan G.S., Frishter L.Yu. On the modelling of a class of piecewise-homogeneous problems in the theory of elasticity. *Izv. AN Arm. SSR. Mechanics*. 1985; 6:3-10. (In Russ.)]
 8. Vasilenko A.T., Klimenko N.I. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya vrashchayushchikhsya neodnorodnykh anizotropnykh tsilindrov. *Prikl. mekh. (Kiev)*. 1999; 35(8):29-34. [Vasilenko A.T., Klimenko N.I. Investigation of the stressed state of rotating in homogeneous anisotropic cylinders. *International Applied Mechanics*. 1999; 35(8):29-34. (In Russ.)]
 9. Klimenko N.I. Reshenie zadach o napryazhenom sostoyanii vrashchayushchikhsya neodnorodnykh v okruzhnom napravlenii i anizotropnykh polykh tsilindrov. *Prikl. mekh. (Kiev)*. 1999; 35(12):56-62. [Klimenko N.I. Solution of problems on the stressed state of rotating anisotropic hollow cylinders that are nonuniform in the circumferential direction. *International Applied Mechanics*. 1999; 35(12):56-62. (In Russ.)]
 10. Koinash Yu.A., Kotov B.P., Modelirovanie raznomodul'nykh konstruktсий metodom radiatsionnoy iteni. *Trudy MISI*. 1976; 137:56-60. [Koinash Yu.A., Kotov B.P., Modelling of multimodular structures using the shadow radiation method. *Proceedings of MISI*. 1976; 137:56-60. (In Russ.)]
 11. Marshalkovich A.S., Shchelkanov I.V., Pyatyshev L.V., Degtyareva A.A. Razrabotka raznomodul'nykh epoksidnykh polimernykh materialov dlya modelirovaniya kompozitnykh konstruktсий. *Trudy MISI*. 1987:156-163. [Marshalkovich A.S., Shchelkanov I.V., Pyatyshev L.V., Degtyareva A.A. Development of multimodular epoxy polymeric materials for the modelling of composite structures. *Proceedings of MISI*. 1987:156-163. (In Russ.)]
 12. Olegin I.P. Reshenie nekotorykh klassov zadach teorii uprugosti dlya tel vrashcheniya metodom superpozitsii. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 1996; 2:57-67. [Olegin I.P. Solution of certain classes of problems in the theory of elasticity for bodies of revolution by the superposition method. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 1996; 2:57-67. (In Russ.)]
 13. Preiss A.K., Granenko F.A. Primeneniye metoda «zamorzheniya» k opredeleniyu napryazheniya vrashchayushchikhsya modelyakh. *Polyarizatsionno-opticheskiy i metod issledovaniya napryazhenii* (Pod red. N.I. Prigorovskogo). M.; 1956. C. 271-279. [Preiss A.K., Granenko F.A. Application of the "freezing" method to the determination of stresses on rotating models. *Polarisation-optical method for studying stresses* (Ed. N.I. Prigorovskii). M.; 1956. P. 271-279. (In Russ.)]
 14. Ryabenkov N.G. O vypolnenii uslovii svobodnoy granitsy torsa svyazuyushchego v teorii sloistykh konstruktсий. *Materialy 4-go mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktсий i sploshnykh sred»*. Yaropolets, 1998. S. 21-22. [Ryabenkov N.G. On the fulfillment of the conditions for the free boundary of the end of the binder in the theory of layered structures. *Materials of the 4th international symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media"*. Yaropolets, 1998. P. 21-22. (In Russ.)]
 15. Sivchikov B.E. Issledovanie napryazhenii polyarizatsionno-opticheskim metodom vo vrashchayushcheysya lopatke osevoogo kompressora. *Polyarizatsionno-opticheskiy metod issledovaniya napryazhenii* (Pod red. S. P. Shikhobalova). L.; 1960. C. 332-340. [Sivchikov B.E. Investigation of stresses by the polarisation-optical method in a rotating blade of an axial compressor. *Polarisation-optical method for studying stresses* (Ed. S.P. Shikhobalov). L.; 1960. P. 332-340. (In Russ.)]
 16. Ushakov B.N. Issledovanie napryazhenii v kompozitnykh konstruktсийakh. VIII Vsesoyuznaya konferentsiya po metodu fotouprugosti. Tallin, 1979. S. 283-290. [Ushakov B.N. Investigation of stresses in composite structures. *The Proceedings of VIII All-Union Conference on the photoelasticity method*. Tallin, 1979. P. 283-290. (In Russ.)]
 17. Ushakov B.N., Frolov I.P. Napryazheniya v kompozitnykh konstruktсийakh. M.: Mashinostroenie; 1979. 134 s. [Ushakov B.N., Frolov I.P. Stresses in composite structures. M.: Mashinostroenie; 1979. 134 p. (In Russ.)]
 18. Frishter L. Yu., Savost'yanov V. N. O predstavlenii kusochno-odnorodnoy zadachi teorii uprugosti v vide summy odnorodnykh zadach. *Voprosy matematiki, mekhaniki sploshnykh sred i primeneniya matematicheskikh metodov v stroitel'stve*. Sb. nauchn. tr. MGSU. Moskva. 1999. S. 169-178. [Frishter L. Yu., Savost'yanov V. N. On the representation of a piecewise homogeneous problem of the theory of elasticity in the form of a sum of homogeneous problems. *Problems of Mathematics, Continuum Mechanics, and Mathematical Methods in Construction*. Collection of scientific works of MSCU, Moscow. 1999. P. 169-178. (In Russ.)]
 19. Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya konstruktсий iz raznomodul'nykh materialov na vyazkouprugikh modelyakh. *Trudy MISI*. 1975; (125-126):81-89. [Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. Modelling of the stressed state of constructions from different modular materials by viscoelastic models. *Proceedings of MISI*. 1975; (125-126):81-89. (In Russ.)]
 20. Shkelev L.T., Odinet E.A. Priblizhennyy metod resheniya prostranstvennoy zadachi teorii uprugosti. *Kievskiy inatsional'nyi Universitet stroitel'stva i arkhitektury*. Kiev; 1999, 8 s., Dep. v GNTB Ukrainy 26.07.99, №212-Uk. 99. [Shkelev L.T., Odinet E.A. Approximate method for solving the spatial problem of the theory of elasticity. *Kyiv National University of Construction and Architecture*. Kiev; 1999, 8 p., Dep. in the State Technical Library of Ukraine on July 26, 1999, №212-Uk. 99. (In Russ.)]
 21. Ashida F., Tauchert T. Control of adistribution of transient thermoelastic displacement in a composite circular

- disk.R.IS TAM, 2000, 20th, Intern.cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug.-2Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, P. 166.
22. Bossavit A. On the computation of strains and stresses in symmetrical articulated structures. Exploit. Symmetry Appl. and Numer. Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, P. 111-123.
23. Jain R., Ramachandra K., Simha K.R.Y. Rotating anisotropic disc of uniform strength. Int. J. Mech. Sci. 1999; 41(6):639-648.

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович – доктор технических наук, профессор, кафедра автомобильных дорог, оснований и фундаментов.

Магомедэминов Нажмудин Серажудинович – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра строительных материалов и инженерных сетей.

Раджабов Рустам Габирович – старший преподаватель, кафедра строительных материалов и инженерных сетей.

Information about the authors:

Elifkhan K. Agakhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automobile Roads, Basements and Foundations.

Nazhmudin S. Magomedeminov – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Building Materials and Engineering Networks.

Rustam G. Radzhabov – Senior Lecturer, Department of Building Materials and Engineering Networks.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.09.2017.

Received 10.09.2017.

Принята в печать 20.10.2017.

Accepted for publication 20.10.2017.

Для цитирования: Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А. Промышленная апробация комбинированного инструмента зенкер-метчик. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):19-28. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-19-28

For citation: Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Industrial approbation of combined countersink-tap tool. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(4):19-28. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-19-28

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621.882.085/.086.004

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-19-28

ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ЗЕНКЕР-МЕТЧИК

Вагабов Н.М.¹, Курбанов А.З.², Магомедова М.А.³

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

²⁻³Дагестанский государственный педагогический университет,
²⁻³367003 г. Махачкала, ул. Ярагского, д.57, Россия,

¹e-mail:vagabov01@inbox.ru, ²e-mail:kurbanov-48@mail.ru,

³e-mail:mag.marina1979@gmail.com

Резюме: Цель. На основе критического анализа результатов проведенных комплексных исследований необходимо доказать преимущество разработанной технологии с применением комбинированного инструмента зенкер-метчик с новой схемой резания по сравнению с существующими технологиями. **Метод.** Для повышения производительности обработки, стойкости инструмента и качества нарезаемой резьбы одним из способов является снижение крутящего момента, уменьшение наклепа обрабатываемого материала за счет новой схемы резания с целью полного исключения трения боковых сторон зуба о поверхности нарезаемой резьбы. Данная технология применена в реальном производстве. **Результат.** Проведенные производственные испытания комбинированного зенкер-метчика с новой схемой резания, признанного изобретателями, показали, что в результате значительного снижения крутящего момента, уменьшения наклепа обрабатываемого материала, создается возможность увеличения скорости резания и повышения производительности труда более чем в 2 раза по сравнению с процессами резбонарезания при использовании метчиков с шахматным расположением зубьев, в 1,2 раза корригированного строения, в 6 раз стандартных метчиков. Одновременно повышается стойкость инструмента 3-5 раза и резко сокращается число поломок. **Вывод.** Установлено, что точность геометрических параметров, прочность и качество поверхности резьбы, нарезаемой комбинированным зенкер-метчиком с новой схемой резания в труднообрабатываемых материалах значительно выше тех же параметров резьбы, полученной обработкой стандартными и другими известными метчиками. Исследования также показали его высокую надежность, работоспособность и целесообразность применения для обработки выше названных материалов. К преимуществам комбинированного инструмента относятся также сокращение времени резбонарезания по сравнению с отдельной обработкой резьбового отверстия (зенкерование стандартным зенкером с последующим нарезанием резьбы).

Ключевые слова: деталь, резьба, качество, производительность, комбинированный инструмент, стойкость, технологическое время, крутящий момент, наклеп, скорость резания

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

INDUSTRIAL APPROBATION OF COMBINED COUNTERSINK-TAP TOOL

Nurulla M. Vagabov,¹ Ali Z. Kurbanov,² Marina A. Magomedova³

¹Daghestan State Technical University,

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

²⁻³Daghestan State Pedagogical University,

²⁻³57 Yaragskogo Ave., Makhachkala 367003, Russia,

¹e-mail: vagabov01@inbox.ru, ²e-mail: kurbanov-48@mail.ru,

³e-mail: mag.marina1979@gmail.com

Abstract. Objectives Based on a critical analysis of the results of complex studies, we set out to demonstrate the advantages, as compared with existing technologies, of a developed technology that uses a new cutting scheme with a combined countersink-tap tool. **Methods** One way to improve the processing capacity, tool life and quality of a cut thread is to reduce the torque and strain hardening of the processed material by employing a new cutting approach to completely eliminate the friction of the lateral sides of the tooth on the surface of the cut thread. It was necessary for this technology to be checked in real production conditions. **Results** The conducted production tests of a combined countersink-tap tool with the new cutting scheme developed by the inventors have shown that, as a result of a significant reduction in the torque and a decrease in the strain hardening of the processed material, it is possible to increase the cutting speed and increase labour productivity by more than 2 times as compared with the thread cutting processes using taps with staggered teeth, 1.2 times as compared to taps with a corrected structure, and more than 6 times as compared to standard taps. At the same time, the stability of the tool is increased 3-5 times and the number of breakages is also sharply reduced. **Conclusion** It has been established that the accuracy of the geometric parameters as well as the strength and quality of the thread surface cut by the combined countersink-tap tool with the new cutting scheme in hard-to-work materials is much higher than the same thread parameters obtained by processing with standard and other known taps. The studies also indicated its high reliability, operability and expediency of application for processing the above-mentioned materials. The advantages of the combined tool also include a reduction in thread cutting time as compared to a separate machining of the threaded hole (countersinking with a standard countersink followed by subsequent tapping).

Keywords: detail, thread, quality, productivity, combined tool, durability, technological time, torque, strain hardening, cutting speed

Введение. В основных направлениях экономического развития судостроительной промышленности на ближайшие десятилетия большое внимание уделяется повышению технического уровня и качества выпускаемой продукции, обеспечению на этой основе высокой производительности труда. Решение поставленных задач особенно актуально для промышленных предприятий Российской Федерации, в том числе Республики Дагестан, в числе которых ОАО им. Гаджиева (предприятие 1) и завода «Дагдизель» (предприятие 2). На данных предприятиях авторами проводились производственные испытания.

Предприятия изготавливают детали и узлы судовых машин, механизмов и судовой арматуры: планка, пластик, лист, фланец, штуцер и т.д., перечень которых приведен в табл.1. Детали, узлы, механизмы, изготовлены из сталей и сплавов, с особыми физико-механическими свойствами, входящих в группу труднообрабатываемых материалов; функционируют они обычно при высоких температурах и в агрессивной среде; подвергаются большим нагрузкам [1,3]. С учетом этих условий детали должны обладать маломангнитными, коррозионно-стойкими, кислотостойкими и жаростойкими свойствами, что очень затрудняет процесс их обработки. Особенно трудным является получение качественных резьбовых отверстий малых

диаметров в деталях, изготовленных из этих материалов [2-5].

Таблица 1. Примерный перечень деталей, выпускаемых на промышленных предприятиях 1 и 2

Table 1. An approximate list of details that are shown in industrial enterprises 1 and 2

Деталь	Материал	Параметры нарезаемой резьбы	Точность обработки
Установка Дозерная УД 40-100			
Фланец	12X18H10T	M6	7H
Планка	12X18H10T	M7	6H
Дно	12X18H10T	M8	7H
Пластик	12X18H10T	M10	7H
Штуцер	08X18H10T	M27x2	6H
Лист	12X12	M6	7H
Кран ДУ10 РУ6			
Корпус	12X18H10T	M6	7H
Крышка	12X18H10T	M10	7H
Фланец	12X18H10T	M12	7H
Втулка	8X18H10T	M18	7H
Насос ЦВС (Центробежный вихревый самовсасывающий)			
Вставка рабочая внутренняя	12X18H9T	M6, M4	12H
Рулевая машина			
Клапан	20X13	M8	7H
Поворотные затворы (Задвижки большого диаметра)			
Детали	2X13, 12X18H10T, BT3	M6, M18, M20	7H
Клапан дизеля	40X5B2ФС	M6, M10	7H

Постановка задачи. Существующая технология обработки резьбовых отверстий малых диаметров в деталях судовых машин и механизмов не обеспечивает высокое качество и производительность, для чего необходимо разработать более совершенную технологию создания и конструирования прогрессивного инструмента. Для этого, авторами разработан и сконструирован комбинированный инструмент зенкер-метчик с новой схемой резания [2].

Для обеспечения высокого качества резьбовых отверстий и повышения стойкости метчиковой части комбинированного инструмента разработана новая схема резания, в соответствии с которой, на режущих кромках шлифуются фаски размером 0,1-0,15 мм, перекрывающие толщину среза и сокращающие тем самым длины режущих кромок инструмента. Кроме того, заборный конус с углом $\varphi=3^\circ$ распространяется на всю резьбовую часть [2].

Такая конструкция инструмента позволяет повысить производительность и качество получаемых резьбовых отверстий малых диаметров в деталях судовых машин, механизмов и судовой арматуры, изготовленных из труднообрабатываемых материалов [6-11]. Проведенные лабораторные исследования показали эффективность работы данного инструмента.

Методы исследования. Повышение качества обработки резьбовых отверстий и производительности труда можно достичь разными путями, в частности, за счёт оптимального выбора режимов резания, улучшения конструкции инструмента и режущих свойств обрабатываемого материала. В целях практической проверки результатов лабораторных исследований произведена обработка различных деталей судовых машин, механизмов и судовой арматуры, изготовленных из труднообрабатываемых материалов на предприятиях 1 и 2. Резьбонарезание в этих деталях для сравнения осуществляли инструментами стандартных и других конструкций, а

также комбинированного строения с новой схемой. При этом контролировали количество резьбонарезаний и стойкость инструмента.

Весь исследуемый инструмент был изготовлен из стали Р9К5 и имел твердость HRC64-65. Например, обрабатывали резьбовые отверстия М14х1.5 по 2 степени точности в корпусе топливного насоса дизелей типов Ч8,5/11 и Ч9,5/11, обрабатывали и другие детали.

Обсуждение результатов. Результаты комплексных исследований показали, что стойкость комбинированного метчика при обработке корпуса насоса ЦН-105, изготовленного из стали 20Х13, составляет 60 мин., а нормального – 10 мин., при этом, комбинированным метчиком обработано 1600 отверстий, нормальным – всего 235.

Стойкость комбинированных метчиков при равных условиях обработки превышает стойкость нормальных метчиков более чем в 6 раз, стойкость метчика с корригированным профилем и шахматным расположением зубьев находится в середине между стойкостью нормального и комбинированного зенкер-метчика.

Таким образом, применение комбинированного инструмента разработанной конструкции позволяет сократить технологическое время при обработке данного изделия с 7,2 мин. до 1,2 мин., что значительно повышает качество получаемой резьбы.

Идея повышения качества нарезаемой резьбы и производительности обработки за счет создания новой схемы метчиковой части комбинированного инструмента, позволяющей уменьшить площадь контакта зубьев с заготовкой в зоне резания, а так же улучшая доступ СОЖ, научно обоснована авторскими лабораторными исследованиями [12-17]. Для подтверждения достоверности полученных результатов были продолжены производственные испытания, используя для обработки более труднообрабатываемые материалы. В частности, при обработке корпуса уплотнительного патрубка из стали 10Х18Н12М3ТЛ комбинированным инструментом, стойкость составила Т=55 мин., число обработанных отверстий n=1250, тогда как у нормального метчика Т=8 мин., n=230, шахматного строения Т=15 мин., n=400.

При обработке корпуса насоса ЦМ-86, изготовленного из стали 12Х18Н10, стойкость комбинированного инструмента составила Т=57 мин., число нарезанных отверстий n=1520, тогда как у нормального Т=8 мин., n=230 отверстий. Отсюда видно, что по стойкости комбинированный инструмент превосходит нормальный в 7 раз. Также была произведена обработка резьбовых отверстий в клапанах дизелей, изготовленных из стали 40Х5В2ФС.

Результаты отдельных научных исследований и производственных испытаний показаны на рис. 1 и в табл. 2.

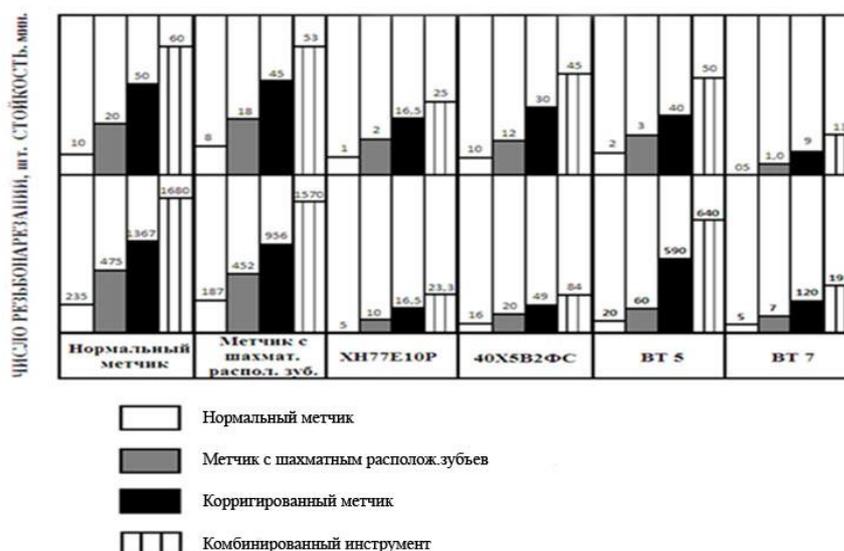


Рис.1. Стойкость и ресурсоспособность метчиков различной конструкции
Fig.1. Resistance and resource-ability of taps of various designs

Таблица 2. Результаты научных исследований и производственных испытаний
Table 2. Results of research and production trials

№/№ предпр.	Детали	Обрабат. материал	Угол забор. конуса (град.)	Скорость резания (м/мин)	М е т ч и к и							
					нормальные		шахматные		корректированные		комбинированные	
					Стойк. Т мин	Число отвер.	Стойк. Т мин	Число отвер.	Стойк. Т мин	Число отвер.	Стойк. Т мин	Число отвер.
1	Корпус насоса ЦН-105	20X13	3°	22	10	235	20	475	50	1100	60	1600
1	ЦМ-86	12X18N1 0Т	2°30'	15,70	10	230	18	410	45	1100	57	1520
1	Детали суд. арматуры	ХН11Т ЮР	5°	4,28	-	5	1	10	16,5	165	25	255
1	---"---	H24XГ	3°	6,28	4	25	8	40	35	90	50	130
1	Патрубок уплотнит.	10X18N1 2МЗТЛ	2°30'	15,70	8	230	15	400	40	900	55	1250
2	Клапана дизеля	40X5B2 ФС	2°30'	2,4	12	16	18	25	30	49	45	84
2	Вставка вихревая	X17C2	3°	6,28	6	80	15	300	30	800	40	1200
2	Рычаг узла захлопки	X17H2	3°	6,28	6	60	12	250	25	580	45	700
2	Детали суд. арматуры	Г13	3°	22	2	20	4	30	30	80	45	120
2	Винт	BT5	7°30'	6,28	2	20	5	60	40	500	50	600
2	Втулка	BT7	2°30'	6,28			0,6	7	9	120	15	145

В дальнейшем для получения более точных результатов необходимо провести исследования структуры и содержания одного из перечня группы труднообрабатываемого материала, например, жаропрочной стали 40X5B2ФС, применяемой для изготовления клапанов дизелей, а также учесть особенность технологии резьбонарезания в этих материалах.

Известно, что жаропрочная сталь 40X5B2ФС мартенситного класса нашла широкое применение для изготовления клапанов дизелей. Так как эта сталь в 3 раза дороже обычных конструкционных сталей, то в целях экономии клапана изготавливают составными: более теплонагруженная часть с тарелкой выполняется из стали 40X5B2ФС, менее нагруженная – тронковое тело – из стали 40X. Резьбонарезание в первой части осуществляется до термообработки детали (закалки с последующим отпуском до HRC 48-52), т.е. в состоянии достаточно высокой вязкости стали.

Необходимо отметить, что особенность строения данного материала заключается в том, что до термообработки в нем имеется относительно вязкая металлическая матрица (ферритно-перлитная), в которой равномерно распределены (при правильной подготовке заготовки) высокопрочные карбидные (Cr₇C₃, Cr₄C, Cr₃C₂) и интерметаллидные (Fe₂W, FeCr) включения. Резьбонарезание в таком материале весьма затруднено.

Во-первых, из-за выкрашивания карбидных и интерметаллидных включений, которые, попадая в зону резания между метчиком и обрабатываемым материалом, создают эффект заклинивания, а также способствуют абразивному износу метчика [4].

Во-вторых, при достаточно высоком локальном содержании этих частиц (в случае неравномерного распределения карбидов и интерметаллидов) резко ухудшаются условия резания, создается неравномерность в распределении сил резания, появляются задиры, рывки, вызывающие вибрацию режущего инструмента и обрабатываемой детали [4].

Для снижения этих эффектов резьбонарезание на деталях из стали 40X5B2ФС осуществляли при самых умеренных скоростях резания (V=2,4 м/мин) обильной подачей охлаждающей жидкости. Угол заборного конуса на метчиках всех видов был доведен до 2°30'. Несмотря на принятые меры, поломки метчиков были частыми, что свидетельствует о наличии значительного эффекта заклинивания.

Например, из 60 метчиков с нормальной резьбой, шахматным расположением зубьев, корригированной резьбой и комбинированных зенкер-метчиков в процессе исследования поломались, соответственно, 14, 17, 10 и 7; стойкость их составила, соответственно, 12, 18, 30 и 45 мин, а количество обработанных отверстий 16, 25, 49 и 84.

Необходимо отметить, что особое значение имеет при обработке этих материалов разработка технологии, исключаяющей или уменьшающей степень поломки инструмента. Поломка инструмента играет важную роль в негативном отношении при обработке труднообрабатываемых материалов [6].

Результаты исследования по отказу метчиков, выполненные на предприятиях 1 и 2, представлены в табл.3.

Таблица 3. Статистический анализ отказов стандартных метчиков в производственных условиях при обработке труднообрабатываемых материалов
Table 3. Statistical analysis of failures of standard taps in production conditions when processing hard-to-work materials

Диаметр метчиков, мм	Виды отказов, %		Расход метчиков в год, (шт)
	катастрофический износ	поломки	
Предприятие 1			
8	21	45	6300
10	21	46	6000
12	26	30	4700
14	23	30	4900
16	30	25	2100
20	32	27	1600
Предприятие 2			
8	30	40	6100
10	30	43	6600
12	24	32	4000
14	28	31	4100
16	28	30	2000
20	31	15	1800

Результаты по трудоемкости нарезания резьбы и исправления брака, вызванного поломкой метчиков при обработке деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов на этих предприятиях представлены в табл. 4.

Таблица 4. Трудоемкость нарезания резьб и исправления брака, вызванного поломкой метчиков при обработке деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов, на предприятиях 1 и 2
Table 4. Labor-intensiveness of tapping and repair of defects caused by breakage of taps during machining of parts from hard-to-process steels and alloys at factories 1 and 2

№ п/п	Наименование деталей	Материал	Трудоемкость, мин		Доля резьбонарезания в % к общей трудоемкости изготовления деталей
			нарезание резьб	исправление брака	
1.	Корпус насоса ЦМ-86	12X18H10T	3	51	17
2.	Патрубок насоса	10X18H12M3ТЛ	3,8	60	18
3.	Корпус ЦП-105	20X13	7,2	120	23
4.	Клапан дизеля	40X5ВГФС	5,3	90	34
5.	Гайка клапана	1X18H10T	0,47	45	18
6.	Рычаг захлопки	14X17H2	1,08	86	2,7
7.	Вставка вихревая	X17C2	3,1	58	26
8.	Винт гребной	BT5	2,7	34	11,4
9.	Втулки	BT7	6,1	75	15
10.	Детали крепежные (корпуса)	Г13	7,3	90	17
11.	Детали арматуры (втулки)	XH77ТЮР	12	131	40

Вышеприведенные данные (табл.4) свидетельствуют о том, что и в условиях повышенной трудности нарезания резьбы комбинированные метчики имеют существенные преимущества перед метчиками других конструкций [4].

Также аналитически обобщены проведенные статические исследования по производительности метчика, результаты которых отражены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты статистических исследований по производительности
Table 5. Results of statistical studies on productivity

№ образца	Стандартный инструмент								Комбинированный инструмент			
	Зенкер				Метчик				№ инстр.	Наладка времени в мин.	Машин. время в мин.	Холост. время в мин.
	№ инстр.	Наладка времени в мин.	Машин. время в мин.	Холост. время в мин.	№ инстр.	Наладка времени в мин.	Машин. время в мин.	Холост. время в мин.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	1	0,24	0,33	0,16	1	0,33	0,50	0,42	1	0,35	0,78	
2.	1	0,25	0,33	0,16	1	0,33	0,52	0,45	1	0,38	0,83	
3.	1	0,24	0,42	0,18	1	0,36	0,58	0,47	1	0,38	0,85	
4.	1	0,24	0,35	0,16	1	0,33	0,58	0,43	1	0,35	0,88	
5.	1	0,24	0,42	0,16	1	0,50	0,52	0,47	1	0,40	0,83	
6.	1	0,16	0,42	0,25	1	0,42	0,58	0,43	1	0,33	0,92	
7.	1	0,24	0,42	0,25	1	0,42	0,58	0,42	1	0,42	0,85	
8.	1	0,24	0,42	0,24	1	0,42	0,57	0,42	1	0,36	0,97	
9.	1	0,25	0,33	0,21	1	0,33	0,50	0,42	1	0,40	1,0	
10.	1	0,21	0,36	0,25	1	0,33	0,58	0,42	1	0,36	1,05	
11.	1	0,20	0,36	0,25	1	0,40	0,58	0,42	1	0,38	0,92	
12.	1	0,25	0,36	0,16	1	0,40	0,57	0,45	1	0,36	0,83	
13.	1	0,25	0,42	0,16	1	0,42	0,57	0,47	1	0,36	0,83	
14.	1	0,26	0,42	0,18	1	0,40	0,55	0,45	1	0,38	0,82	
15.	1	0,28	0,42	0,24	1	0,42	0,55	0,43	1	0,35	0,83	
16.	1	0,25	0,33	0,24	1	0,33	0,57	0,42	1	0,36	0,83	
17.	1	0,24	0,33	0,24	1	0,35	0,57	0,42	1	0,35	0,82	
18.	1	0,24	0,35	0,24	1	0,36	0,57	0,42	1	0,35	0,83	
19.	1	0,24	0,35	0,21	1	0,42	0,57	0,42	1	0,33	0,83	
20.	1	0,24	0,36	0,21	1	0,40	0,57	0,42	1			
21.	1	0,24	0,33	0,20	1	0,40	0,57	0,40	1			
22.	1	0,21	0,35	0,20	1	0,38	0,58	0,40	1			
23.	1	0,26	0,36	0,20	1	0,45	0,58	0,42	1			
24.	1	0,26	0,35	0,20	1	0,38	0,57	0,42	1			
25.	1	0,21	0,33	0,20	1	0,33	0,58	0,42	1			
26.	1	0,24	0,33	0,16	1	0,35	0,57	0,42	1			
27.	1	0,21	0,33	0,18	1	0,37	0,57	0,42	1			
28.	1	0,24	0,33	0,20	1	0,38	0,58	0,40	1			
29.	1	0,24	0,33	0,18	1	0,33	0,58	0,40	1			
30.	1	0,25	0,33	0,20	1	0,33	0,58	0,40	1			
31.	1				1				1			
32.	1				1				1			
33.	1	9,04 мин	10,67	6,07	1	11,29	15,99	12,79	1			

К преимуществам комбинированного инструмента относятся также сокращение времени резбонарезания по сравнению с отдельной обработкой резьбового отверстия (зенкерование стандартным зенкером с последующим нарезанием резьбы) [15-17].

Для сравнения показателей производительности проводили нарезание резьбы в 30 отверстиях из стали 20X13 комбинированным и стандартным инструментами, результаты которых приведены в табл. 6 и показаны на рис.2 .

Проведенные нами производственные испытания комбинированного инструмента зенкер-метчик со специальной схемой резания показали [2], что в результате значительного снижения крутящего момента, уменьшения наклепа обрабатываемого материала создается возможность увеличения скорости резания и повышения производительности труда более чем в 2 раза, по

сравнению с процессами резбонарезания при использовании метчиков различных конструкций, и в частности, с шахматным расположением зубьев.

Таблица 6. Затраты времени на резание резьбы на изделиях из стали 20Х13
Table 6. Time of cutting threads on products made of steel 20Х13

Кол-во резбонарезаний	Затраты времени, мин								
	Стандартный инструмент						Комбинированный инструмент		
	Зенкер			Метчик					
	наладка	машин время	хол. ход	наладка	машин время	хол. ход	наладка	машин время	хол. ход
30	9,04	10,67	6,07	11,29	15,99	12,79	10,89	25,72	11,48
			65,85						48,09

При этом одновременно повышается стойкость инструмента в 3-5 раз и значительно сокращается число поломок.

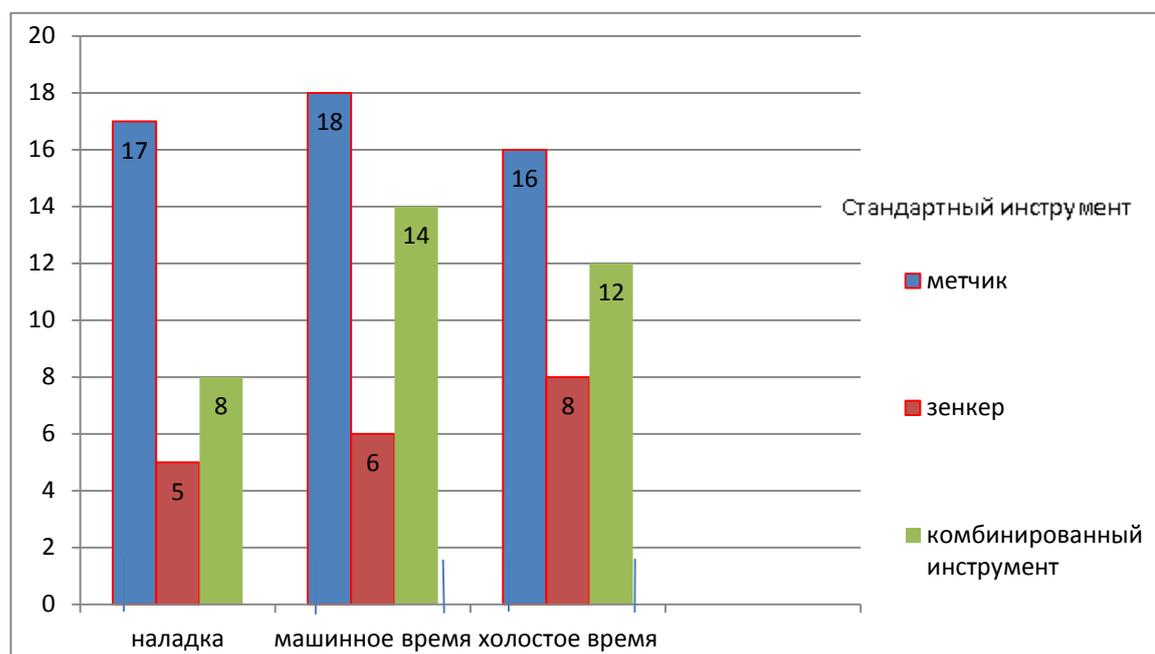


Рис. 2. Диаграмма сравнения затрат времени в минутах при обработке стандартными и комбинированным инструментами

Fig. 2. Diagram of time comparison in minutes when processing standard and combined tools

Вывод. Проведенные производственные испытания комбинированного инструмента с новой схемой резания доказывают его высокую надежность, работоспособность и целесообразность применения для обработки резьбовых отверстий, особенно малых диаметров (<16мм), в труднообрабатываемых материалах, используемых для изготовления деталей судового машиностроения, механизмов и судовой арматуры, что способствует повышению уровня механизации и автоматизации производственного процесса, обеспечивая рост производительности труда.

Библиографический список:

1. Высокопроизводительное нарезание внутренних резьб в трудно-обрабатываемых материалах. Монография П. Курбанов А.З. Махачкала, изд. ОАО «Деловой мир», 2004, 108 с.
2. Курбанов А.З., Абдуллаев А.В. Метчик для обработки трудно-обрабатываемых материалов II Авторское свидетельство №1618535 от 08.09.1990 г.
3. Курбанов А.З. Обоснование прогрессивной технологии нарезания резьб в деталях из труднообрабатываемых материалов автореф. дис. техн. науки. Ленинград, 1987, 20 с.
4. Коженков Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2012, 304 с.

5. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник/Я.Л.Гуревич, М.В.Горохов, В.И.Захаров и др. изд., перераб. И доп..-М.: Машиностроение, 1986, 240с., ил.
6. Технология нарезания точных резьб в труднообрабатываемых материалах (комбинированный инструмент зенкер-метчик). Монография. Курбанов А.З. и другие. Махачкала, 2015, 105с.
7. Wu S.M. Tool-life testing by Response Surface Methodology Part I. University of Wisconsin Madison.-ASME, Paper №63, p.1.
8. Westphal H. Die spannende Bearbeitung von Titan, - Werkstatttechnik und Maschinenbau, 1957, №3
9. Cook E. Titanium Demands Special Consideration. Machinery, v.62, № 7, 1956.
10. Sato T., Tujita N. The Present stage and the future of the machinability data service in Japan.-Proc. 14-th Int.Mach.Tool.Dec.and Res.Conf.Manchester, 1973, p.685-690.
11. Jacob E. Anwendung des Programms AUTOTECH – KOPA 2. Verteidigungstechnik und Betrieb, Bd.25, 1975, №11, s.668-672.
12. Курбанов А.З., Вагабов Н.М., Алиомаров Л.М. Исследование и оптимизация работоспособности и стойкости комбинированного инструмента зенкер-метчика. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала, 2014. №4(35). С.19-26.
13. Курбанов А.З., Алиомаров Л.М., Магомедова М.А. Оптимизация режимов резьбонарезания по качеству поверхности. В мире научных открытий. 2014. №12.2 (60) с 815-828.
14. Курбанов А.З., Вагабов Н.М., Алиомаров Л.М. Методика контроля среднего диаметра резьбы с несимметричным профилем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: 2015. №4(39). С.8-14.
15. Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А. Исследование типового состояния зоны нарезания резьбы с помощью полного факторного эксперимента. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: 2015. №2(37). С.8-12.
16. Курбанов А.З., Алиомаров Л.М., Магомедова М.А. Исследование влияния геометрических параметров комбинированного инструмента на величину крутящего момента при резьбонарезании. Вестник ВСГУТУ. 2016. №5 (62) с.38-42.
17. Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А. Технология нарезания внутренних резьб высокой точности в деталях судовых машин, механизмов и судовой арматуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: 2016 Т.41. №2. С.28-33.

References:

1. Kurbanov A.Z. Vysokoproizvoditel'noe narezanie vnutrennikh rez'b v trudno-obrabatyvaemykh materialakh. Monografiya. Makhachkala: ОАО «Delovoi mir»; 2004. 108 s. [Kurbanov A.Z. High-performance tapping of internal threads in hard-to-process materials. Monograph. Makhachkala: ОАО «Delovoi mir»; 2004. 108 p. (In Russ.)]
2. Kurbanov A.Z. Abdullaev A.V. Metchik dlya obrabotki trudno-obrabatyvaemykh materialov. Avtorskoesvidetel'stvo №1618535 ot 08.09.1990 g. [Kurbanov A.Z. Abdullaev A.V. Tap for processing difficult-to-process materials. Author's certificate №1618535 from 08.09.1990 (In Russ.)]
3. Kurbanov A.Z. Obosnovanie progressivnoi tekhnologii inarezaniya rez'b v detalyakh iz trudnoobrabatyvaemykh materialov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Leningrad; 1987. 20 s. [Kurbanov A.Z. Substantiation of the progressive technology of threading in details from hard-to-process materials. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation. Leningrad; 1987. 20 p. (In Russ.)]
4. Kozhenkov D.V., Kirsanov S.V. Rezaniamaterialov. M.: Mashinostroenie; 2012. 304 s. [Kozhenkov D.V., Kirsanov S.V. Cutting of materials. M.: Mashinostroenie; 2012. 304 p. (In Russ.)]
5. Rezhimy rezaniya trudno obrabatyvaemykh materialov: Spravochnik (Podred.Ya.L. Gurevich, M.V. Gorokhov, V.I. Zakharov i dr. M.: Mashinostroenie; 1986. 240 s. [Modes of cutting hard-to-process materials: A Handbook (Edited by Ya.L. Gurevich, M.V. Gorokhov, V.I. Zakharov et al. M.: Mashinostroenie; 1986. 240 p. (In Russ.)]
6. Kurbanov A.Z. i dr. Tekhnologiya narezaniya tochnykh rez'b v trudnoobrabatyvaemykh materialakh (kombinirovannyi instrument zenker-metchik). Monografiya. Makhachkala; 2015. 105 s. [Kurbanov A.Z. et al. The technology of tapping precise threads in hard-to-process materials (combined countersink-tap tool). Monograph. Makhachkala; 2015. 105 p. (In Russ.)]
7. Wu S.M. Tool-life testing by response surface methodology. Part I. Madison: University of Wisconsin-ASME; 1964. Paper №63. P.1.
8. Westphal H. Die spannende Bearbeitung von Titan. Werkstatttechnik und Maschinenbau; 1957. №3
9. Cook E. Titanium Demands Special Consideration. Machinery. 1956; 62 (7).
10. Sato T., Tujita N. The present stage and the future of the machinability data service in Japan. Proc. 14-th Int.Mach.Tool.Dec.and Res.Conf.Manchester, 1973. P.685-690.
11. Jacob E. Anwendung des Programms AUTOTECH – KOPA 2. Verteidigungstechnik und Betrieb. Bd.25. 1975;11:668-672.

12. Kurbanov A.Z., Vagabov N.M., Aliomarov L.M. Issledovanie i optimizatsiyarabotosposobnosti i stoikosti kombinirovannogo instrumenta zenker-metchika. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014;4(35):19-26. [Kurbanov A.Z., Vagabov N.M., Aliomarov L.M. Research and optimisation of the operability and durability of the combined countersink-tap tool. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014;4(35):19-26. (In Russ.)]
13. Kurbanov A.Z., Aliomarov L.M., Magomedova M.A. Optimizatsiya rezhimovrez'bo narezaniya po kachestvu poverkhnosti. V mire nauchnykh otkrytii. 2014;12.2 (60):815-828. [Kurbanov A.Z., Aliomarov L.M., Magomedova M.A. Optimisation of thread cutting modes for surface quality. In the world of scientific discoveries. 2014;12.2 (60):815-828. (In Russ.)]
14. Kurbanov A.Z., Vagabov N.M., Aliomarov L.M. Metodika kontrolya srednego diametra rez'by s nesimmetrichnym profilom. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;№4(39):8-14. [Kurbanov A.Z., Vagabov N.M., Aliomarov L.M. Method for controlling the average thread diameter with an asymmetric profile. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;№4(39):8-14. (In Russ.)]
15. Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Issledovanie tipovogo sostoyaniya zony narezaniya rez'by s pomoshch'yu polnogofaktornogo eksperimenta. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;2(37):8-12. [Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Study of the typical state of the thread cutting zone using a full factorial experiment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;2(37):8-12. (In Russ.)]
16. Kurbanov A.Z., Aliomarov L.M., Magomedova M.A. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov kombinirovannogo instrumenta na velichinu krutyashchego momenta pri rez'bonarezanii. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;5(62):38-42. [Kurbanov A.Z., Aliomarov L.M., Magomedova M.A. Investigation of the influence of the combined tool geometric parameters on the amount of torque during thread cutting. ESSUTM Bulletin. 2016;5(62):38-42. (In Russ.)]
17. Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Tekhnologiya narezaniya vnutrennikhrez'bvysokoitochnosti v detalyakh sudovykh mashin, mekhanizmov i sudovoarmatury. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;41(2):28-33. [Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Technology of tapping of internal threads of high accuracy in details of ship machinery, mechanisms and ship armature. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;41(2):28-33. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Вагабов Нурулла Магомедович – кандидат технических наук, старший преподаватель.

Курбанов Али Зульпукарович – кандидат технических наук, профессор.

Магомедова Марина Алиевна – кандидат педагогических наук, старший преподаватель.

Information about the authors:

Nurulla M. Vagabov – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer.

Ali Z. Kurbanov – Cand. Sci. (Technical), Prof.

Marina A. Magomedova – Cand. Sci. (Pedagogical), Senior Lecturer.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.09.2017.

Принята в печать 08.11.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.09.2017.

Accepted for publication 08.11.2017.

Для цитирования: Злобина И.В., Морозов Д.В., Павлов С.П. Виброакустические характеристики армированных углеродными волокнами композиционных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):29-39. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

For citation: Zlobina I.V., Morozov D.V., Pavlov S.P. Vibroacoustic characteristics of composite materials reinforced by carbon fibres. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):29-39 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621.9.047/048

ББК 22.251, 30.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-29-39

ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Злобина И.В.¹, Морозов Д.В.³, Павлов С.П.²

¹⁻³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

¹⁻³410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

¹e-mail: irinka_7_@mail.ru, ²e-mail: ppsar@yandex.ru, ³e-mail: thisistonypark@gmail.com

Резюме: Цель. Целью исследования является изучение особенностей прохождения волн механических колебаний ультразвуковой частоты через композиционные материалы, в том числе подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля. **Метод.** Выполнены исследования распространения механических волн, генерируемых источником ультразвуковых колебаний, в образцах из композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, используемых в авиационной промышленности. **Результат.** Установлено, что при прохождении через композиционный материал частота волн снижается практически на два порядка по сравнению с частотой вынуждающей динамической силы, при этом существенное влияние оказывает метод укладки армирующих волокон: наибольшее снижение частоты наблюдается у композитов с квазиизотропной структурой. При прохождении колебаний непосредственно через металлическую поверхность снижение частоты происходит не более, чем на порядок. Амплитудные значения виброускорений возрастают при уменьшении толщины образцов и превышают в 2-3 раза полученные при контрольном прохождении волны через стальную поверхность оснастки. Уровень звукового давления изменяется от 4,1 Па для образцов с квазиизотропной структурой до 8,4 Па для образцов, армированных металлической сеткой. Обработка исследованных материалов в СВЧ электромагнитном поле приводит к изменению характера прохождения волн колебаний. Незначительно – на (7-9)% возрастает среднее за установленный период времени значение виброускорения, но при этом существенно (от 20% до 6 раз) снижается неравномерность значений, т.е. колебания становятся стабильными. У некоторых материалов (армированный металлической сеткой квазиизотропный и слоистый прессованный) значения виброускорения вообще не изменяются за цикл. **Вывод.** Полученный результат может явиться основой для разработки технологий создания конструкций из композиционных материалов со стабильными виброакустическими характеристиками.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Ключевые слова: композиционные материалы, ультразвуковые колебания, виброакустические характеристики, углеродные волокна, СВЧ электромагнитное поле

PHYSICAL-MATEMATICALSCIENCE
MECHANICS

VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS REINFORCED
BY CARBON FIBRES

*Irina V Zlobina*¹, *Danila V. Morozov*³, *Sergey P. Pavlov*²

¹⁻³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

¹⁻³77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

¹e-mail:irinka_7_@mail.ru, ²e-mail: pspсар@yandex.ru, ³e-mail:thisistonypark@gmail.com

Abstract. Objectives The aim of the research is to study the features of the propagation of mechanical oscillation waves of ultrasonic frequency through composite materials, including those exposed to a microwave electromagnetic field. **Methods** The propagation of mechanical waves generated by a source of ultrasonic vibrations is investigated in samples of composite materials reinforced by carbon fibres as used in aircraft construction. **Results** It is established that, when passing through a composite material, the frequency of the waves decreases by almost two orders of magnitude in comparison with the frequency of the driving dynamic force, while the method of laying reinforcing fibres has a significant effect: the greatest decrease in frequency is observed in composites with a quasi-isotropic structure. When the oscillations pass directly through the metal surface, the frequency decreases by not more than an order of magnitude. The amplitude values of vibration acceleration increase with decreasing thickness of the samples and exceed by 2-3 times the waves obtained during the control passage through the steel surface of the gear. The sound pressure level changes from 4.1 Pa for samples with a quasi-isotropic structure to 8.4 Pa for samples reinforced with a metal grid. The processing of the investigated materials in a microwave electromagnetic field leads to a change in the character of the passage of the oscillation waves. The average for a specified period of time vibration acceleration value increases slightly (7-9%), while its unevenness decreases significantly (by between 0.2 and 6 times), i.e. vibrations become stable. For some materials (reinforced with a quasi-isotropic and laminated pressed metal mesh), the vibration acceleration values do not change at all during a cycle. **Conclusion** The obtained result can form the basis for developing technologies for creating structures from composite materials with stable vibroacoustic characteristics.

Acknowledgment The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

Keywords: composite materials, ultrasonic vibrations, vibroacoustic characteristics, carbon fibres, microwave electromagnetic field

Введение. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей, и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1, 3-15]. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд.долл. [2].

Одними из основных потребителей композитов на основе углеродных волокон в промышленно развитых странах были и остаются аэрокосмическая и оборонная промышленность, а также автомобилестроение [1-4]. При этом композиционные материалы используются не только в военной авиации [5], но все шире применяются при производстве легких спортивных самолетов, самолетов для местных авиалиний и тяжелых магистральных лайнерах типа перспективного Boeing 787 или Airbus 380 [6-7].

В настоящее время из композиционных материалов изготавливают изделия, работающие в условиях высоких скоростей и вибраций, например, лопатки низкотемпературных контуров газотурбинных двигателей.

Вибрации могут возникнуть при попадании летательного аппарата в зону турбулентности, при выполнении маневра уклонения от зенитного оружия, при внешне незначительных повреждениях, как правило, приводящих к дисбалансу. При этом распространение вибраций будет определяться не только размерами и формой объекта, но его внутренней структурой, состоящей из разнонаправленных армирующих волокон и полимерной матрицы.

При использовании топологической оптимизации конструкции наличие в структуре армирующих областей с резко отличающимися от основного материала физико-механическими свойствами вносит еще более высокую неопределенность в распространение вибраций.

Изложенное свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества.

Авиационные полимерные композиты в настоящее время условно разделяют на 4 группы: конструкционные пластики для слабо- и средненагруженных конструкций; баллистически стойкие пластики для защитных конструкций; антифрикционные пластики для тяжело нагруженных узлов трения, звукопоглощающие пластики для снижения шума самолетов на местности.

Особенностью волокнистых полимерных композиционных материалов является влияние на физико-механические свойства технологии изготовления и существование материала только в виде изделия, например, кожух звукопоглощающего контура авиационного двигателя [8]. Типовая технология формирования армированных композиционных материалов заключается в послойной выкладке пропитанных связующим волокнистых структур с последующим прессованием и отверждением.

В последнее время начинает развиваться использование для изготовления композиционных изделий аддитивных технологий [9-10]. Особенности данной технологии приводят к различным дефектам [11], к которым относятся: расслоение; трещины в связующем, складки, подмятие слоев, царапины, риски, забоины, отрыв поверхностных слоев, коробление, поводки и прогибы готового изделия, неправильная укладка наполнителя, оголение основы, нахлесты препрега, срезы препрега, зоны с повышенным содержанием пор и пузырьков и т.п. Для высоконагруженных элементов конструкции, а также в изделиях, работающих в условиях высоких температур, используют материалы типа «углерод-углерод» [12-13].

Также композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов. Применение армирования углеродными нанотрубками частично снимает проблему анизотропии, но не устраняет полностью, переводя ее на другой масштабный уровень, хотя и обеспечивает повышение физико-механических характеристик [14]. В тоже время перспективные авиационные и ракетные комплексы будут высокоманевренными, использоваться в условиях гиперзвуковых скоростей в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распределение опасных механических и температурных напряжений. Дополнительную трудность создает крайняя неоднородность свойств по объему материала, вызванная укладкой армирующего компонента, равномерностью его пропитки материалом матрицы.

На основании изложенного представляется целесообразным исследовать прохождение механических волн высокой частоты через композиционные материалы, используемые в авиационной технике, а именно – армированные углеродными волокнами. При этом целесообразно выявить влияние на физику данного процесса особенностей структуры материала и технологической наследственности, определяемой содержанием и режимами операций формования.

Для технологических процессов формирования большинства композиционных материалов с неоднородными структурой и составом (керамика, стекло- и углепластики, материалы, получаемые с применением аддитивных технологий) характерно использование термической обработки для стабилизации структуры и обеспечения когезионной прочности.

Однако из-за упомянутой выше неоднородности тепло- и электрофизических параметров композиции, тепловые потоки в объеме материала распределяются крайне неравномерно, что создает неоднородности и микрофлуктуации, способные вызвать нарушения в прохождении механических колебаний. Электротехнологические и, в частности, электрофизические методы воздействия на композиционные материалы могут оказаться весьма перспективными вследствие своей многофакторности, что расширяет сферу параметров их влияния. Применение СВЧ электромагнитного поля для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических, в том числе композиционных, материалов позволяет интенсифицировать процесс и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия, улучшить прочностные характеристики [15-17].

Следует отметить, что влияние СВЧ обработки композиционных материалов на их виброакустические характеристики изучено недостаточно. В тоже время использование данного метода воздействия может явиться одним из инструментов повышения стойкости изделий из данных материалов к вибрационным нагрузкам.

Постановка задачи. Целью исследований явилось изучение особенностей прохождения волн механических колебаний ультразвуковой частоты через композиционные материалы, в том числе подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля.

Методы исследования. Для измерения параметров колебаний образцов использовался компьютерный виброакустический комплекс ВК-01 производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Зеленоград Московской обл.) с датчиками виброускорений ВС-112 и микрофонами 1 класса ВС-501. Запись и обработка сигналов датчиков осуществлялась во встроенной в комплекс программной среде ZetLab. Схема измерения представлена на рис. 1, рабочее место – на рис. 2.

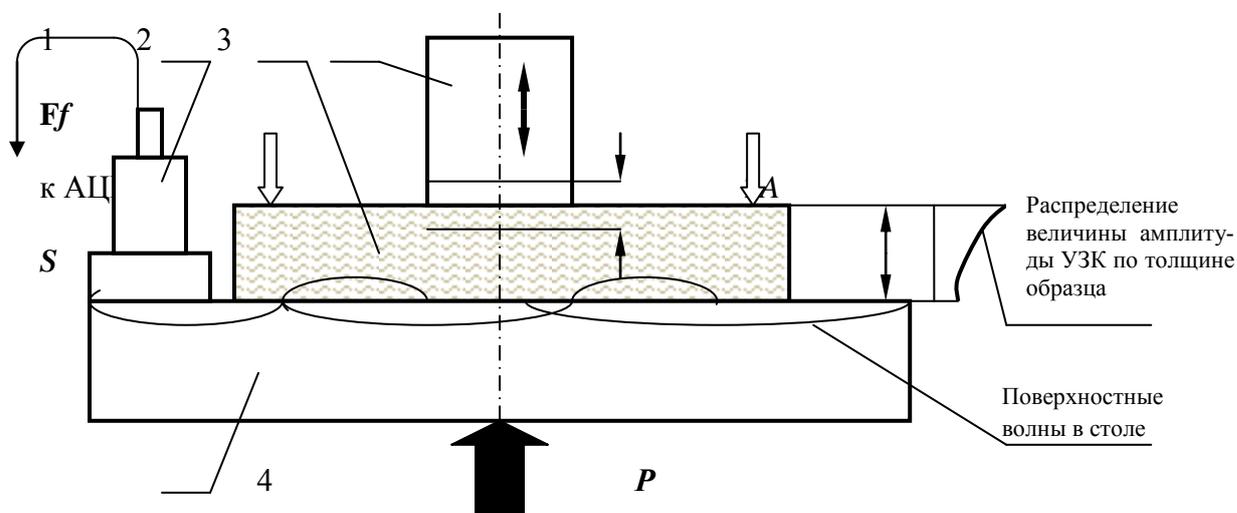


Рис. 1. Схема проведения виброизмерений

1 – датчик виброускорений ВС-112; 2 – образец; 3 – трансформатор ультразвуковых колебаний; 4 – стол экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of vibration measurements

1 - vibration acceleration sensor BC-112; 2 - sample; 3 - ultrasonic oscillation transformer; 4 - experimental setup table

Образцы устанавливали на столе экспериментальной ультразвуковой установки (рис. 2) и жестко крепили к его поверхности при помощи винтовых прихватов. На поверхность стола при помощи магнита крепили датчик ВС-112.

Генерируемая ультразвуковым пьезокерамическим преобразователем волна проходила через структуру исследуемого материала и возбуждала поверхностные волны в столе, амплитуда и частота которых регистрировались датчиком.

Амплитуду сигналов оценивали как среднюю по результатам их обработки в среде ZetLab, частоту – по количеству целых волн, укладывающихся в опорный интервал времени, который был принят равным 0,5 с.



Рис. 2. Рабочее место для проведения виброакустических измерений
Fig. 2. Workplace for conducting vibroacoustic measurements

Амплитуда и частота исходных колебаний излучателя составляли соответственно 10 мкм и 23350 Гц. Для питания излучателя использовали опытный многочастотный генератор с программированием базовой частоты при помощи ноутбука и тонкой настройкой с дискретностью 10 Гц.

Образцы нагружали вынуждающей силой путем прижатия торца излучателя к их поверхности с усилием 50 Н, которое задавалось при помощи пружины, размещенной в столе установки. Исследовали следующие образцы: из квазиизотропного отвержденного углепластика толщиной 5 и 3,3 мм; из квазиизотропного углепластика толщиной 1,7 мм, армированного металлической сеткой; из углепластика толщиной 1,8 мм, полученного послойной выкладкой на полимерную подложку. Во всех случаях поперечные размеры образцов составляли 70x70 мм. СВЧ обработку образцов проводили на специальной установке (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальная установка для обработки материалов в СВЧ электромагнитном поле
Fig. 3. Experimental installation for material processing in a microwave electromagnetic field

Источником СВЧ электромагнитного поля являлась микроволновая установка «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.).

Образцы закрепляли на трехкоординатном столе с рабочей поверхностью из полипропилена PP15. При помощи винтов координатных перемещений устанавливали дистанцию 200 мм от среза излучающего рупора и размещали центр образца по оси излучения.

Излучаемая мощность установки «Жук-2-02» составляла 1200 Вт, частота – 2450 МГц. Время обработки выбирали равное 1 минуте на основе априорной информации [18-20] для обеспечения напряженности поля (удельной СВЧ мощности), исключающей перегрев образцов.

В процессе исследований оценивали величину виброускорения, стабильность его величины, частоту колебаний, прошедших через образец, и уровень звукового давления.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4 –7 и в табл. 1, 2.

Таблица 1. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле и структуры композиционных материалов на частоту прошедшей через образец вибрационной волны (Гц)

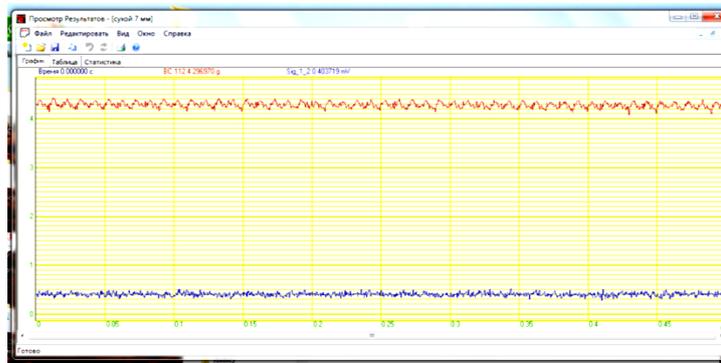
Table 1. Effect of processing in the microwave electromagnetic field and the structure of composite materials on the frequency of the transmitted vibration wave (Hz)

Вид образца	Квазиизотропный $S=5$ мм	Квазиизотропный $S=3,3$ мм	Квазиизотропный $S=1,7$ мм с сеткой	Слоистый $S=1,7$ мм
Контрольный	100	100	100	120
Обработанный	180	120	200	120

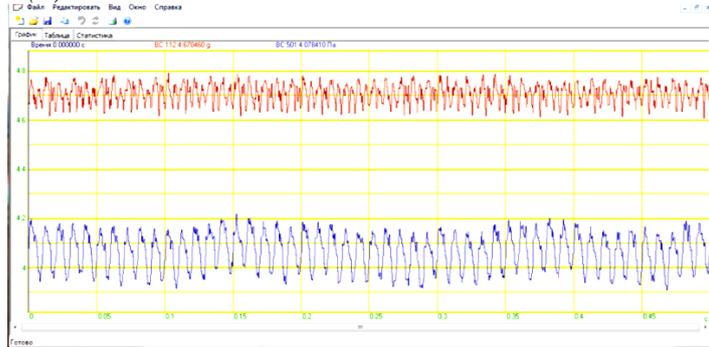
Таблица 2. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле и структуры композиционных материалов на величину и стабильность виброускорения

Table 2. Effect of processing in the microwave electromagnetic field and the structure of composite materials on the magnitude and stability of vibration acceleration

Вид образца		a_{max} , ед. g	a_{min} , ед. g	$a_{ср}$, ед. g	Δa , %
Квазиизотропный $S=5$ мм	контрольный	4,377	4,25	4,308	3
	обработанный	4,765	4,646	4,707	2,5
Квазиизотропный $S=3,3$ мм	контрольный	5,44	3,89	4,765	39,8
	обработанный	4,92	4,638	4,79	6
Квазиизотропный $S=1,7$ мм с сеткой	контрольный	7,083	6,707	6,926	5,6
	обработанный	7,444	7,36	7,414	1
Слоистый $S=1,7$ мм	контрольный	7,867	7,75	7,824	1,5
	обработанный	7,8699	7,8691	7,869	0,1



A(a)



B(c)

X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	Sig_1_2		
с	г	mV		
1	0.000000	4.288970	0.403719	
2	0.000400	4.297150	0.416202	
3	0.000800	4.269480	0.388422	
4	0.001200	4.277250	0.350812	
5	0.001600	4.363360	0.435521	
6	0.002000	4.354270	0.486592	
7	0.002400	4.370930	0.447612	
8	0.002800	4.377300	0.472894	
9	0.003200	4.371420	0.402210	
10	0.003600	4.362190	0.413227	
11	0.004000	4.352390	0.406528	
12	0.004400	4.291440	0.378806	
13	0.004800	4.253250	0.449295	
14	0.005200	4.265420	0.399204	
15	0.005600	4.284940	0.411317	
16	0.006000	4.311290	0.430205	
17	0.006400	4.283790	0.378255	
18	0.006800	4.249960	0.390483	
19	0.007200	4.252600	0.478442	

B(b)

X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	BC 501		
с	г	Pa		
1	0.000000	4.670460	4.078410	
2	0.000400	4.666130	4.129760	
3	0.000800	4.725320	4.165490	
4	0.001200	4.744710	4.191210	
5	0.001600	4.765460	4.175310	
6	0.002000	4.754420	4.171110	
7	0.002400	4.762860	4.198910	
8	0.002800	4.737870	4.163720	
9	0.003200	4.730350	4.147640	
10	0.003600	4.684890	4.140300	
11	0.004000	4.704010	4.106180	
12	0.004400	4.663810	4.124890	
13	0.004800	4.692580	4.132380	
14	0.005200	4.647800	4.118780	
15	0.005600	4.646440	4.107940	
16	0.006000	4.684890	4.082680	
17	0.006400	4.698950	4.043210	
18	0.006800	4.726140	4.014580	
19	0.007200	4.727220	3.981390	

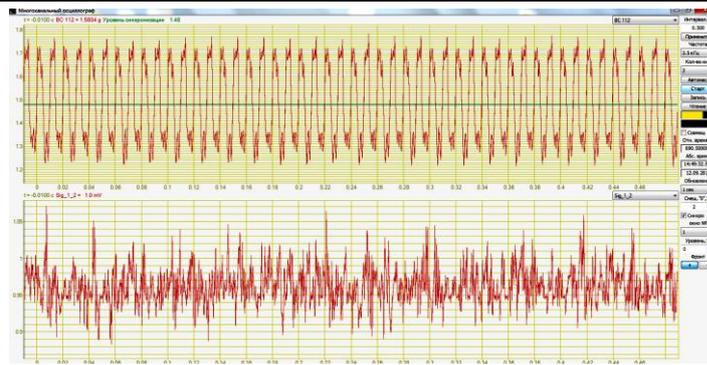
B(d)

Рис. 4. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 5 мм и значения сигналов:

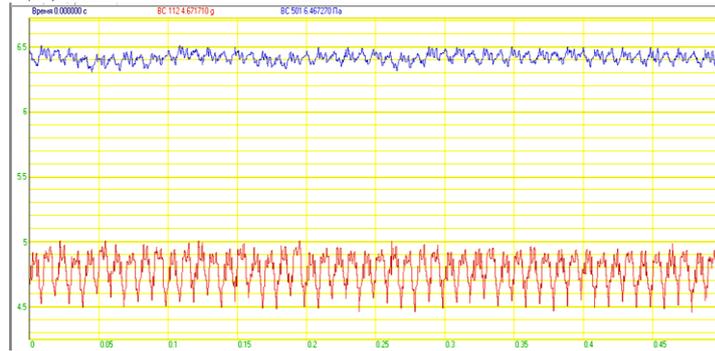
(а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия

Fig. 4. Vibration noise characteristics of a plate 5 mm thick and signal values:

(a) and (b) control; (c) and (d) after microwave exposure



A(a)



B(c)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	Sig_1_2	
с	г	мВ	
1	0.000000	4.255770	0.401718
2	0.000400	3.890030	0.379125
3	0.000800	5.094220	0.395143
4	0.001200	5.440360	0.396577
5	0.001600	5.013330	0.295050
6	0.002000	4.093360	0.314112
7	0.002400	4.405810	0.340246
8	0.002800	5.303110	0.349827
9	0.003200	5.358990	0.396789
10	0.003600	4.681360	0.320354
11	0.004000	3.920320	0.361862
12	0.004400	4.743440	0.410666
13	0.004800	5.413700	0.348525
14	0.005200	5.318020	0.416495
15	0.005600	4.279350	0.397056
16	0.006000	3.972570	0.387728
17	0.006400	5.031940	0.396408
18	0.006800	5.378160	0.328002
19	0.007200	4.950400	0.354915

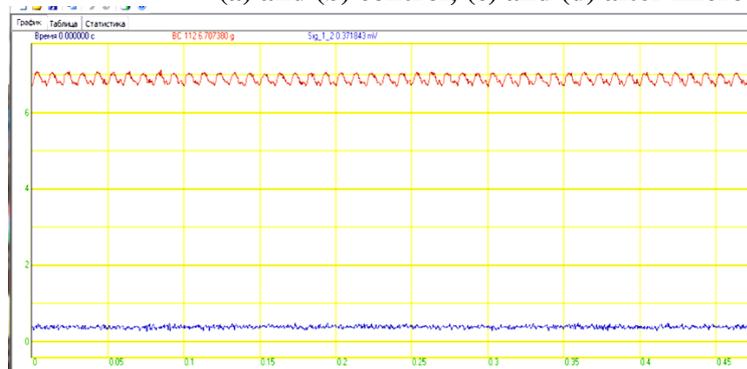
B(b)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

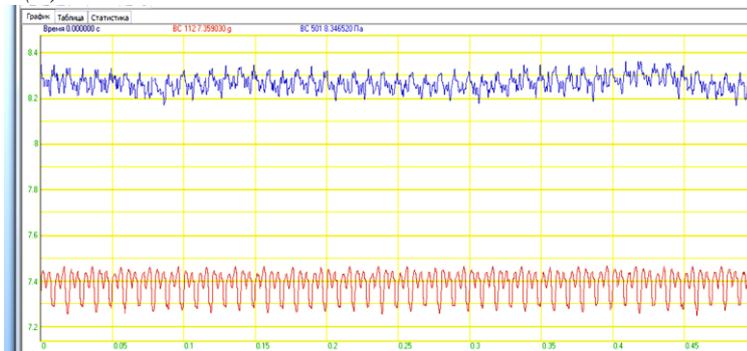
X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	BC 501		
с	г	Па		
1	0.000000	4.671710	6.467270	
2	0.000400	4.717740	6.450570	
3	0.000800	4.820030	6.446380	
4	0.001200	4.705160	6.443150	
5	0.001600	4.722220	6.401980	
6	0.002000	4.920550	6.415610	
7	0.002400	4.915190	6.392120	
8	0.002800	4.849680	6.406540	
9	0.003200	4.823960	6.398470	
10	0.003600	4.834760	6.381950	
11	0.004000	4.844690	6.385960	
12	0.004400	4.887950	6.376450	
13	0.004800	4.910370	6.358540	
14	0.005200	4.731500	6.365650	
15	0.005600	4.764210	6.355890	
16	0.006000	4.862590	6.381420	
17	0.006400	4.731440	6.427960	
18	0.006800	4.668010	6.425350	
19	0.007200	4.638200	6.437810	

Г(d)

Рис. 5. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 3,3 мм и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
 Fig. 5. Vibro-noise characteristics of a plate 3.3 mm thick and signal values: (a) and (b) control; (c) and (d) after microwave exposure



A(a)



B(c)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	Sig_1_2		
с	г	мВ		
1	0.000000	6.707380	0.371843	
2	0.000400	6.749260	0.377783	
3	0.000800	6.802730	0.297103	
4	0.001200	6.875790	0.305073	
5	0.001600	6.964140	0.379884	
6	0.002000	7.037940	0.390123	
7	0.002400	7.034450	0.398933	
8	0.002800	7.030820	0.391941	
9	0.003200	7.082970	0.342385	
10	0.003600	7.058460	0.439849	
11	0.004000	7.049840	0.446369	
12	0.004400	7.055840	0.377966	
13	0.004800	6.973940	0.418385	
14	0.005200	6.942680	0.419932	
15	0.005600	6.925610	0.339302	
16	0.006000	6.890870	0.352356	
17	0.006400	6.817630	0.335644	
18	0.006800	6.782350	0.318524	
19	0.007200	6.831750	0.382197	

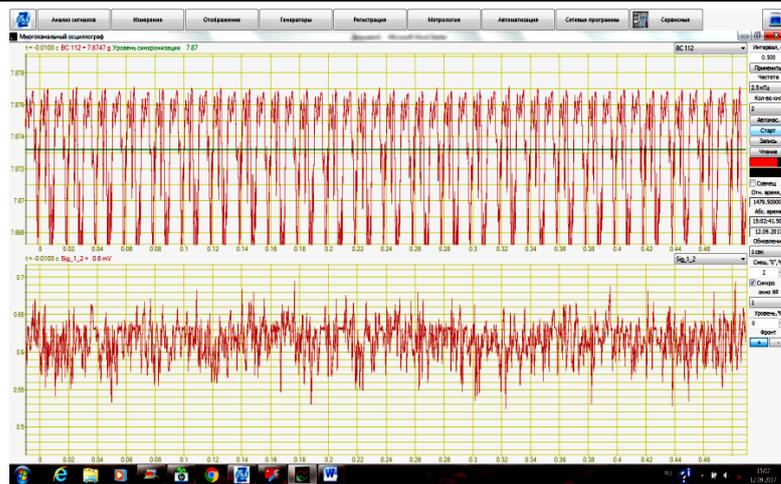
B(b)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

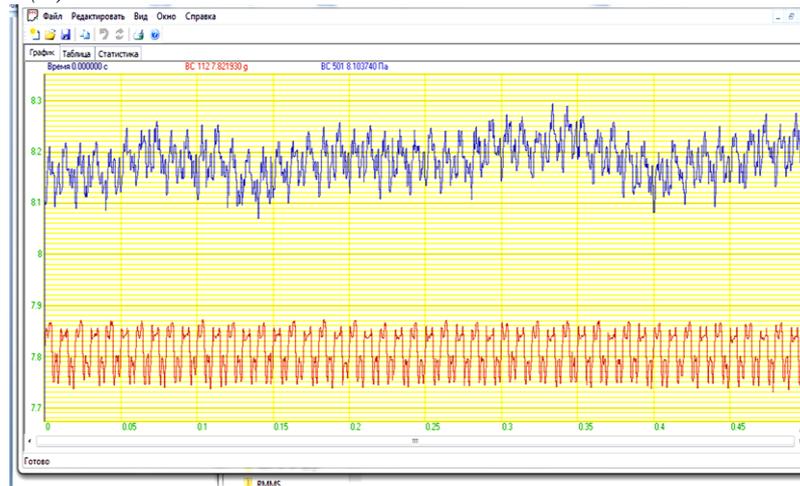
X	Y1	Y2	Y3	Y4
Время	BC 112	BC 501		
с	г	Па		
1	0.000000	7.359030	8.346520	
2	0.000400	7.426760	8.310560	
3	0.000800	7.437930	8.285630	
4	0.001200	7.444050	8.288970	
5	0.001600	7.457180	8.284930	
6	0.002000	7.452910	8.275880	
7	0.002400	7.452260	8.251100	
8	0.002800	7.408290	8.252960	
9	0.003200	7.387780	8.278400	
10	0.003600	7.369680	8.279450	
11	0.004000	7.380870	8.280300	
12	0.004400	7.402940	8.254150	
13	0.004800	7.422710	8.252390	
14	0.005200	7.437120	8.280980	
15	0.005600	7.438110	8.279990	
16	0.006000	7.439990	8.229560	
17	0.006400	7.411270	8.210950	
18	0.006800	7.407180	8.242510	
19	0.007200	7.400680	8.272230	

Г(d)

Рис. 6. Виброшумовые характеристики пластины толщиной 1,7 мм с металлической сеткой и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
 Fig. 6. Vibration response of a plate 1.7 mm thick with a metal mesh and the values of the signals: (a) and (b) of the control; (c) and (d) after microwave exposure



A(a)



B(c)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	BC 501	
с	g	Pa	
1	0.000000	7.821930	8.103740
2	0.000400	7.849560	8.097700
3	0.000800	7.855400	8.101120
4	0.001200	7.851240	8.132940
5	0.001600	7.841710	8.164230
6	0.002000	7.835090	8.192000
7	0.002400	7.843360	8.168810
8	0.002800	7.848560	8.180330
9	0.003200	7.865790	8.209900
10	0.003600	7.862570	8.164130
11	0.004000	7.866800	8.154620
12	0.004400	7.860220	8.155810
13	0.004800	7.808660	8.181020
14	0.005200	7.763330	8.158740
15	0.005600	7.750370	8.157860
16	0.006000	7.751950	8.153860
17	0.006400	7.785360	8.092300
18	0.006800	7.808630	8.102740
19	0.007200	7.792870	8.122580

B(b)

Частотный диапазон - от 0Гц до 1250.000000Гц

X	Y1	Y2	Y3
Время	BC 112	Sig_1_2	
с	g	mV	
1	0.000000	7.869770	0.282784
2	0.000400	7.869710	0.309362
3	0.000800	7.869610	0.347974
4	0.001200	7.869410	0.335008
5	0.001600	7.869300	0.336927
6	0.002000	7.869200	0.310173
7	0.002400	7.869140	0.325439
8	0.002800	7.869100	0.346669
9	0.003200	7.869130	0.359308
10	0.003600	7.869250	0.332956
11	0.004000	7.869370	0.333643
12	0.004400	7.869440	0.342428
13	0.004800	7.869460	0.324727
14	0.005200	7.869670	0.322773
15	0.005600	7.869940	0.325668
16	0.006000	7.869810	0.305642
17	0.006400	7.869760	0.321666
18	0.006800	7.869710	0.304152
19	0.007200	7.869400	0.336904

B(d)

Рис. 7. Виброшумовые характеристики пластины из слоистого углепластика толщиной 1,8 мм и значения сигналов: (а) и (б) контрольной; (в) и (г) после СВЧ воздействия
Fig. 7. Vibration characteristics of a plate made of laminated carbon fiber with a thickness of 1.8 mm and the values of the signals: (a) and (b) of the control; (c) and (d) after microwave exposure

Обсуждение результатов. При прохождении через композиционный материал частота волн снижается практически на два порядка по сравнению с частотой вынуждающей динамической силы, при этом существенное влияние оказывает метод укладки армирующих волокон: наибольшее снижение частоты наблюдается у композитов с квазиизотропной структурой.

При прохождении колебаний непосредственно через металлическую поверхность снижение частоты происходит не более чем на порядок.

Амплитудные значения виброускорений возрастают на (10-11)% при уменьшении толщины контрольных образцов, что объясняется известным эффектом затухания ультразвуковых волн по толщине объекта воздействия. Однако после обработки в СВЧ электромагнитном поле виброускорение снижается значительно в меньшей степени и не превышает 2%. Одновременно частота волн колебаний, прошедших через обработанный образец, оказалась выше, чем через контрольный от 1,2 до 2,0 раз.

Наибольшее увеличение отмечено для образцов с размещенной в объеме материала металлической сеткой, что связано с более низким значением для металлов значений акустического сопротивления.

Данные эффекты могут быть объяснены отмеченным нами ранее [18-20] повышением плотности и однородности структуры, что способствует снижению акустического сопротивления. При этом значения виброускорения, как для контрольных, так и обработанных образцов

превышают в 2-3 раза полученные при контрольном прохождении волны через стальную поверхность оснастки.

Уровень звукового давления изменяется от 4,1 Па для образцов с квазиизотропной структурой до 8,4 Па для образцов, армированных металлической сеткой. У обработанных образцов незначительно – на (7-9)% возрастает среднее за установленный период времени значение виброускорения, но при этом существенно (от 20% до 6 раз) снижается неравномерность значений, т.е. колебания становятся стабильными. У некоторых материалов (армированный металлической сеткой квазиизотропный и слоистый прессованный) значения виброускорения вообще не изменяются за цикл.

Вывод. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета особенностей структуры композиционных материалов при проектировании и изготовлении несущих конструкций, работающих в условиях вибраций.

Для стабилизации виброакустических характеристик армированных углеродными волокнами композиционных материалов целесообразно применение финишной операции модифицирования изделий в СВЧ электромагнитном поле с невысокой напряженностью, что позволит повысить надежность функционирования изделий.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Библиографический список:

1. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, дата последнего обращения сентябрь 2016 г.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»//Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Rand, B. Appleyard, S. Yardim, M., 1998 Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance, pp.177-193.
6. Thomas, G 2007, 'Composites come of age on 787', The Australian, 18 May, p. 2830.
7. Werfelman, L 2007, 'The Composite Evolution', AeroSafety World, March 2007, p. 17-21.
8. Лобанов Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. канд. техн. наук: Пермь, 2015. 130 с.
9. Ling, L.X, Jun, L.H, Wen Feng. X, and Zhi. L.K, 2007. «The effect of applied stress on damage mode of 3D C/C composites under bend-bend fatigue loading,». Science in China Series E-Technological Sciences, 50(1), pp. 97-102.
10. Krishnamurthy S. 2006, Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance, PhD thesis, Defence College of Management and Technology, CranfieldUniversity, Beds., p. 49-56.
11. Гусева Р. И. Особенности изготовления тонкостенных обшивок из углепластика в самолетостроении. Изменение технологических параметров в процессе формования / Гусева Р. И., ШаМингун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, № II-1 (18), 2014. С. 4-12.
12. Kumar S., T. D. Dang, F. E. Arnold, A. R. Bhattacharyya, B. G. Min, X. Zhang, R. A. Vaia, C. Park, W. W. Adams, R. H. Hauge, R. E. Smalley, S. Ramesh, and P.A. Willis. «Synthesis, Structure, and Properties of PBO/SWNT Composites,» Macromolecules, vol 35, 2002, pp 9039-9043.
13. Savage, G., 1993, Carbon-carbon Composites, Chapman&Hall, USA, pp.178-237.
14. Ajayan, P. M., L. S. Schandler, C. Giannaris, and A. Rubio, «Single-Walled Carbon Nanotube Composites: Strength and Weakness,» Advanced Materials, vol. 12, 2000, pp. 750-753.
15. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю. С. Архангельский – Саратов: Научная книга, 2011. - 560 с.
16. L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. – 2004. – № 11. – P. 33.
17. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле. Дис...доктора тех.н. Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т,

2009.

18. Zlobina I.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials/Zlobina I.V., Bekrenev N.V. *Научные технологии*. 2016. Т. 17. № 2.С. 25-30.
19. Zlobina I.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 870, p.p. 101-106.
20. Zlobina I.V. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field/Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K., // *International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2016*, Tomsk, Russia, SEP 19-26, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, Tom 1783, p.p. 020236-1 – 020236-4.

References:

1. Koshkin R.P. Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem: <http://spmagazine.ru/420>, data obrashcheniya 28.01.2017 g. [Koshkin R.P. The main directions of development and improvement of unmanned aerial systems: <http://spmagazine.ru/420>, access date January 28, 2017. (In Russ.)]
2. <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, data obrashcheniyasyabr' 2016 g. [<http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, access date September 2016 (In Russ.)]
3. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF porealizatsii «Strategicheskikh napravleniy razvitiya materialov i tekhnologiiikh pererabotkina period do 2030 goda». *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2015; 1(34):3–33. [Kablov E.N. Innovative developments FGUP «VIAM» GNTs RF on the implementation of «Strategic directions of materials development and processing technologies for the period until 2030». *Aviation materials and technologies* 2015;1 (34):3–33. (In Russ.)]
4. Kablov E.N. Materialy i khimicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2012; 82(6):520–530. [Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 82(6):520–530. (In Russ.)]
5. Rand B., Appleyard S., Yardim M. Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance. 1998. P.177-193.
6. Thomas G. Composites come of age on 787. *The Australian*, 18 May 2007. P. 2830.
7. Werfelman L. The Composite Evolution. *AeroSafetyWorld*. March 2007. P. 17-21.
8. Lobanov D.S. Eksperimental'nye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov i panelei s zapolnitelem: dis. kand. tekhn. nauk: Perm', 2015. 130 s. [Lobanov D.S. Experimental studies of the deformation and strength properties of polymeric composite materials and panels with filler. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation: Perm', 2015. 130 p. (In Russ.)]
9. Ling L.X., Jun L.H., Wen Feng X. and Zhi L.K. The effect of applied stress on damage mode of 3D C/C composites under bend-bend fatigue loading. *Science in China Series E-Technological Sciences*. 2007;50(1):97-102.
10. Krishnamurthy S. Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance. PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds. 2006. P. 49-56.
11. Guseva R.I., ShaMingun. Osobennosti izgotovleniya tonkostennykh obshivok iz ugleplastika v samoletostroenii. *Izmeneniye tekhnologicheskikh parametrov v protsesse formovaniya. Uchenyeyapiskii Komsomol'skogo na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014; II-1(18):4-12. [Guseva R.I., ShaMingun. Features of manufacturing thin-walled plating of carbon fiber in aircraft construction. Change of technological parameters in the process of moulding. *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*. 2014; II-1(18):4-12. (In Russ.)]
12. Kumar S., Dang T.D., Arnold F.E., Bhattacharyya A.R., Min B.G., Zhang X., Vaia R.A., Park C., Adams W.W., Hauge R.H., Smalley R.E., Ramesh S., Willis P.A. Synthesis, Structure, and Properties of PBO/SWNT Composites. *Macromolecules*. 2000;35:9039-9043.
13. Savage G. *Carbon-carbon Composites*. Chapman & Hall, USA. 1993. P.178-237.
14. Ajayan P.M., Schandler L.S., Giannaris C., Rubio A. Single-Walled Carbon Nanotube Composites: Strength and Weakness. *Advanced Materials*. 2000;12:750-753.
15. Arkhangel'skii Yu.S. *Spravochnayaknigapo SVCh-elektrotermii: spravochnik*. Saratov: Nauchnayakniga; 2011. 560 s. [Arkhangel'skii Yu.S. Reference book on microwave electrothermy: a reference book. Saratov: Nauchnayakniga; 2011. 560 p. (In Russ.)]
16. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004;11:P. 33.
17. Kalganova S.G. *Elektrotekhnologiya neteplovoi modifikatsii polimernykh materialov v SVCh elektromagnitnom pole*. Dis....doktoratekh.n. Saratov: Saratov.gos. tekhn. un-t, 2009. [Kalganova S.G. Electrotechnology of nonthermal modification of polymer in the microwave electromagnetic field. Dissertation of the Doctor of technical sciences. Saratov: Saratov State Technical University, 2009. (In Russ.)]
18. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials. *Научные технологии*. 2016;17(2):25-30.
19. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical char-

- acteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structure. *Solid State Phenomena*. 2016;870:101-106.
20. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G.K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field. *Proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*. Tomsk: AIP Publishing; 2016. Vol. 1783, P. 020236-1 – 020236-4.

Сведения об авторах:

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техническая механика и детали машин».

Павлов Сергей Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Математика и моделирование».

Морозов Данила Вячеславович – студент, кафедра «Сварка и металлургия».

Information about the authors:

Irina V. Zlobina– Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

Sergey P. Pavlov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Department of Mathematics and Modeling.

Danila V. Morozov – Student, Department of Welding and Metallurgy.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.09.2017.

Принята в печать 20.11.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.09.2017.

Accepted for publication 20.11.2017.

Для цитирования: Петровский В.А., Рубан А.Р., Саламех А. Некоторые результаты испытаний образцов на абразивный износ. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (4): 40-48. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-40-48

For citation: Petrovsky V.A., Ruban A.R., Salamekh A. Some sample test results for abrasive wear. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 40-48. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-40-48

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 620.178.16:621.879.45.064.004.62

ББК 34.413.2-01:38.623.034.5-046

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-40-48

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

Петровский В.А.³, Рубан А.Р.¹, Саламех А.²

¹⁻³ Астраханский государственный технический университет,

¹⁻³ 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия,

¹ e-mail: ²a.ruban1974@mail.ru, ² e-mail: a.salameh@mail.ru,

³ e-mail: v_a_petrovsky@mail.ru

Резюме. Цель. Надежность работы земснаряда в высокой степени зависит от работоспособности рабочего органа – черпаковой цепи, которая подвержена высоким динамическим нагрузкам, значительная часть которой приходится на шарнирное соединение. Износ узла крепления черпаковой цепи осложнён попаданием в зазор абразивных частиц. С учетом данных обстоятельств целью и задачами исследования являются: повышение износостойкости материалов узла крепления черпаковой цепи, имеющего абразивную составляющую общего процесса разрушения; определение стойкости абразивному изнашиванию исследуемых материалов; анализ результатов испытаний и рекомендации для повышения надежности и работоспособности узла соединения. **Метод.** Сравнительные испытания на абразивный износ образцов изготовленных по заводским технологиям материалов узла из сталей 38ХНЗМА, 110Г13Л с образцами: стали 38ХНЗМА, 110Г13Л с изменённой технологией изготовления; наплавкой электродами Э-50-УОНИ 13/55 с последующим упрочнением и без него; наплавкой электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗ-Т-590-НГ без упрочнения и с поверхностно-пластическим деформированием. Образцы испытывались на истирание о закреплённые абразивные частицы под давлением 27,3 кПа и 47,4 кПа. **Результат.** Получены характеристики абразивостойкости образцов из: 1. Сталей 38ХНЗМА, 110Г13Л, изготовленных по технологии завода и принятые за эталон; 2. Сталей 38ХНЗМА после закалки и низкого отпуска; 3. Сталей 110Г13Л после закалки и поверхностно-пластического деформирования; 4. Наплавки электродами Э-50-УОНИ 13/55 без упрочнения; упрочнённые поверхностно-пластическим деформированием; упрочнённые цементацией, закалкой и низким отпуском; 5. Наплавки электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗ-Т-590-НГ без упрочнения; с упрочнением поверхностно-пластическим деформированием. Построены графики зависимостей износов массового Δm и линейного Δl , относительной износостойкости I_m , I_l от твёрдости. **Вывод.** Изменение и дополнение заводских технологий деталей узла из сталей 38ХНЗМА, 110Г13Л повысит износостойкость пары трения. Восстановление изношенных пальцев наплавкой электродами Э-50-УОНИ 13/55 с последующей цементацией, закалкой и низким отпуском можно рекомендовать к применению в эксплуатации. Наплавка электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗ-Т-590-НГ с последующим поверхностно-пластическим деформированием значительно повысит износостойкость восстановленных пальцев.

Ключевые слова: земснаряд, черпаковая цепь, палец – втулка, износ, износостойкость, испытания на износ

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

SOME SAMPLE TEST RESULTS FOR ABRASIVE WEAR

Valeri A. Petrovsky³, Anatoliy R. Ruban¹, Ali Salamekh²

¹⁻³Astrakhan State Technical University,

¹⁻³16 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia,

¹e-mail: ²a.ruban1974@mail.ru, ²e-mail: a.salameh@mail.ru,

³e-mail: v_a_petrovsky@mail.ru

Abstract. Objectives In general, the reliability of dredgers is highly dependent on the performance of the scoop chain, a working body that is subject to high dynamic loads, a significant part of which falls on the swivel. The wear of the scoop chain swivel is complicated by the ingress of abrasive particles into the gap. Aims and tasks: increasing the wear resistance of the scoop chain swivel having an abrasive component of the general destruction process; determination of the abrasive wear durability of test materials; analysis of test results and recommendations for improving the reliability and efficiency of the swivel. **Methods** Comparative tests for the abrasive wear of samples manufactured according to proprietary technologies for the assembly of parts from 38HN3MA and 110G13L steels; samples manufactured from 38HN3MA and 110G13L steels using a modified manufacturing technology; surfacing using E-50-UONI 13/55 electrodes followed by subsequent hardening and without it; surfacing using E-190H5S7-LEZ-T-590-NG electrodes without hardening and with surface-plastic deformation. The samples were tested for abrasion against fixed abrasive particles at pressures of 27.3 kPa and 47.4 kPa. **Results** The abrasion resistance characteristics are obtained for samples: (1) made of 38HN3MA, 110Г13Л steels, manufactured by the factory technology and adopted as the standard; (2) made of 38HN3MA steel after quenching and low tempering; (3) made of 110G13L steel after quenching and surface-plastic deformation; (4) after surfacing using E-50-UONI 13/55 electrodes without hardening, hardened by surface-plastic deformation and hardened by carburising, quenching and low tempering; (5) after surfacing using E-190H5S7-LEZ-T-590-NG electrodes without hardening and with hardening by surface-plastic deformation. The dependences of the mass Δm and the linear Δl abrasions, as well as the relative wear resistance I_m , I_l on the hardness, are plotted. **Conclusions** Changing and supplementing the factory technologies of the swivel details manufactured from 38HN3MA and 110G13L steels will increase the wear resistance of the friction pair. Restoration of worn fingers by surfacing using E-50-UONI 13/55 electrodes with subsequent carburising, quenching and low tempering can be recommended for use in operation. Surfacing using E-190H5S7-LEZ-T-590-NG electrodes with subsequent surface-plastic deformation will significantly increase the wear resistance of the restored fingers.

Keywords: dredgers, scoop chain, finger bushing, wear, wear resistance, wear tests

Введение. Тема дноуглубления является для Астраханской области одной из проблемных. По данным пресс-службы председателя Правительства региона, заиливание рек и каналов ведет не только к ухудшению экологической ситуации, но и создает трудности для судоходства. При этом выполнять плановые дноуглубительные работы в полном объеме и своевременно не удается из-за нехватки специализированной техники. В 2015 году работы по дноуглублению были выполнены лишь на 76%: техника часто выходила из строя, требовала ремонта и не была заменена [1].

В настоящее время по России эксплуатируется около 75 черпаковых земснарядов. Рабочим органом земснаряда является черпаковая цепь, которая работает в очень сложных условиях, таких как абразивная среда и высокие динамические нагрузки. В узлах шарнирного соединения черпаковой цепи нагрузки превышают предел текучести материала, что приводит к пластической деформации втулок, колец и пальцев. Абразивный износ увеличивает зазор в узле

так, что приводит к изменению траектории движения по роульсам цепи и сходу цепи с верхнего приводного барабана. Во время эксплуатации при работе черпаковой цепи на глинистых и илистых грунтах пальцы меняются с частотой через 3...5 дней, а на песчаных грунтах и за одни сутки. Известно [2], что наличие абразивной прослойки в зазоре соединения увеличивает износ в 4 раза. При интенсивной эксплуатации земснаряда, по окончании навигации, заменяется весь комплект пальцев, втулок и колец на новые. Изношенные детали не восстанавливаются.

Для изготовления деталей узла шарнирного соединения черпаковой цепи [3-4] использовались и в настоящее время применяются стали различного класса 110Г13, Г13Х3Л, Г13ТЛ, Г13Ф2Л, 30ХН3, 30ХН3М, 30ХГСА, 37ХН3А, 38ХН3МА, 40ХН2, 50ХГФ, 60С2, ст.6, и другие. С целью замены дорогостоящих и дефицитных сталей проводились испытания со сталью Ст.5 и со сталью 45 с поверхностным борированием и закалкой, используемой для изготовления пальцев черпаковой цепи. При изготовлении таких пальцев, а также и при их восстановлении на рабочие поверхности наплавляли слой абразивостойкими электродами Т-620, а также по крупке феррохрома электродами 12АН/ЛИВТ и УОНИ 13/55. Упрочнения поверхностных слоев добились термомеханической обработкой и поверхностно-пластическим деформированием (ППД).

Проблема изнашивания в настоящее время актуальна, т.к. по данным [5] общая потеря материала на поверхностях трения при эксплуатации объектов (машин, механизмов, агрегатов) от износа составляет 55%, из которых 25% адгезионного износа, хотя и существует мнение, что абразивному износу может быть приписано около 50% всех проблем, связанных с износом [6-7]. Современным определением износа считается определение, данное в работе [8]. Существует и значительное множество видов абразивных испытаний [9-11].

Также известны многие эффективные критерии износостойкости. Так в работе [12] в качестве критерия принят модуль упругости E , а в работе [13] – комплекс HVa_H , где HV – твердость по Виккерсу, a_H – ударная вязкость.

Более сложный критерий был предложен [14] в виде: $\frac{\sigma_{\sigma} \cdot e_{\sigma}}{\sigma_{0,2} \cdot \delta}$ где σ_{σ} - предел прочности, $\sigma_{0,2}$ - предел текучести; e_{σ} - истинная максимальная пластическая деформация; δ - раскрытие трещины. Показано, что последний критерий можно заменить выражением $\frac{e_{\sigma}}{\delta}$.

Современным критерием, оценивающим изнашивание, является критерий $\sigma_{\sigma}\psi$ [15-16], имеющий энергетическую природу, где ψ – относительное сужение.

Постановка задачи. Основная цель данного исследования это увеличение долговечности и надёжности главного рабочего органа земснаряда – черпаковой цепи. Задача исследования – устранение повышенного износа втулок, колец и пальцев узла шарнирного соединения из-за попадания абразива в зазор.

Решение задачи находится в изменении существующей технологии изготовления деталей, применении альтернативных материалов (совместно с технологией) и технологий восстановления изношенных деталей.

На основе анализа полученных характеристик износа, привести рекомендации по выбору материала, оптимизации существующей технологии и восстановлению изношенных пальцев. Для этого необходимо установить износостойкость исследуемых материалов. Испытания на абразивный износ будут проводиться на образцах из сталей и наплавов приведённых ниже.

Часть указанного экспериментального исследования и результаты приведены в статье [17]. Материал настоящей статьи дополняет ранний в части большей выборки, а также были рассмотрены некоторые технологии восстановления пальцев.

Методы исследования. При моделировании процесса износа узла соединения черпаковой цепи (рис.1) применена схема трения исследуемого материала на плоскости о закреплённые абразивные частицы (рис. 2).

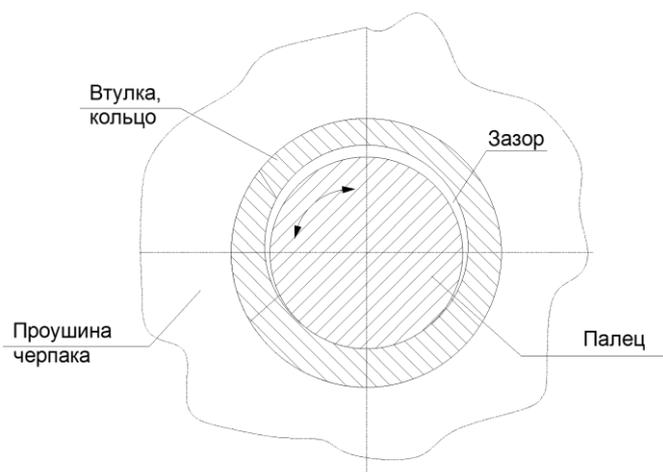


Рис. 1. Узел шарнирного соединения черпака
Fig. 1. Bucket joint assembly



Рис. 2. Принципиальная схема трения стэнда
Fig. 2. Schematic diagram of the friction stand

Для прогнозирования интенсивности изнашивания I_h деталей узла [18-19], применялась простейшая линейная модель механизма разрушения $I_h = i_h P_a / HB$, где i_h – масштабный уровень изнашивания; P_a – внешнее давление; HB – твердость материала по Бринеллю.

Для достижения поставленной задачи были изготовлены партии образцов, имеющие форму цилиндров диаметром $d = 15 \pm 0,1$ мм и высотой $h = 7 \dots 8$ мм:

- из стали 38ХНЗМА было изготовлено четыре партии образцов (в каждой партии 3 серии по 3 образца): без изменения структуры; отожженные при температуре 750^0 С в течение 1 часа и охлажденные вместе с печью; отожженные при температуре 750^0 С в течение 1 часа и охлажденные вместе с печью, которые в последующем были закалены с температуры 850^0 С на масло по техническим требованиям завода-изготовителя и отпущенные при температуре 590^0 С, а четвертая партия – аналогично предыдущей, только отпущенные при 200^0 С;
- из стали 110Г13Л было изготовлено две партии образцов: без изменения структуры; закаленные с температуры $1050 \dots 1075^0$ С на воду по техническим требованиям завода изготовителя земснаряда;
- из стали 20, подвергнутых наплавке в 2 слоя электродами Э50-А (УОНИ 13/55) три партии образцов: без упрочнения; упрочненных ППД со степенью деформации поверхности 5,4 %; упрочненных цементацией в твердом карбюризаторе (8 часов) с последующей закалкой (900^0 С) и низким отпуском при температуре 180^0 С;
- из стали 20, подвергнутых наплавке в 2 слоя электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗТ-590-НГ две партии образцов: без упрочнения; упрочненных ППД со степенью деформации 4,4%.

Изготовленные образцы крепились в оправку экспериментальной установки и подвергались обязательной притирке торцевой (плоской) поверхностью с целью достижения полного прилегания к поверхности абразивного круга. Затем проводился селективный отбор образцов по высоте. В серии испытывалось по 3 образца, причем их высота не отличалась более чем на 0,1 мм.

Испытания образцов на износ проводились на экспериментальной установке для проведения испытаний материала на изнашивание о закрепленные абразивные частицы с разными нагрузками $P_1 = 27,3$ кПа (эксперимент №1) и $P_2 = 47,4$ кПа (эксперимент №2).

Причем испытания с нагрузкой P_2 проводились на тех же образцах после испытаний под нагрузкой P_1 . Нагрузки на образцы определялись техническими возможностями стэнда. До испытаний были проведены измерения высоты, массы, твердости образцов на поверхности трения. Образцы устанавливались в оправку, затем оправка размещалась на плоскости круга. Устанавливался скоростной режим, при котором круг совершал один оборот примерно за 3 секунды. Включался обдув для удаления продуктов износа из зоны трения. По достижении 500

циклов (оборотов) вращение останавливалось. Испытания с нагрузкой P_2 проводились аналогично предыдущим.

Обсуждение результатов. По каждой партии образцов из 9 штук была определена средняя величина линейного, массового износов и изменение твёрдости по каждому эксперименту, которые представлены в таблицах 1 – 3.

Таблица 1. Результаты испытаний на износ при давлении $P = 27,3$ кПа

Table 1. Results of the wear test at a pressure $P = 27.3$ kPa

№ партии	Деталь, марка материала	Состояние образцов	Твёрдость до испытаний	Твёрдость после испытаний	Линейный износ, мм	Массовый износ в граммах
1	Палец, сталь 38ХНЗМА	Вырезаны из пальца	25,0 HRC	26,1 HRC	0,334 ○	0,434 ○
2		Отжиг	30,3 HRC	31,3 HRC	0,291 △	0,402 △
3		Отжиг, закалка и высокий отпуск по технологии завода-изготовителя	38,3 HRC	41,0 HRC	0,310 □	0,390 □
4		Отжиг, закалка и низкий отпуск	49,6 HRC	53,6 HRC	0,172 ´	0,215 ´
5	Втулка, сталь 110Г13Л	Вырезаны из втулки	81,0 HRB	80,6 HRB	0,108 ●	0,085 ●
6		Закалка по технологии завода-изготовителя	87,8 HRB	86,7 HRB	0,049 ▲	0,082 ▲

Таблица 2. Результаты испытаний на износ при давлении $P = 47,4$ кПа

Table 2. Results of the wear test at a pressure $P = 47.4$ kPa

№ партии	Деталь, марка материала	Состояние образцов	Твёрдость до испытаний	Твёрдость после испытаний	Линейный износ, мм	Массовый износ в граммах
1	Палец, сталь 38ХНЗМА	Вырезаны из пальца	26,1 HRC	25,9 HRC	0,632 ○	0,861 ○
2		Отжиг	31,3 HRC	33,1 HRC	0,695 △	0,921 △
3		Отжиг, закалка и высокий отпуск по технологии завода-изготовителя	41,0 HRC	40,5 HRC	0,701 □	0,929 □
4		Отжиг, закалка и низкий отпуск	53,6 HRC	54,0 HRC	0,265 ´	0,345 ´
5	Втулка, сталь 110Г13Л	Вырезаны из втулки	80,6 HRB	82,3 HRB	0,169 ●	0,196 ●
6		Закалка по технологии завода-изготовителя	86,7 HRB	86,8 HRB	0,140 ▲	0,180 ▲

Примечание: во всех таблицах за численным значением показателя стоит символ соответствия на рисунках 3-6.

По результатам экспериментов (табл.1, 3) были построены графики зависимости массового и линейного износов от твёрдости материала деталей узла при различных нагрузках (рис.3,5).

Износостойкость, как обратная величина массового и линейного износа, при разных нагрузках, показана в табл. 4. Зависимость износостойкости от твёрдости, более информативно показана на рис. 4 и 6, где при увеличении значения твёрдости, функционально увеличивается износостойкость испытуемого материала.

Измерение твёрдости в экспериментах № 1 и № 2 показали, что она изменилась незначительно, в пределах 1...4 единиц по шкале HRC, как в сторону увеличения, так и снижения. При давлении на образец $P = 27,3$ кПа максимальный линейный и массовый износ был у образцов из стали 38ХНЗМА (партия № 1), имеющие низкую твёрдость (25...26HRC), а минимальный – партия № 4 при твердости 53,6HRC. Самый низкий износ показала сталь 110Г13Л (пар-

тия № 6), изготовленная по техническим требованиям завода земснаряда при твердости поверхности 86...87HRB.

Таблица 3. Результаты испытаний на износ восстановленных наплавкой образцов
Table 3. Results of tests for wear recovered by surfacing samples

№ партии	Материал наплавки	Вид упрочнения	Давление кПа	Твёрдость до испытаний	Твёрдость после испытаний	Линейный износ, Мм	Массовый износ грамм
7	УОНИ 13/55	Без упрочнения	27,3	5,8 HRC	5,5 HRC	0,53 ♦	0,73 ■
8	УОНИ 13/55	Без упрочнения	47,4	5,5 HRC	4,1 HRC	1,01 ♦	1,40 ■
9	УОНИ 13/55	ППД	47,4	17,2 HRC	16,0 HRC	1,05 ♦	1,37 ■
10	УОНИ 13/55	Цементация, закалка, низкий отпуск	47,4	57,3 HRC	63,7 HRC	0,19 ♦	0,27 ■
11	T-590	Без упрочнения	47,4	53,1 HRC	55,0 HRC	0,10 ♦	0,12 ■
12	T-590	ППД	47,4	53,0 HRC	52,4 HRC	0,09 ♦	0,11 ■

Таблица 4. Массовая и линейная износостойкость испытанных образцов
Table 4. Mass and linear wear resistance of tested samples

№ партии	Деталь, марка материала, наплавка	Состояние образцов, вид упрочнения	Нагрузка 27,3 кПа		Нагрузка 47,4 кПа	
			Массовая износостойкость, I_m^{-1} , гр.	Линейная износостойкость, I_l^{-1} , мм	Массовая износостойкость, I_m^{-1} , гр.	Линейная износостойкость, I_l^{-1} , мм
1	Палец, сталь 38ХНЗМА	Вырезаны из пальца	2,30 ○	2,99 ○	1,16 ○	1,58 ○
2		Вырезаны из пальца, отжиг	2,49 Δ	3,44 Δ	1,09 Δ	1,44 Δ
3		Отжиг, закалка и высокий отпуск по технологии завода-изготовителя	2,56 □	3,23 □	1,08 □	1,43 □
4		Отжиг, закалка и низкий отпуск	4,65 °	5,81 °	2,90 °	3,77 °
5	Втулка, сталь 110Г13Л	Вырезаны из втулки	11,76 ■	9,25 ■	5,10 ■	5,92 ■
6		Закалка по технологии завода-изготовителя	12,20 ▲	20,41 ▲	5,55 ▲	7,14 ▲
7	Наплавка УОНИ 13/55	Без упрочнения	1,37 ■	1,89 ▲	–	–
8	Наплавка УОНИ 13/55	Без упрочнения	–	–	0,71 ■	0,99 ♦
9	Наплавка УОНИ 13/55	ППД	–	–	0,73 ■	0,95 ♦
10	Наплавка УОНИ 13/55	Цементация, закалка, низкий отпуск	–	–	3,70 ■	5,25 ♦
11	Наплавка T-590	Без упрочнения	–	–	8,33 ■	10,00 ♦
12	Наплавка T-590	ППД	–	–	9,09 ■	11,11 ♦

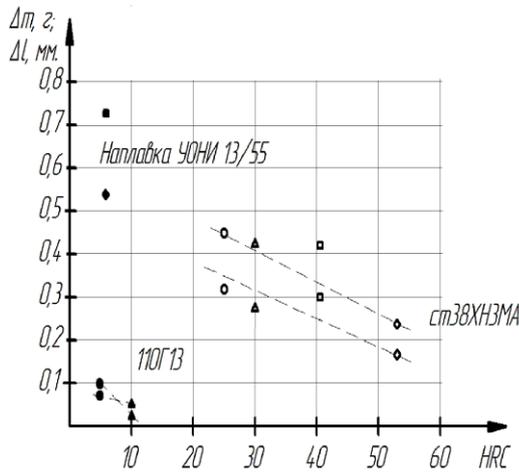


Рис. 3. Зависимость массового и линейного износов от твёрдости материала деталей узла при нагрузке 27,3 кПа

Fig. 3. Dependence of the mass and linear wear on the hardness of the material parts of the assembly at a load of 27.3 kPa

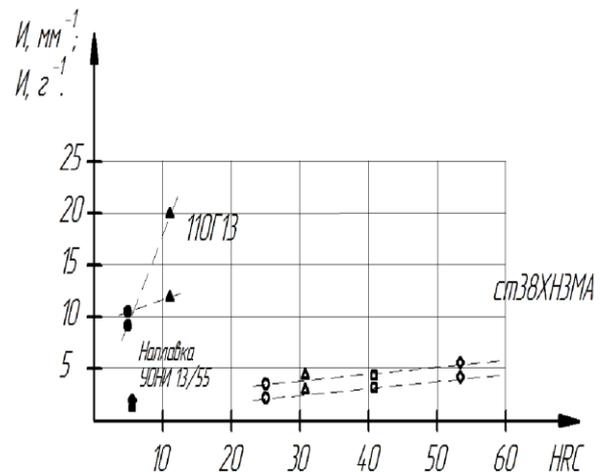


Рис. 4. Зависимость износостойкости от твёрдости материала деталей узла при нагрузке 27,3 кПа

Fig. 4. Dependence of wear resistance on the hardness of the material of the parts of the assembly at a load of 27.3 kPa

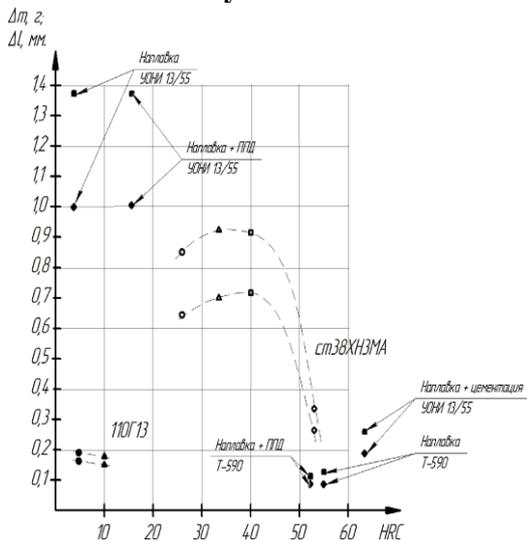


Рис. 5. Зависимость массового и линейного износов от твёрдости материала деталей узла при нагрузке 47,4 кПа

Fig. 5. Dependence of mass and linear wear on the hardness of the material of the parts of the assembly at a load of 47.4 kPa

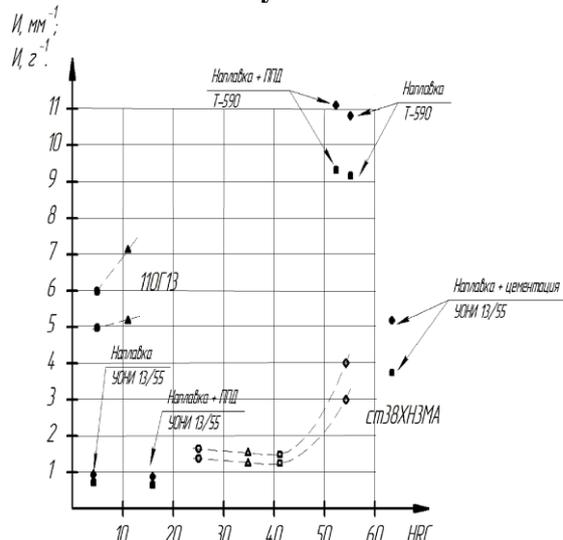


Рис. 6. Зависимость износостойкости от твёрдости материала деталей узла при нагрузке 47,4 кПа

Fig. 6. Dependence of wear resistance on the hardness of the material of the parts of the assembly at a load of 47.4 kPa

При давлении на поверхности образца $P = 47,4$ кПа для стали 38ХН3МА картина зависимости изменилась: с увеличением твёрдости износ увеличивается для образцов из партии № 2 и № 3. И только на образцах партии № 4 износ резко уменьшился в 2,5 раза.

Для образцов из стали 110Г13Л самый малый износ был у тех, которые были изготовлены по техническим требованиям завода-изготовителя. Это самый минимальный износ, при твёрдости 86...87HRV по сравнению со сталью 38ХН3МА, имеющей твердость около 54HRC. В тоже время энергетический критерий $\sigma_s \cdot \psi$ для стали 110Г13Л по данным [15] (закалка) составил – 36 ГПа, а для стали 38ХН3МА (закалка и высокий отпуск) – 62 ГПа, т.е. для стали 38ХН3МА предполагается более высокая износостойкость. Однако наши исследования показали более высокую надёжность стали 110Г13Л по износу, а низкий показатель критерия можно объяснить отсутствием или слабым деформационным упрочнением сплава в ходе эксперимента. Очевид-

но, что различие в структуре сплавов (аустенитная и перлитная) влияет на сопротивление абразивному изнашиванию.

Вывод. Таким образом, по результатам эксперимента, и на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Твёрдость в процессе эксперимента практически не изменилась;
2. Сталь 110Г13Л показала самую высокую износостойкость ($I_m^{-1} = 12,20$ гр.; $I_l^{-1} = 20,41$ мм) при невысоких нагрузках (27,3 кПа), если втулка будет изготовлена по технологии завода изготовителя земснаряда. Технология завода при изготовлении деталей из стали 110Г13Л оправдывает максимальную износостойкость. Для повышения абразивной стойкости стали 110Г13Л необходима дополнительная упрочняющая технология обработки давлением, дополняющая технологию завода изготовителя земснаряда;
3. Для деталей из стали 38ХНМ3А, согласно результатам эксперимента, технология завода не оправдывает своё назначение. Сталь 38ХНМ3А показала высокую износостойкость ($I_m^{-1} = 4,65$ гр.; $I_l^{-1} = 5,81$ мм) при нагрузках (27,3 кПа), ($I_m^{-1} = 2,90$ гр.; $I_l^{-1} = 3,77$ мм) при нагрузках (27,3 кПа), если палец будет подвергнут закалке и низкому отпуску. Эта технология термообработки не применяется заводом изготовителем. Целесообразно увеличение твёрдости стали 38ХНМ3А за счёт изменения технологии термообработки пальца;
4. Наплавка УОНИ13/55 без упрочнения и с ППД показала наихудший результат ($I_m^{-1} = 0,71$ гр.; $I_l^{-1} = 0,99$ мм и $I_m^{-1} = 0,73$ гр.; $I_l^{-1} = 0,71$ мм соответственно);
5. Наплавка электродами Э50-А-УОНИ13/55 с последующей цементацией, закалкой и низким отпуском, показала значительное преимущество в износостойкости ($I_m^{-1} = 3,70$ гр.; $I_l^{-1} = 5,25$ мм; 63,7HRC) относительно стали 38ХНМ3А, изготовленной по технологии завода ($I_m^{-1} = 1,08$ гр.; $I_l^{-1} = 1,43$ мм), а также с изменённой технологией (низкий отпуск вместо высокого) ($I_m^{-1} = 2,90$ гр.; $I_l^{-1} = 3,77$ мм; 53,6HRC) при близких показателях твёрдости. Восстановление пальцев из стали 38ХНМ3А можно рекомендовать проводить наплавкой электродами Э50-А-УОНИ 13/55 с последующей химико-термической и (или) термической обработками;
6. Наплавка электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗТ-590-НГ имеет самые высокие показатели износостойкости ($I_m^{-1} = 9,09$ гр.; $I_l^{-1} = 11,11$ мм). Наплавка износостойкими электродами Э-190Х5С7-ЛЭЗТ-590-НГ с последующим ППД рекомендована для восстановления пальцев.

Библиографический список:

1. <http://astravolga.ru/problemu-dnougлубителных-rabot-na-kaspии-obsudili-v-moskvvet/> Газета ВОЛГА / 10.11.2016.
2. Лукин Н.В. Суда технического флота. М. Машиностроение. 1992. – 335 с.
3. Картышов А.В. Износостойкость деталей земснарядов. Л. Машиностроение. 1972. – 160 с.
4. Донских Д.Ф., Погодаев Л.И. Способы повышения надёжности шарнирного соединения черпаковой цепи дноуглубительных земснарядов. // Трение, износ, смазка.-2010.- Том 13, №44. – с.15-27.
5. Hawk J.A. Wilson R. D., Catrpillar M. T. Abrasive wear failures // ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. – 2002 (11), 906-921
6. Nutchings I. M. Abrasion in wear and manufacturing processes. Metal. Ital. – 2002(94), N 2, 17-21
7. Canale L. C. F. Abrasive wear resistance of a Fe based hard coating containing Cr and Nb // 20th ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA. – 2000, 9-12
8. Gates J. D., Gore G. J. Wear of Metals: Philosophies and Practicalities. Mater. Forum. – 1995 (19), 53-89
9. Hawk J. A. Abrasive wear testing // ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. – 2000 (8), 323-337
10. Zanoria E.S. Application of the ring-on-ring test for abrasive wear modeling of rolling undercarriage components in track-type machines // Wear. – 2004 (257), N 1-2, 205-214
11. Stachowiak G. W., Stachowiak G. B. Wear mechanism in ball-cratering test with large abrasive particles // Wear. – 2004 (256), N 6, 600-607
12. Хрущёв М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. – 252 с.
13. Козырев С.П. Гидроабразивный износ при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
14. Сущенко С.А. Ударно-абразивный износ и механические свойства наплавочных материалов // Проблемы трения и изнашивания.-1990- вып.37 – с. 34-38.
15. Сорокин Г.М., Мальшев В.Н. Аспекты металловедения в природе механического изнашивания // Трение и износ. - 2005 – Т 26-№6.- с. 598-607.
16. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра – 2000- 317 с.
17. Петровский В.А., Рубан А.Р. Результаты исследования абразивного износа деталей черпаковой цепи

земснаряда / Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – Астрахань: Издательство АГТУ. – 2014. – № 1. – С. 94 – 99.

References:

1. <http://astravolga.ru/problemu-dnougubitelnyx-rabot-na-kaspii-obsudili-v-moskvet/> Gazeta VOLGA. 10.11.2016. [<http://astravolga.ru/problemu-dnougubitelnyx-rabot-na-kaspii-obsudili-v-moskvet/> VOLGA newspaper. 10.11.2016. (In Russ.)]
2. Lukin N.V. Suda tekhnicheskogo flota. M.: Mashinostroenie; 1992. 335 s. [Lukin N.V. Vessels of the technical fleet. M.: Mashinostroenie; 1992. 335 p. (In Russ.)]
3. Kartyshev A.V. Iznosostoikost' detalei zemsnyaryadov. L.: Mashinostroenie; 1972. 160 s. [Kartyshev A.V. Wear resistance of dredge parts. L.: Mashinostroenie; 1972. 160 p. (In Russ.)]
4. Donskikh D.F., Pogodaev L.I. Sposoby povysheniya nadezhnosti sharnirnogo soedineniya cherpakovoi tsepi dnougubitel'nykh zemsnyaryadov. Trenie, iznos, smazka. 2010;13(44):15-27. [Donskikh D.F., Pogodaev L.I. Ways to increase the reliability of the articulation of dredger scoop chain. Trenie, iznos, smazka. 2010;13(44):15-27. (In Russ.)]
5. Hawk J.A., Wilson R.D., Catrillar M.T. Abrasive wear failures. ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. 2002 (11):906-921.
6. Nutchings I.M. Abrasion in wear and manufacturing processes. Metal. Ital. 2002;94(2):17-21.
7. Canale L.C.F. Abrasive wear resistance of a Fe based hard coating containing Cr and Nb. 20th ASM Heat Treating Society Conf. St. Louis, MO USA. 2000:9-12.
8. Gates J.D., Gore G.J. Wear of Metals: Philosophies and Practicalities. Mater. Forum. 1995(19):53-89.
9. Hawk J.A. Abrasive wear testing. ASM Handbook. Materials Park, OH, ASM International. 2000(8):323-337.
10. Zanoria E.S. Application of the ring-on-ring test for abrasive wear modeling of rolling undercarriage components in track-type machines. Wear. 2004;257(1-2):205-214.
11. Stachowiak G.W., Stachowiak G.B. Wear mechanism in ball-cratering test with large abrasive particles. Wear. 2004; 256(6):600-607.
12. Khrushchev M.M., Babichev M.A. Abrazivnoe iznashivanie. M.: Nauka; 1970. 252 s. [Khrushchev M.M., Babichev M.A. Abrasive wear. M.: Nauka; 1970. 252 p. (In Russ.)]
13. Kozyrev S.P. Gidroabrazivnyi iznos pri kavitatsii. M.: Mashinostroenie; 1971. 240 s. [Kozyrev S.P. Hydroabrasive wear during cavitation. M.: Mashinostroenie; 1971. 240 p. (In Russ.)]
14. Sushchenko S.A. Udarno-abrazivnyi iznos i mekhanicheskie svoystva naplavochnykh materialov. Problemy treniya i iznashivaniya. 1990;37:34-38. [Shock-abrasive wear and mechanical properties of surfacing materials. Problems of friction and wear. 1990;37:34-38. (in Russ.)]
15. Sorokin G.M., Malyshev V.N. Aspekty metallovedeniya v prirode mekhanicheskogo iznashivaniya. Trenie i iznos. 2005; 26(6):598-607. [Sorokin G.M., Malyshev V.N. Aspects of metal science in the nature of mechanical wear. Friction and wear. 2005; 26(6):598-607. (In Russ.)]
16. Sorokin G.M. Tribologiya staley i splavov. M.: Nedra; 2000. 317 s. [Sorokin G.M. Tribology of steels and alloys. M.: Nedra; 2000. 317 p. (In Russ.)]
17. Petrovskii V.A., Ruban A.R. Rezul'taty issledovaniya abrazivnogo iznosa detalei cherpakovoi tsepi zemsnyaryada. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014;1:94-99. [Petrovskii V.A., Ruban A.R. Results of the research of abrasive wear of details of dredger scoop chain. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2014;1:94-99. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Петровский Валерий Александрович – старший преподаватель, кафедра судостроения и энергетических комплексов морской техники.

Рубан Анатолий Рашидович – кандидат технических наук, доцент, кафедра судостроения и энергетических комплексов морской техники.

Саламех Али – кандидат технических наук, доцент, кафедра судостроения и энергетических комплексов морской техники.

Information about the authors:

Valeri A. Petrovsky – Senior Lecturer, Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering.

Anatoliy R. Ruban – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering.

Ali Salamekh – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.10.2017.

Принята в печать 11.11.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.10.2017.

Accepted for publication 11.11.2017.

Для цитирования: Бекренев Н.В., Луков Д.Ю. Ультразвуковой многочастотный генератор для обеспечения ультразвукового формирования композиционных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):49-57. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

For citation: Bekrenev N.V., Lukov D. Yu. Ultrasonic multifrequency generator for ensuring ultrasonic formation of composite materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (4):49-57. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.047/048

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-49-57

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бекренев Н.В.¹, Луков Д.Ю.²

¹⁻²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

¹⁻²410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

¹e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, ²e-mail: lukov-d@yandex.ru

Резюме: Цель. Целью исследования явилась разработка ультразвукового генератора технологического назначения с широким диапазоном частоты выходного напряжения. **Метод.** Выполнены макетно-экспериментальные работы и разработана функциональная схема многочастотного ультразвукового генератора, реализованная в экспериментальном образце, а также конструкция ультразвуковой пьезокерамической системы, способная работать на двух резонансных частотах 22 и 44 кГц. **Результат.** На основе анализа особенностей структуры современных композиционных материалов и технологий формования изделий из них выявлена целесообразность введения в технологический процесс операции ультразвуковой пропитки, что может обеспечить повышенную равномерность заполнения структуры связующим и однородность физико-механических характеристик. Разработана схема ультразвукового генератора, встраиваемого в технологическое оборудование, обеспечивающая формирование гармонических сигналов с изменяемой в пределах 20-60 кГц частотой и мощностью, регулируемой от 100 до 500 Вт, что позволит реализовать высокоэффективные ультразвуковые технологии обработки материалов с неоднородной формируемой в процессе изготовления изделия структурой. Проведены исследования по параметрической оптимизации преобразователя с учетом конкретных видов нагрузок. Особенностью источника питания генератора является его универсальность с точки зрения диапазонов частот и напряжения, а также требуемых показателей качества генерируемой им энергии. Генератор позволяет программировать опорную частоту с ноутбука и затем осуществлять тонкую ее настройку в резонанс с излучателем с дискретностью 10 Гц непосредственно с панели управления. Встроенный микропроцессор позволяет запоминать введенную с ноутбука опорную частоту. **Вывод.** Применение многочастотных источников ультразвука позволит оптимизировать параметры воздействия при ультразвуковой пропитке армированных волокнами композиционных материалов и их финишной размерной обработке в зависимости от плотности структуры и примененной схемы армирования.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Ключевые слова: ультразвук, производительность, пропитка, композиционные материалы, генератор, функциональная схема, резонансный инвертор, программируемая частота

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY EFFICIENT DESALINATOR

*Nikolaj V. Bekrenev*¹, *Dmitriy Yu. Lukov*²

¹⁻²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

¹⁻²77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

¹e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, ²e-mail: lukov-d@yandex.ru

Abstract. Objectives The aim of the research was the development of an ultrasonic generator of technological design with a wide frequency range of output voltage. **Methods** The prototype works were performed and the functional scheme of the multifrequency ultrasonic generator realised in the experimental sample was developed, as well as the design of an ultrasonic piezoceramic system capable of operating at two resonant frequencies of 22 and 44 kHz. **Results** Based on the feature analysis of the modern composite material structure and technologies for moulding products, it was found to be expedient to introduce ultrasonic impregnation into the technological process, which can ensure increased uniformity in filling the structure with a binder as well as greater homogeneity of physico-mechanical characteristics. A schema for the ultrasonic generator built into the technological equipment is developed, providing the formation of harmonic signals with a frequency alternating from 20 to 60 kHz, and power adjustable from 100 to 500 W, which will allow the implementation of high-performance ultrasonic technologies for processing materials with a heterogeneous structure formed during the manufacturing process. The studies were carried out according to parametric optimisation of the converter taking into account the specific load types. A special feature of the generator's power supply is its versatility in terms of frequency and voltage ranges, as well as the required quality indicators of the energy generated. The generator allows the reference frequency to be programmed using a laptop and then fine-tuned from the control panel in resonance with the radiator with a resolution of 10 Hz directly. The built-in microprocessor allows the reference frequency entered from the laptop to be stored in the memory. **Conclusion** The use of multifrequency ultrasonic sources allows the acting parameters to be optimised for ultrasonic impregnation of fibre-reinforced composite materials as well as their finishing dimensional processing, depending on the density of the structure and the reinforcement scheme used.

Acknowledgment The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

Keywords: ultrasonic, performance, impregnation, composite materials, generator, functional scheme, resonant inverter, programmed frequency

Введение. Разработка и внедрение перспективных транспортных систем, в частности летательных аппаратов, требуют опережающего создания новых высокопрочных и легких материалов и совершенствования технологий формообразования конструктивных элементов из них. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1-10].

В настоящее время на долю углепластиков приходится до половины веса современного самолета как боевого, так и гражданского и до 70 % их поверхности [1-4]. Внедрение композиционных материалов позволяет снижать вес летательных аппаратов на тонны [1]. Авиационные полимерные композиты в настоящее время условно разделяют на 4 группы: конструкционные пластики для слабо- и средненагруженных конструкций; баллистически-стойкие пластики для защитных конструкций; антифрикционные пластики для тяжело нагруженных узлов трения, звукопоглощающие пластики для снижения шума самолетов на местности. Особенностью во-

локнистых полимерных композиционных материалов является влияние на физико-механические свойства технологии изготовления и существование материала только в виде изделия, например, кожух звукопоглощающего контура авиационного двигателя [5].

Поэтому именно технология создания материала является определяющим фактором обеспечения требуемого качества изделий. Типовая технология формирования армированных композиционных материалов заключается в послойной выкладке пропитанных связующим волокнистых структур с последующим прессованием и отверждением [6-7].

Особенности данной технологии приводят к различным дефектам [8-10], к которым относятся: расслоение; трещины в связующем, складки, подмятие слоев, царапины, риски, забоины, отрыв поверхностных слоев, коробление, поводки и прогибы готового изделия, неправильная укладка наполнителя, оголение основы, нахлесты препрега, срезы препрега, зоны с повышенным содержанием пор и пузырьков и т.п. Особенно важна для надежного функционирования изделия в условиях динамических нагрузок качественная равномерная пропитка армирующих слоев связующим, что весьма затруднено вследствие его высокой вязкости. Как правило, надежный контакт и адгезия обеспечиваются на межслойном уровне, а внутрислойное взаимодействие оказывается сниженным из-за меньшего проникновения связующего в поры и межволоконные зазоры вследствие относительно плохой смачиваемости волокон и большого поверхностного натяжения связующего, находящегося в вязко-текущем состоянии.

Известно, что мощные ультразвуковые поля способствуют активизации не только кавитационных, но и капиллярных процессов в жидких средах, способствуя резкому повышению проникновения жидкости по капилляру [11-13].

Применение ультразвука позволяет существенно повысить качество и эксплуатационные показатели изделий из реактопластов путем их комбинированной термической обработки и сварки или опрессовки [14].

Экспериментальные исследования ультразвуковых процессов свидетельствуют о сложном взаимовлиянии структуры обрабатываемого материала, частоты и амплитуды ультразвука на характер воздействия на поверхностный слой и его качество [15]. Поэтому для повышения качества и однородности структуры изделий из композиционных материалов можно предложить включение в технологический цикл операции ультразвуковой пропитки с одновременной опрессовкой. При этом вследствие того, что связующее представляет собой относительно вязкую субстанцию с низкой текучестью, необходимо обеспечивать достаточно высокую интенсивность ультразвука в материале для формирования капиллярных эффектов и акустических течений.

С другой стороны, чрезмерно высокая интенсивность ультразвука может привести к превышению кавитационного порога, в связующем, возникновению мощной кавитации и местной деструкции твердых армирующих волокон. Поэтому при выборе акустических режимов следует расчетным путем определять амплитуду и частоту ультразвука в каждом конкретном случае применительно к данному материалу, используя зависимости и справочные данные, приведенные в [11, 16].

В этой связи с учетом существенного различия в структуре и свойствах композиционных материалов, определяемых применением различных армирующих волокон (углеродных, стеклотканых, арамидных), а также разных видов связующего необходимо применение ультразвукового воздействия различного частотного диапазона, гибко подбираемого к конкретному материалу, в том числе с учетом и упомянутых выше технологических неоднородностей.

Практически реализовать предлагаемую технологию в настоящий момент представляется затруднительным, поскольку не решенными остаются два вопроса: создание многочастотных ультразвуковых генераторов не лабораторного, а промышленного назначения и разработка ультразвуковой колебательной системы, рассчитанной на две и более резонансные частоты. Передача же ультразвуковой энергии в материал бесконтактным методом при помощи широкодиапазонных антенн не эффективна, вследствие больших потерь ультразвуковой энергии из-за отражения волны на границе раздела воздуха и композиционного материала, который вследствие высокого процентного содержания твердых армирующих волокон можно считать твердым. В частности коэффициент отражения на границе «воздух-твердое тело» по данным [17-18] превышает 0,9.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка ультразвукового генератора технологического назначения с широким диапазоном частоты выходного напряжения.

Методы исследования. Нами выполнены исследования [19] и разработана функциональная схема многочастотного ультразвукового генератора (рис. 1), реализованная в экспериментальном образце, а также конструкция ультразвуковой пьезокерамической колебательной системы, способная работать на двух резонансных частотах 22 и 44 кГц [20].

Ультразвуковой генератор имеет следующие особенности. Источник питания выполняется как универсальный, поскольку должен обеспечивать четыре режима, соответствующие четырем видам нагрузки. Каждый режим характеризуется частотой f_i и действующим значением напряжения U_i выходной сети и задается оператором вручную с помощью блока 8 – «Задатчик режима». Этот блок задает частоту f_i для системы управления 7 резонансным инвертором 5 и уставку напряжения U_{i0} для системы управления 6 импульсным преобразователем 3. Трансформатор 1 служит для гальванической развязки входной и выходной сетей и согласования напряжений этих сетей. Изменение режимов может потребовать изменения структуры и параметров силовых элементов резонансного инвертора, которые могут выполняться как вручную, так и автоматически.

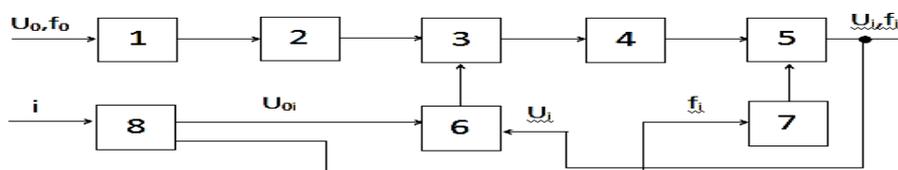


Рис. 1 Функциональная схема источника питания ультразвукового генератора
 1 – входной трансформатор, 2 – выпрямитель, 3 – импульсный преобразователь постоянно-го тока, 4 – фильтр, 5 – резонансный инвертор, 6 – система управления импульсным преобразователем постоянного тока, 7 – система управления инвертором, 8 – задатчик режима

Fig. 1. Functional diagram of power supply of ultrasonic generator
 1 - input transformer, 2 - rectifier, 3 - impulse converter for constant current, 4 - filter, 5 - resonant inverter, 6 - control system for pulsed DC converter, 7 - inverter control system, 8 - mode dial

Особенностью источника питания, необходимого для решения обозначенных выше задач, является его универсальность с точки зрения диапазонов частот и напряжения, а также требуемых показателей качества генерируемой им энергии.

При этом важнейшим требованием является надежность источника и, как следствие, максимальная простота силовой схемы. Упрощенная схема источника питания, предложенная к применению в генераторе, приведена на рис. 2.

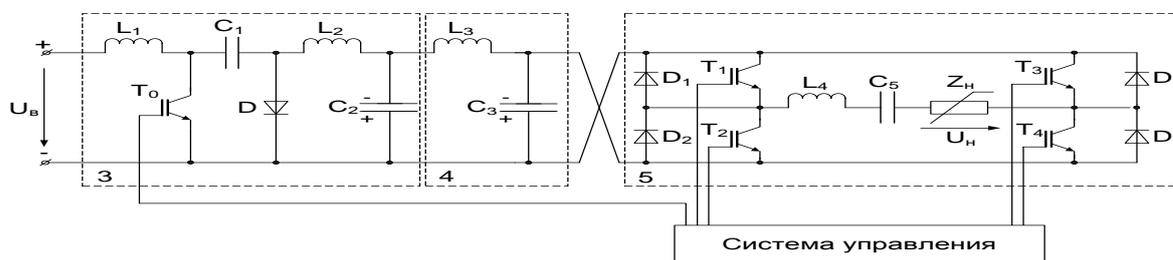


Рис. 2. Силовая схема источника питания
 U_g – напряжение на выходе выпрямителя 2; U_n – напряжение на нагрузке
Fig. 2. Power circuit power supply
 U_g - voltage at the output of the rectifier 2; U_n - voltage on the load

Здесь конкретизированы блоки 3, 4, 5 функциональной схемы рис. 1.

В виду необходимости изменения напряжения в достаточно широких пределах и его стабилизации в качестве регулируемого звена постоянного тока выбрана схема импульсного преобразователя Кука. Ее преимущество состоит в возможности получения величины выходного

напряжения (среднее значение напряжения на конденсаторе C_2) как ниже, так и выше напряжения на входе.

Инверторная часть преобразователя выполнена по схеме резонансного инвертора тока [21]. Это определяется, как диапазоном рабочих частот, так и требованием обеспечить наилучшую форму кривой напряжения, достигаемую без применения сложных многоуровневых схем.

Обсуждение результатов. Проведенные исследования математической модели преобразователя по схемам рис.1 и 2 позволяют сделать вывод о его работоспособности. Известно, что резонансные инверторы достаточно чувствительны к характеру нелинейной нагрузки. Поэтому были проведены исследования, связанные с необходимостью параметрической оптимизации преобразователя с учетом конкретных видов нагрузок.

Исследования выполнялись на макете электрической схемы генератора, подключаемой на пьезокерамический стержневой преобразователь в качестве активной нагрузки (рис. 3).



Рис. 3 Макет схемы многочастотного генератора
Fig. 3 The layout of the circuit of the multifrequency generator

По результатам макетно-экспериментальных работ конкретизированы технические требования, по которым спроектирован и изготовлен экспериментальный образец многочастотного ультразвукового генератора технологического назначения с регулируемой выходной мощностью 100-500 Вт. (рис. 4).



Рис. 4 Экспериментальный образец генератора, подключенного к ноутбуку для программирования опорной частоты
Fig. 4 Experimental sample of the generator connected to the laptop for programming the reference frequency

Особенностью генератора является программирование при помощи ноутбука опорной частоты выходного напряжения в диапазоне 20 – 60 кГц, что сделано впервые для подобных отечественных изделий технологического назначения. Тонкая подстройка частоты в резонанс с колебательной системой осуществляется с панели управления кнопками с дискретностью 10 Гц, что обеспечивает достаточную точность настройки с колебательной системой даже высокой

добротности. Это позволяет просто реализовать экспериментально устанавливаемые закономерности корреляции частоты ультразвукового воздействия и физико-механических характеристик армирующего материала и матрицы изделия.

Генератор имеет встроенный микропроцессор TMS320C20-28035 V1.2, позволяющий запоминать введенную с ноутбука опорную частоту.

В дальнейшем, при повторном включении с той же колебательной системой использование ноутбука не требуется. Возможна только тонкая корректировка частоты выходного напряжения применительно к конкретному обрабатываемому материалу.

При смене объекта воздействия (другой исходный материал, иная смена укладки армирующих волокон) потребуется вновь подключение ноутбука. Структурные схемы генератора в наладочном и рабочем режимах показаны на рис. 5.

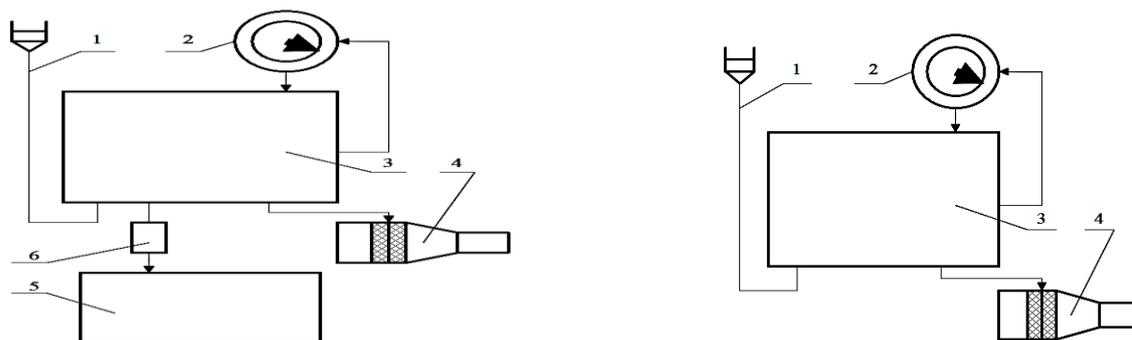


Рис. 5. Структурная схема генератора в конфигурации наладочного (а) и рабочего (б) режимов
 1 – сетевой кабель; 2 – регулятор питающего напряжения; 3 – генератор; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – ноутбук; 6 – интерфейс генератора и ноутбука

Fig. 5 Block diagram of the generator in the configuration of the adjustment (a) and operating (b) modes
 1 - the network cable; 2 - supply voltage regulator; 3 - generator; 4 - ultrasonic transducer; 5 - laptop; 6 - generator and laptop interface

В электрической схеме генератора авторами применены: варистор S20K-275 и трансформатор высокочастотный Е-51. Для связи с ноутбуком используется интерфейс ConverterUSB.TORS232 HXSP-2108D. Габаритные размеры генератора без регулятора выходного напряжения составляют 500x400x150 мм, вес не более 3 кг, максимальная величина выходного напряжения – 200 В. Режимы работы генератора отлажены при подключении к пьезокерамическим стержневым преобразователям продольных и продольно-крутильных колебаний с резонансной частотой 23450 и 38300 Гц. Внешний вид диалогового окна ноутбука при работе с генератором представлен на рис. 6.

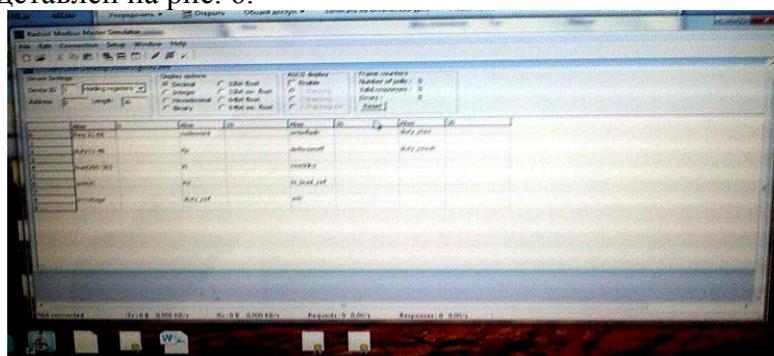


Рис. 6. Диалоговое окно задания опорной частоты выходного напряжения
 Fig. 6 Dialog box for setting the reference frequency of the output voltage

Вывод. Использование технологии ультразвуковой пропитки с оптимизацией воздействия путем применения многочастотных источников ультразвука представляется особенно целесообразным при формировании топологических армирующих структур в термопластичных изделиях сложной формы, полученных при помощи аддитивных технологий, поскольку в дан-

ном случае проявляется резкое различие в свойствах основной и армирующей структуры, обладающей весьма сложной формой.

В данном направлении необходимы дополнительные технологические и материаловедческие исследования с использованием в качестве инструмента описанного выше образца генератора. Многочастотный ультразвуковой генератор также может найти применение в технологиях размерной малодефектной обработки изделий приборостроения из твердых хрупких материалов [21-23], поскольку обеспечит оптимальный подбор частот и интенсивности воздействия, формирующих минимальный трещиноватый слой при сохранении высокой производительности.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Библиографический список:

1. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. Rand, B. Appleyard, S. Yardim, M., 1998 Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance, pp.177-193.
3. Thomas, G 2007, 'Composites come of age on 787', The Australian, 18 May, p. 2830.
4. Werfelman, L 2007, 'The Composite Evolution', AeroSafety World, March 2007, p. 17-21.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
6. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
7. Krishnamurthy, S 2006, 'Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance', PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds., p. 49-56.
8. Лобанов Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дис. канд. техн. наук: Пермь, 2015. 130 с.
9. Гареев А. Р. Разработка и исследование трехмерно-армированных углепластиков на основе стержневых структур наполнителя: дис. канд. техн. наук: Москва, 2015. 113 с.
10. Гусева Р. И. Особенности изготовления тонкостенных обшивок из углепластика в самолетостроении. Изменение технологических параметров в процессе формования / Гусева Р. И., ШаМингун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, № II-1 (18), 2014. С. 4-12.
11. Розенберг Д. Физика и техника мощного ультразвука. Том 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Розенберг Д. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 689 с.
12. Приходько, В.М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В.М. Приходько, И.А. Медеяев, Д.С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.
13. Ультразвуковая пропитка http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/
14. Бекренев Н.В. Разработка ультразвуковых технологий обработки пластическим деформированием неоднородных композиционных материалов в Саратове / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина // Вопросы электротехнологии. - № 2(7), 2015. С.28-35.
15. Бекренев Н.В. Влияние структуры конструкционных материалов на характер ультразвукового воздействия при их поверхностной обработке / Н.В. Бекренев, А.П. Петровский // Технология металлов. - 2011.- № 5.- С.35-39.
16. Злобина И.В. Обоснование разработки ультразвукового многочастотного генератора для оснащения технологического оборудования / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, Н.Н. Максимова и др. // Вопросы электротехнологии. - № 2 (3), 2014. – С. 53-59.
17. Хмелев В.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых и др. // Ползуновский вестник. №3, 2010. – С. 321-325.
18. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М.Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. -348 с.
19. Бекренев Н.В. Устройство для ультразвуковой обработки / Н.В. Бекренев, Б.М. Бржозовский, В.М. Фирсов и др. // патент RU № 2548344, опубл. 20.04.2015 г.
20. Ягудин А.Ф. О параметрической стабилизации автономного резонансного инвертора с помощью нагрузочного контура третьего порядка / Н.А. Фролов, А.Ф. Ягудин // М.: Электричество. –2009. – № 7. – С. 68-69.

21. Злобина И.В. Малодефектная ультразвуковая обработка деталей навигационных приборов из неоднородных по структуре твердых, хрупких материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, А.П. Петровский // Вестник СГТУ. - № 4 (77), 2014. - С. 97-103.
22. Zlobina I.V. Increasing of topography homogeneity of the construction materials surface during final ultrasound processing / I.V. Zlobina, A. P. Petrovsky, N.V. Bekrenev and oth. // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS).- 1-4 Dec. 2015. – Tomsk. – P. 1-4.
23. Бекренев Н.В. Модель воздействия энергии ультразвуковых колебаний на структуру твердых хрупких материалов / Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, А.П. Петровский // Вопросы электротехнологии. - № 2 (7), 2015. – С. 35-41.

References:

1. Koshkin R.P. Osnovnye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem: <http://spmagazine.ru/420>, data obrashcheniya 28.01.2017 g. [Koshkin R.P. The main directions of development and improvement of unmanned aerial systems: <http://spmagazine.ru/420>, access date January 28, 2017. (In Russ.)]
2. Rand B., Appleyard S., Yardim M. Proceedings of the NATO advanced Study Institute on Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance. 1998. pp.177-193.
3. Thomas G. Composites come of age on 787. The Australian, 18 May 2007. P. 2830.
4. Werfelman L. The Composite Evolution. AeroSafetyWorld. March 2007. pp. 17-21.
5. Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF porealizatsii «Strategicheskikh napravlenii razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda». Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2015;1(34):3–33. [Kablov E.N. Innovative developments FGUP «VIAM» GNTs RF on the implementation of «Strategic directions of materials development and processing technologies for the period until 2030». Aviation materials and technologies 2015;1(34):3–33. (In Russ.)]
6. Kablov E.N. Materialy ikh himicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2012; 82(6):520–530. [Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2012; 82(6):520–530. (In Russ.)]
7. Krishnamurthy S. Prestressed Advanced Fibre Reinforced Composites: Fabrication and Mechanical Performance. PhD thesis, Defence College of Management and Technology, Cranfield University, Beds. 2006. P. 49-56.
8. Lobanov D.S. Eksperimental'nye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov i panelei s zapolnitelem: dis. kand. tekhn. nauk: Perm', 2015. 130 s. [Lobanov D.S. Experimental studies of the deformation and strength properties of polymeric composite materials and panels with filler. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation: Perm', 2015. 130 p. (In Russ.)]
9. Gareev A. R. Razrabotka i issledovanie trekhmerno-armirovannykh ugleplastikov na osnove sterzhnevyykh struktur na polnatelya: dis. kand. tekhn. nauk: Moskva, 2015. 113 s. [Gareev A. R. Development and investigation of three-dimensional reinforced carbon plastics on the basis of core filler structures. The Candidate of technical sciences dissertation. Moscow, 2015. 113 p. (In Russ.)]
10. Guseva R.I., ShaMingun. Osobennost i zgotovleniya tonkostennykh obshivok iz ugleplastika v samoletostroenii. Izmenenie tekhnologicheskikh parametrov v protsesse formovaniya. Uchenyey zapiski Komsomol'skogo-na-Amuregosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014; II-1(18):4-12. [Guseva R.I., ShaMingun. Features of manufacturing thin-walled plating of carbon fiber in aircraft construction. Change of technological parameters in the process of moulding. Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. 2014; II-1(18):4-12. (In Russ.)]
11. Rozenberg D. Fizika i tekhnika moshchnoy ultrazvukovoy tekhnologii. M.: KnigapoTrebovaniyu; 2012. 689 p. [Rozenberg D. Physics and technology of powerful ultrasound. Volume 3. Physical fundamentals of ultrasonic technology. M.: KnigapoTrebovaniyu; 2012. 689 p. (in Russ.)]
12. Prikhod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyukhin D.S. Formirovanie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashinul'trazvukovymi metodami. Monografiya. M.: MADI; 2015. 264 p. [Prikhod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyukhin D.S. Formation of operational properties of machine parts by ultrasonic methods. Monograph. M.: MADI; 2015. 264 p. (In Russ.)]
13. Ul'trazvukovaya propitka. http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/ [Ultrasonic Impregnation http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/propitka_02/ (In Russ.)]
14. Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Razrabotka ul'trazvukovykh tekhnologii obrabotki plasticheskimi deformirovaniem neodnorodnykh kompozitsionnykh materialov v Saratove. Voprosy elektrotekhnologii. 2015; 2(7):28-35. [Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Development of ultrasonic technologies for processing plastic deformation of inhomogeneous composite materials in Saratov. Voprosy elektrotekhnologii. 2015;2(7):28-35. (In Russ.)]
15. Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Vliyanie struktury konstruksionnykh materialov na kharakterul'trazvukovogo vozdeistviya pri ikh poverkhnostnoi obrabotke. Tekhnologiyametallor. 2011;5:35-39. [Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Influence of the structure of structural materials on the nature of the ultrasonic action during their surface treatment. Technology of metals. 2011;5:35-39. (In Russ.)]
16. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Maksimova N.N. i dr. Obosnovanie razrabotki ul'trazvukovogo mnogochastotnogo generatora dlya osnashcheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya. Voprosy elektrotekhnologii. 2014;2(3):53-59.

- [Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Maksimova N.N. et al. The rationale for developing an ultrasonic multifrequency generator for equipping technological instrumentation. *Voprosyelektrotekhnologii*. 2014;2(3):53-59. (In Russ.)]
17. Khmelev V.N., Khmelev S.S., Golykh R.N. i dr. Povyshenieeffektivnostiul'trazvukovoikavitatsionnoiobrabotkivyazkikh i dispersnykhzhidkikh sred. *Polzunovskii vestnik*. 2010;3:321-325. [Khmelev V.N., Khmelev S.S., Golykh R.N. i dr. Increase of efficiency of ultrasonic cavitation processing of viscous and disperse liquid media. *Polzunovskiy vestnik*. 2010;3:321-325. (In Russ.)]
 18. Brzhozovskii B.M., Bekrenev N.V. Ul'trazvukovyetekhnologicheskie protsessy i oborudovanie v mashino- i priborostroenii: ucheb. posobie. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t; 2009. 348 s. [Brzhozovskii B.M., Bekrenev N.V. Ultrasonic technological processes and equipment in machine and instrument engineering: Textbook. Saratov: Saratov state technical university; 2009. 348 p. (In Russ.)]
 19. Bekrenev N.V., Brzhozovskii B.M., Firsov V.M. i dr. Ustroistvodlya ul'trazvukovoio obrabotki. Patent RU № 2548344, opubl. 20.04.2015 g. [Bekrenev N.V., Brzhozovskii B.M., Firsov V.M. et al. The device for ultrasonic treatment. Patent RU № 2548344, publ. 20.04.2015 (in Russ.)]
 20. Frolov N.A., Yagudin A.F. O parametriceskoi stabilizatsii avtonomnogo rezonansnogo invertora s pomoshch'yunagruzochnogo konturatret'egoporyadka. *Elektrichestvo*. 2009;7:68-69. [Frolov N.A., Yagudin A.F. On the parametric stabilization of an autonomous resonant inverter using a third-order loading circuit. *Elektrichestvo*. 2009; 7: 68-69. (In Russ.)]
 21. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Malodefektnaya ul'trazvukovaya obrabotka detalei na vigatsionnykh priborov iz neodnorodnykh po strukture tverdyykh, khrupkikh materialov. *Vestnik SGTU*. 2014; 4(77):97-103. [Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Petrovskii A.P. Low-defect ultrasonic treatment of navigational instruments from heterogeneous structures of hard, brittle materials. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2014;4(77):97-103. (In Russ.)]
 22. Zlobina I.V., Petrovskiy A.P., Bekrenev N.V. et al. Increasing of topography homogeneity of the construction materials surface during final ultrasound processing. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2015. P. 1-4.
 23. Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Petrovskii A.P. Model' vozdeistviya energii ul'trazvukovykh kolebaniy na strukturu tverdyykh khrupkikh materialov. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2015;2(7):35-41. [Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Petrovskii A.P. Model of the impact of ultrasonic vibration energy on the structure of hard brittle materials. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2015; 2(7):35-41. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Бекренев Николай Валерьевич - доктор технических наук, профессор, кафедра «Техническая механика и детали машин».

Луков Дмитрий Юрьевич – аспирант, кафедра «Системотехника».

Information about the authors.

Nikolaj V. Bekrenev - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

Dmitriy Yu. Lukov – Graduate student, Department of System engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.09.2017.

Received 28.09.2017.

Принята в печать 10.11.2017.

Accepted for publication 10.11.2017.

Для цитирования: Лобанов И.Е. Закономерности осреднённого теплообмена для труб с шероховатыми стенками и шероховатых плоских каналов с односторонним тепловым нагружением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (4): 58-71. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-58-71

For citation: Lobanov I.E. Regularities of the average heat exchange for pipes with rough walls and rough flat channels under one-sided thermal loading. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (4): 58-71. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-58-71

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-58-71

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСРЕДНЁННОГО ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ТРУБ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ И ШЕРОХОВАТЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛОВ С ОДНОСТОРОННИМ ТЕПЛОВЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

Лобанов И.Е.

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

Резюме: *Цель.* Математическое моделирование теплообмена в шероховатых плоских каналах с односторонним обогревом и круглых трубах с шероховатыми стенками. **Метод.** Расчет проводился на базе принципа суперпозиции турбулентной вязкости. Задача об интенсифицированном теплообмене в плоском канале и круглой трубе с шероховатыми стенками решена с помощью интеграла Лайона. **Результат.** Разработана методика теоретического расчетного детерминирования теплообмена для плоских шероховатых каналов с односторонним обогревом и круглых труб с шероховатыми стенками на основе принципа суперпозиции полной вязкости в турбулентном пограничном слое, отличающаяся от существующих теорий. Анализ расчетных значений теплообмена и гидросопротивления для плоских шероховатых каналов с односторонним обогревом и круглых шероховатых труб показал, что повышение теплообмена всегда меньше, чем соответствующее повышение гидравлического сопротивления, что является недостатком по сравнению с каналами с турбулизаторами при прочих равных условиях. Результаты расчета теплообмена для каналов с шероховатыми стенками при одностороннем обогреве для расширенного диапазона определяющих параметров, существенно отличающиеся от соответствующих данных для каналов с турбулизаторами, и определяют уровень интенсификации теплообмена. **Вывод.** Увеличение расчетных значений относительного осредненного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ для плоских шероховатых каналов с односторонним обогревом и шероховатых труб с очень большими значениями относительной шероховатости дает как увеличение относительной высоты шероховатости h/R_0 , так и увеличение числа Рейнольдса Re . Преимущество решений для осредненного теплообмена, полученных по разработанной теории, по сравнению с эмпирическими зависимостями, заключается в том, что они позволяют рассчитать теплообмен в шероховатых трубах в случае больших и очень больших относительных высот выступов шероховатости в том числе и для больших чисел Рейнольдса, что характерно для труб малых диаметров и узких плоских каналов. Повышение относительного теплообмена на воздухе вследствие увеличения относительной высоты шероховатости, или числа Рейнольдса, сопровождается еще более существенным повышением гидравлического сопротивления. В рассматриваемом диапазоне определяющих параметров для плоских шероховатых каналов при одностороннем подводе теплоты при прочих равных условиях осреднённый теплообмен ниже на $(4 \div 10)\%$ по сравнению с круглыми шероховатыми трубами.

Ключевые слова: многослойная модель, плоский канал, круглая труба, шероховатость, турбулизатор, моделирование, теплообмен, турбулентный, интенсификация; обогрев; подвод теплоты; односторонний

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

REGULARITIES OF THE AVERAGE HEAT EXCHANGE FOR PIPES WITH ROUGH WALLS AND ROUGH FLAT CHANNELS UNDER ONE-SIDED THERMAL LOADING

Igor' E. Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia,
e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Abstract. Objectives The aim of the present work is to carry out mathematical modelling of heat exchange in rough flat channels and round pipes with rough walls during one-sided heating. **Methods** The calculation was based on the superposition principle of turbulent viscosity. The solution of the problem of intensified heat transfer in a flat channel and in a round tube with rough walls was obtained using the Lyon's integral. **Results** A methodology for the theoretical computational heat exchange determination for flat rough channels and round pipes with rough walls during one-sided heating is developed, in contrast to existing theoretical approaches, on the basis of the principle of full viscosity superposition in a turbulent boundary layer. The analysis of the calculated heat exchange and hydraulic resistance values for flat rough channels and round rough pipes under one-sided heating shows that the increase in heat exchange is always less than the corresponding increase in hydraulic resistance, which is a disadvantage as compared to the channels with turbulators, all else being equal. The results of calculating the heat exchange for channels with rough walls at one-sided heating in an extended range of determinant parameters differ significantly from the corresponding data for channels with turbulators and are used to determine the level of heat exchange intensification. **Conclusion** An increase in the calculated values of the relative average heat exchange Nu / Nu_{GL} during one-sided heating for flat rough channels and rough pipes having very high relative roughness values is significantly affected by both an increase in the relative roughness height h/R_0 and an increase in the Re Reynolds number. The main advantage of solutions for averaged heat transfer for rough flat channels and round pipes under symmetrical thermal load, obtained according to the developed theory, is that they allow the calculation of heat exchange in rough pipes to be made in the case of large and very large relative heights of roughness protrusions, including large Reynolds numbers, which is typical for pipes of small diameters and narrow flat channels. An increase in the relative heat exchange in air due to an increase in the relative height of the roughness or the Reynolds number is accompanied by an even more significant increase in the hydraulic resistance. Calculated data on averaged heat transfer obtained in the work indicated that in the range of determinant parameters for flat rough channels with one-sided heating, the average heat exchange is lower by (4–10)% as compared to round rough pipes, all other things being equal.

Keywords: multilayer model, flat channel, round pipe, roughness, turbulator, modelling, heat exchange, turbulent, intensification, heating, heat supply, one-sided

Введение. Исследование закономерностей теплообмена в каналах с шероховатыми стенками может быть признано актуальным, поскольку использование шероховатых поверхностей является одним из методов интенсификации теплообмена.

Закономерности для теплообмена, например, в прямых круглых шероховатых трубах существенно отличаются от закономерностей теплообмена для труб с турбулизаторами, на что указывали как экспериментальные [1], так и теоретические [2-6] исследования. Теоретические исследования теплообмена в шероховатых каналах, как экспериментальные, так и теоретические имеют в своей основе применение логарифмического профиля скорости, что упрощают математическую модель, особенно для большой относительной шероховатости.

Теплообмен в каналах с большой шероховатостью может иметь место в узких каналах – аналогия с условиями для труб с турбулизаторами малых диаметров [7].

Теоретические исследования интенсифицированного теплообмена в каналах с шероховатыми стенками относительно невелики [8-10]. Их анализ указывает на то, что теории теплообмена не выходят из рамок логарифмического профиля скорости.

Постановка задачи. Цель данного исследования заключается в том, чтобы аналитическим образом получить более общие, чем существующие, закономерности для осреднённого теплообмена для плоских шероховатых каналов с односторонним обогревом.

В статье шероховатость рассматривается, как совокупность выступов и впадин с малым шагом по базовой длине, например, техническая (технологическая), естественная и т.п. шероховатость, с выступами «неправильной», а также нерегулярной формы.

Данная теория позволила получить более сложные, чем существующие, закономерности для числа Нуссельта для плоских шероховатых каналов и круглых шероховатых труб, поэтому они более обоснованы, более точны и могут использоваться для более широкого диапазона определяющих параметров – аналогия с исследованиями теплообмена для круглых труб с турбулизаторами [2-6] и для плоских каналов с турбулизаторами [19-24], где имеют место более сложные, чем основанные на логарифмическом профиле скорости, математические решения относительно числа Нуссельта.

Методы исследования. Расчёт теплообмена для условий течения теплоносителя в прямых круглых трубах с шероховатыми стенками проводится на основе полученных в работе автора результатов расчёта гидравлического сопротивления в прямых круглых шероховатых трубах [25] для этих условий, поскольку стратификация потока зависит от гидросопротивления.

Для плоских каналов с шероховатыми поверхностями гидравлическое сопротивление может быть детерминировано посредством использования эквивалентного диаметра, что позволяет свести к сходному с круглой трубой виду определяющих уравнений и стратификации турбулентного пограничного слоя [25].

Теплообмен при течении теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами для условий интенсифицированного теплообмена в плоских каналах и прямых круглых трубах с шероховатыми стенками моделируется многослойной схемой турбулентного пограничного слоя на основании того, что величина турбулентной вязкости и профили скоростей турбулентного пограничного слоя уже детерминированы при моделировании гидравлического сопротивления для этих условий [25].

Подобная схема расчёта интенсифицированного теплообмена была использована в работах [2-6] для расчёта теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в плоских каналах с турбулизаторами [19-23], что позволяет в дальнейшем её использовать при расчёте теплообмена в трубах с шероховатыми стенками при соблюдении соответствующих ограничений [2-6], поскольку условия протекания процесса теплообмена сходны.

Решение задачи об интенсифицированном теплообмене (числе Нуссельта Nu) в плоском канале с шероховатыми стенками в данной работе получим с помощью «интеграла Лайона для плоского канала» [17-18], характерного для стабилизированного теплообмена в канале при постоянной плотности теплового потока на стенке (течение принимается квазистационарным; теплоноситель несжимаем; теплофизические свойства постоянны; течение гидродинамически стабилизировано; изменение плотности теплового потока вдоль оси мало по сравнению с его изменением по радиусу; внутренние источники тепла отсутствуют; поле температур не зависит от распределения температур в начальном сечении; скорость потока меньше скорости звука) при принятии допущения $\frac{w}{w_x} \cong 1$ (отношения аксиальной составляющей скорости к среднерасходной), которое, как показывают теоретические исследования [2-6; 19-24] для каналов некруглого поперечного сечения с турбулизаторами, незначительно влияет на осреднённый интенсифицированный теплообмен:

$$\text{Nu} = \frac{2}{\int_0^1 \frac{R^2}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}, \quad (1)$$

где $\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T}, \frac{v_T}{v}$ – отношение молекулярного и турбулентного чисел Прандтля, кинематических турбулентной и молекулярной вязкости соответственно; $R=r/(H/2)$ – безразмерная координата плоского канала (отношение поперечной координаты для плоского канала r к половине ширины плоского канала H); Nu – число Нуссельта.

Решение задачи об интенсифицированном теплообмене в круглой трубе с шероховатыми стенками в данной работе получим с помощью «интеграла Лайона» при принятии допущения $\frac{w}{w_x} \cong 1$, которое, как показывают теоретические исследования [2-6] для круглых труб с турбулизаторами, незначительно влияет на осреднённый интенсифицированный теплообмен:

$$\text{Nu} = \frac{2}{\int_0^1 \frac{R^3}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}, \quad (2)$$

где $R=r/R_0$ – безразмерный радиус трубы (отношение расстояния от оси трубы r к радиусу трубы R_0).

Для решения задачи теплообмена в дальнейшем в интеграл Лайона вводятся зависимости относительно турбулентной вязкости для всех подслоёв, с последующим интегрированием.

Для получения решения относительно теплообмена, как для плоского канала, так и круглой трубы с шероховатыми поверхностями, следует перейти к непосредственному рассмотрению параметров каждого из подслоёв, поскольку они будут сходны при выбранных безразмерных координатах.

I. Вязкий (ламинарный) подслей. Вязкий подслей располагается в следующей окрестности:

$R \in \left[1 - \frac{\eta_1}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 \right]$, $\eta_1=5$ – постоянная, характеризующая безразмерную толщину вязкого подслоя [14], ξ – коэффициент сопротивления трению; Re – число Рейнольдса по эквивалентному диаметру канала.

В области вязкого подслоя принимается, что [2-6, 14]:

$$\frac{v_T}{v} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \text{Re}^3 (1-R)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (3)$$

где v_T/v – отношение турбулентной и молекулярной кинематических вязкостей;

$\eta = (1-R) \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}$ – безразмерная координата (модифицированное число Рейнольдса); β –

постоянная в законе «третьей степени» («степенном законе»): $\frac{v_T}{v} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \eta^3$ [14].

II. Буферный промежуточный подслои.

Промежуточный подслои располагается в следующей окрестности:

$$R \in \left[1 - \frac{\eta_2}{\text{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}}; 1 - \frac{\eta_1}{\text{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}} \right], \text{ где } \eta_2 = 30 \quad [14].$$

В области промежуточного подслоя принимается, что [2-6, 14]:

$$\frac{v_T}{\nu} = \frac{\eta}{5} - 1 = \frac{\text{Re}}{5} (1 - R) \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1 \quad (4)$$

III. Турбулентное ядро потока.

Турбулентное ядро потока располагается в следующей окрестности:

$$R \in \left[0; 1 - \frac{\eta_2}{\text{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}} \right].$$

В области турбулентного ядра принимается, что [2-6, 14]:

$$\frac{v_T}{\nu} = \frac{\sum_i v_i}{\nu} = 1 + \frac{\text{Re}}{4} \sqrt{\frac{\xi}{2}} a (\bar{y} + \bar{h} - 2\bar{\delta}) \sqrt{(1 - \bar{y})(1 - k_0^2 \bar{y})}, \quad (5)$$

\bar{y} – относительная поперечная координата ($\bar{y} = \frac{y}{R_0}$); $\bar{\delta} = \frac{\delta_0}{R_0} = \delta \frac{4}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}}$ (δ_0 – граница вязкого подслоя); $\bar{h} = \frac{h}{R_0}$; δ – константа [11-13].

Учитывая, что $R = 1 - \bar{y}$ или $\bar{y} = 1 - R$, после преобразований получим:

$$\frac{v_T}{\nu} = \frac{\sum_i v_i}{\nu} = 1 + \frac{\text{Re}}{4} \sqrt{\frac{\xi}{2}} a \left(1 - R + \bar{h} - \delta \frac{8}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} \right) \sqrt{R(1 - k_0^2(1 - R))}, \quad (6)$$

где $a = 0,39$ и $k_0 = 0,97$ – постоянные [11-13].

Если дисперсия средних значений высот выступов шероховатости $\bar{\sigma}$ отлична от нуля и при нормальном законе распределения высот шероховатости, то формула для турбулентной кинематической вязкости в круглой шероховатой трубе будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{v_T}{\nu} &= \frac{\sum_i v_i}{\nu} = \\ &= 1 + \frac{\text{Re}}{4} \sqrt{\frac{\xi}{2}} a \sqrt{R(1 - k_0^2(1 - R))} \left[1 - R + \bar{h} - \delta \frac{8}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} + \bar{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta \frac{4}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} (\bar{y} - \bar{h})}{\bar{\sigma}} \right)^2 \right]}{1 - \text{erf} \left[\frac{\delta \frac{4}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} (\bar{y} - \bar{h})}{\sqrt{2} \bar{\sigma}} \right]} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

В дальнейшем необходимо провести расчёты теплообмена для плоских каналов и круглых труб с шероховатыми стенками по полученной в исследовании методике с использованием формул (1) и (2) совместно с соотношениями для подслоев (4), (5), (6) для различных относительных высот шероховатости и чисел Рейнольдса по эквивалентному диаметру канала. Для сравнения приводятся расчётные значения относительного теплообмена $\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{гЛ}}$ ($\text{Nu}_{\text{гЛ}}$ – число Нуссельта для гладких труб, полученное по формуле Диттуса–Боэлтера [14]) при прочих равных условиях (равные числа Рейнольдса по эквивалентному диаметру канала).

Обсуждение результатов. В табл. 1 приведены расчётные данные для теплообмена в плоских каналах с шероховатыми поверхностями и в прямых круглых шероховатых трубах, полученные из решения по сгенерированной теории для относительных высот турбулизаторов $h/R_0=1/70=1,43 \cdot 10^{-2}$ и $h/R_0=1/50=2 \cdot 10^{-2}$, для которых ранее были рассчитаны гидравлические сопротивления (для сравнения здесь же приведены соответствующие значения теплообмена для гладких труб по формуле Диттуса–Боэлтера).

Таблица 1. Теплообмен на воздухе в плоских каналах с шероховатыми стенками (нижние значения), а также в круглых шероховатых трубах (верхние значения), рассчитанный по формулам (1)-(7) для относительных высот турбулизаторов $h/R_0=1/70$ и $h/R_0=1/50$

Table 1. Heat exchange in air in flat channels with rough walls (lower values), and also in round rough pipes (upper values), calculated from formulas (1) - (7) for relative heights of turbulators $h/R_0=1/70$ and $h/R_0=1/50$

$h/R_0 \downarrow$	Nu ↓	Re → $4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	10^5	10^6	10^7
	формула Диттуса—Боэлтера	96,90	134,02	168,71	201,68	1272,51	8028,99
$1/70=1,43 \cdot 10^{-2}$	теоретическое решение	113,98	167,05	219,58	271,87	2509,00	22124,58
	Nu/Nu _{глад}	1,18	1,25	1,30	1,35	1,97	2,76
		1,08	1,16	1,22	1,26	1,86	2,60
$1/50=2,00 \cdot 10^{-2}$	теоретическое решение	124,04	181,74	239,12	296,40	2705,26	27015,57
	Nu/Nu _{глад}	1,28	1,36	1,42	1,47	2,13	3,36
		1,19	1,27	1,33	1,38	2,00	3,17

Из табл.1 видно, что увеличение теплообмена в круглых трубах вследствие шероховатости происходит определенно меньше, чем увеличение гидравлического сопротивления, что особенно заметно при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6 \div 10^7$) и больших относительных высотах шероховатости.

Если сравнить представленные результаты для теплообмена в шероховатых трубах при $h/R_0=0,02$ с теплообменом в трубах с турбулизаторами ($d/D=0,98$) из [1] при прочих равных условиях, то можно сказать следующее: при средних числах Рейнольдса ($Re=4 \cdot 10^4$) теплообмен в шероховатых трубах приблизительно равен теплообмену в трубах с турбулизаторами с большими относительными шагами между турбулизаторами ($t/D=1,00$) ($Nu/Nu_{глад}=1,60; 1,45; 1,30$ для $t/D=0,25; 0,50; 1,00$ соответственно) при увеличении числа Рейнольдса до $Re=10^5$ теплообмен в шероховатых трубах приближается к теплообмену в трубах с турбулизаторами со средними относительными шагами между ними ($t/D=0,50$) ($Nu/Nu_{глад}=1,62; 1,48; 1,34$ для $t/D=0,25; 0,50; 1,00$ соответственно).

Из табл. 1 также видно, что теплообмен в плоских каналах с шероховатыми стенками для этих условий, рассчитанный по «интегралу Лайона для плоского канала» [17-18], меньше примерно на (6,7) %, чем в шероховатых трубах при прочих равных условиях, в то время как для гладких каналов вышеуказанное снижение общеизвестно и составляет 14% [1, 14, 17- 18, 26-27].

Можно сделать вывод о том, что увеличение теплообмена в круглых трубах вследствие шероховатости происходит ощутимо меньше, чем увеличение гидравлического сопротивления, особенно при увеличении числа Рейнольдса и относительной высоты шероховатости, который останется справедливым и для гораздо более широкого диапазона высот шероховатости.

Вышесказанное подтверждают данные по теплообмену на воздухе при $Re=10^4 \div 10^6$ для круглых шероховатых труб с $h/R_0=1/15; 1/30,6; 1/60; 1/126; 1/252; 1/507$, приведённые в табл. 2, в сравнении с соответствующими данными по гидравлическому сопротивлению. Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми поверхностями при прочих равных условиях для $h/R_0=1/15; 1/30,6; 1/60; 1/126; 1/252; 1/507$ снижается по отношению к круглым трубам с шероховатыми стенками максимум на 8,5% (табл. 2), что также меньше, чем аналогичное значение снижения для гладких каналов.

Таблица 2. Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми стенками (нижние значения) и в круглых шероховатых трубах (верхние значения) на воздухе в зависимости от числа Рейнольдса, рассчитанный теоретически на основании решений (1)-(7) для широкого диапазона относительных высот турбулизаторов

Table 2. Heat exchange in flat channels with rough walls (lower values) and in round rough pipes (upper values) in air, depending on the Reynolds number, calculated theoretically on the basis of solutions (1) - (7) for a wide range of relative heights of turbulators

h/R_0	Nu Nu/Nu _{гЛ}	Re										
		10 ⁴	1,58·10 ⁴	2,51·10 ⁴	3,98·10 ⁴	6,31·10 ⁴	10 ⁵	1,58·10 ⁵	2,51·10 ⁵	3,98·10 ⁵	6,31·10 ⁵	10 ⁶
1,97·10 ⁻³	абсолютное	—	—	—	—	—	—	—	434,01 429,80	650,97 633,42	1020,08 965,40	1599,58 1515,69
	относительное	—	—	—	—	—	—	—	1,03 1,02	1,07 1,04	1,16 1,10	1,26 1,19
3,97·10 ⁻³	абсолютное	—	—	—	—	—	—	310,79 297,34	485,95 457,68	759,90 716,96	1191,49 1125,53	1873,53 1771,25
	относительное	—	—	—	—	—	—	1,07 1,02	1,15 1,09	1,25 1,18	1,35 1,28	1,47 1,39
7,94·10 ⁻³	абсолютное	—	—	—	—	—	235,27 220,29	366,26 343,88	572,24 538,28	897,44 845,23	1411,90 1330,85	2221,23 2094,83
	относительное	—	—	—	—	—	1,17 1,09	1,26 1,18	1,36 1,28	1,47 1,39	1,60 1,51	1,75 1,65
1,67·10 ⁻²	абсолютное	—	—	—	117,99 109,65	182,05 169,95	282,71 262,72	441,59 414,31	692,91 650,96	1090,78 1025,61	1681,95 1582,30	2595,86 2442,92
	относительное	—	—	—	1,22 1,14	1,30 1,22	1,40 1,31	1,51 1,42	1,64 1,54	1,79 1,68	1,91 1,80	2,04 1,92
3,27·10 ⁻²	абсолютное	—	60,10 55,25	91,13 84,45	139,79 130,23	216,55 202,45	337,90 316,62	530,05 497,41	823,39 773,42	1271,93 1195,48	1957,73 1840,77	3040,21 2859,28
	относительное	—	1,30 1,20	1,36 1,26	1,45 1,35	1,55 1,45	1,68 1,57	1,82 1,71	1,95 1,84	2,09 1,96	2,22 2,09	2,39 2,25
6,67·10 ⁻²	абсолютное	47,66 43,68	71,33 66,01	108,93 101,46	168,27 157,39	262,22 245,94	408,52 383,83	631,68 594,19	978,02 920,63	1515,52 1427,26	2350,09 2213,88	3646,15 3435,45
	относительное	1,49 1,37	1,54 1,43	1,63 1,52	1,74 1,63	1,88 1,76	2,03 1,90	2,17 2,04	2,32 2,18	2,49 2,34	2,67 2,51	2,87 2,70
0	Диттус— Боэлтер	31,96	46,20	66,78	96,53	139,53	201,68	291,51	421,37	609,06	880,36	1272,51

В дальнейшем необходимо провести расчёты теплообмена для плоских каналов с шероховатыми поверхностями и шероховатых труб, полученные по зависимостям (1)–(7), для очень больших значений относительных высот шероховатости: $h/R_0=0,15\div 0,30$.

В табл. 3 приведены расчётные значения теплообмена на воздухе для плоских каналов и круглых труб с шероховатыми поверхностями для очень больших относительных высот шероховатости ($h/R_0=0,15\div 0,30$) для характерного диапазона чисел Рейнольдса ($Re=10^4\div 10^6$), при расчёте которого были использованы значения гидравлического сопротивления по [25]; для сравнения приведены соответствующие значения теплообмена на воздухе для гладкой трубы Nu_{гЛ} ($h/R_0=0$).

Из табл. 3 видно, что теплообмен в шероховатых трубах на воздухе для исследуемых высот шероховатости увеличивается при малых числах Рейнольдса ($Re=10^4\div 5\cdot 10^6$) примерно с 1,8 до 2,1 раз по сравнению с гладкой трубой при увеличении относительной высоты шероховатости с $h/R_0=0,15$ до $h/R_0=0,30$, для средних чисел Рейнольдса ($Re=10^5\div 5\cdot 10^5$) это увеличение составляет уже примерно 2,5 и 2,9 раз, соответственно, для больших ($Re=10^6$) – с 3,6 до 4,2 раз.

При увеличении числа Рейнольдса с 10^4 до 10^6 теплообмен в шероховатых трубах на воздухе по сравнению с гладкой трубой увеличивается примерно в 2,0 раза для всего рассматриваемого диапазона относительных высот шероховатостей; при увеличении очень большой относительной высоты шероховатости в два раза (с $h/R_0=0,15$ до $h/R_0=0,30$) соответствующее увеличение относительного гидравлического сопротивления составляет примерно $1,15\div 1,19$ раз, т.е. несколько меньше, чем соответствующее повышение гидравлического сопротивления.

Таблица 3. Теплообмен (число Нуссельта) на воздухе в плоских каналах с шероховатыми стенками (нижние значения) и в круглых шероховатых трубах (верхние значения), рассчитанный теоретически на основании решений (1)-(7) для очень больших относительных высот шероховатости ($h/R_0=0,15\div 0,30$) в зависимости от числа Рейнольдса

Table 3. Heat transfer (Nusselt number) in air in flat channels with rough walls (lower values) and in round rough pipes (upper values) calculated theoretically on the basis of solutions (1) - (7) for very high relative roughness heights ($h/R_0=0,15\div 0,30$), depending on the Reynolds number

h/R_0	Re				
	10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5	$5 \cdot 10^5$	10^6
0,15	57,01	255,79	495,62	2320,26	4521,46
	52,86	241,48	469,01	2199,98	4288,13
0,20	60,52	272,55	529,10	2994,82	4873,51
	56,39	258,29	502,55	2849,71	4638,43
0,25	63,26	285,81	556,11	2634,74	5156,57
	59,18	271,76	529,92	2514,99	4923,28
0,30	65,48	296,68	578,30	2750,43	5391,79
	61,45	282,92	552,62	2632,73	5162,16
0	31,96	115,83	201,68	730,86	1272,51

Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми поверхностями при прочих равных условиях для очень больших относительных высот шероховатости ($h/R_0=0,15\div 0,30$) снижается по отношению к круглым шероховатым трубам на (4,5÷7,5)%. Следовательно, как увеличение относительной высоты шероховатости, так и увеличение числа Рейнольдса вызывает существенное повышение теплообмена в круглых шероховатых трубах на воздухе по отношению к гладким трубам; для плоских каналов с шероховатыми стенками соответствующее увеличение теплоотдачи тоже существенно, но несколько меньшее, чем для круглых шероховатых труб.

Таким образом, при очень значительных относительных высотах шероховатости ($h/R_0=0,15\div 0,30$) увеличение теплообмена в плоских каналах с шероховатыми стенками и в шероховатых трубах сопровождается гораздо большим увеличением гидравлического сопротивления, чем для меньших относительных высот шероховатости ($h/R_0 \leq 0,067$), особенно с ростом числа Рейнольдса.

Далее необходимо провести сравнительный анализ расчётных значений теплообмена на воздухе, полученных по разработанной в данной работе методике, основанной на зависимостях (1)–(7), для плоских каналов с шероховатыми стенками, для шероховатых труб и для труб с турбулизаторами при прочих равных условиях (равенство относительных высот шероховатости и турбулизаторов, чисел Рейнольдса).

С этой целью в табл. 4 приведены для удобства значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ для плоских каналов с шероховатыми стенками, круглых шероховатых труб на воздухе, рассчитанных по разработанной в исследовании методике, которые сравниваются с экспериментальными данными для труб с периодическими поперечно расположенными турбулизаторами потока в круглых трубах [1] при условии $h/R_0 = idem$ и $Re = idem$ ($h/R_0=0,01\div 0,13$; $t/D=0,25\div 1,00$; $Re=10^4\div 2 \cdot 10^5$).

Сравнение полученных расчётных данных по теплообмену на воздухе в шероховатых трубах и трубах с турбулизаторами при прочих равных условиях, представленное в табл. 4 показывает, что при малых относительных высотах шероховатости ($h/R_0=1/100$) теплообмен в шероховатых трубах при небольших числах Рейнольдса ($Re=10^5\div 5 \cdot 10^5$) немного меньше, чем в трубах с турбулизаторами с большими относительными шагами ($t/D=1$), при увеличении числа Рейнольдса теплообмен приближается к теплообмену в трубах с турбулизаторами средних ($t/D=0,50$) и малых ($t/D=0,25$) относительных шагов соответственно; а при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) теплообмен в шероховатых трубах примерно на 15% больше чем в трубах с турбулизаторами.

Таблица 4. Сравнительный анализ значений относительного теплообмена на воздухе Nu/Nu_{GL} для плоских каналов с шероховатыми стенками (нижние значения) и круглых шероховатых труб (верхние значения), рассчитанных по разработанной теории с экспериментальными данными [1] для труб с периодическими поперечно расположенными турбулизаторами в круглых трубах для $h/R_0=0,01\div 0,13$; $t/D=0,25\div 1,00$; $Re=10^4\div 4\cdot 10^5$.

Table 4. Comparative analysis of the values of relative heat transfer in air Nu / Nu_{GL} for flat channels with rough walls (lower values) and round rough pipes (upper values) calculated from the developed theory with experimental data [1] for pipes with periodic transversely disposed turbulators in round tubes for $h/R_0=0,01\div 0,13$; $t/D=0,25\div 1,00$; $Re=10^4\div 4\cdot 10^5$.

h/R_0	t/D	$\frac{Nu}{Nu_{GL}}$	Re								
			10^4	$2\cdot 10^4$	$4\cdot 10^4$	10^5	$2\cdot 10^5$	$4\cdot 10^5$	10^6	10^7	10^9
0,01	0,25	Калинин	1,25	1,30	1,32	1,35	1,37	1,38	—	—	—
	0,50	Калинин	1,23	1,28	1,22	1,25	1,28	1,32	—	—	—
	1,00	Калинин	1,13	1,13	1,15	1,15	1,16	1,12	—	—	—
	—	теория	—	—	1,08	1,23	1,38	1,56	1,83	2,54	5,15
0,05	0,25	Калинин	2,14	2,20	2,28	2,28	2,37	2,45	—	—	—
	0,50	Калинин	2,05	2,08	2,06	2,12	2,24	2,28	—	—	—
	1,00	Калинин	1,69	1,65	1,73	1,85	1,82	1,75	—	—	—
	—	теория	1,40	1,48	1,62	1,88	2,09	2,31	2,66	3,79	7,93
0,10	0,25	Калинин	2,65	2,80	2,80	2,82	2,88	3,08	—	—	—
	0,50	Калинин	2,54	2,69	2,68	2,67	2,77	2,92	—	—	—
	1,00	Калинин	2,27	2,38	2,35	2,41	2,40	2,47	—	—	—
	—	теория	1,63	1,75	1,94	2,23	2,48	2,75	3,19	4,61	9,86
0,11	0,25	Калинин	2,65	2,85	2,80	2,82	2,92	3,12	—	—	—
	—	теория	1,67	1,79	1,99	2,28	2,54	2,83	3,27	4,74	10,17
	0,50	Калинин	2,28	2,72	2,70	2,70	2,85	3,00	—	—	—
0,12	—	теория	1,70	1,83	2,03	2,33	2,59	2,89	3,35	4,86	10,46
	1,00	Калинин	2,54	2,70	2,66	2,67	2,68	2,74	—	—	—
0,13	—	теория	1,73	1,86	2,07	2,37	2,64	2,95	3,42	4,98	10,74
	—	теория	1,60	1,74	1,95	2,23	2,50	2,79	3,24	4,72	10,17

При средних относительных высотах шероховатости ($h/R_0=1/20$) значения теплообмена в шероховатых трубах находится между значениями теплообмена в трубах с турбулизаторами с большим ($t/D=1$) и средним ($t/D=1/2$) относительным шагом при небольших и средних числах Рейнольдса ($Re=10^5\div 5\cdot 10^5$); при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) теплообмен в шероховатых трубах приблизительно соответствует теплообмену в трубах с турбулизаторами со средним относительным шагом ($t/D=1/2$).

При больших относительных высотах шероховатости ($h/R_0=1/10$) теплообмен в шероховатых трубах для небольших ($Re=10^4\div 5\cdot 10^4$) и средних числах Рейнольдса ($Re=10^5\div 5\cdot 10^5$) несколько меньше, чем для труб с турбулизаторами; при увеличении числа Рейнольдса теплообмен в шероховатых трубах приблизительно равен теплообмену в трубах с турбулизаторами с большим относительным шагом ($t/D=1$); при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) значение теплообмена в шероховатых трубах находится примерно посередине между значениями теплообмена для труб с турбулизаторами со средним ($t/D=1/2$) и большим ($t/D=1$) относительным шагом.

Для очень высоких относительных высот шероховатости ($h/R_0>1/10$) теплообмен в шероховатых трубах при небольших ($Re=10^4\div 5\cdot 10^4$) и средних ($Re=10^5\div 5\cdot 10^5$) числах Рейнольдса, в среднем, приблизительно наполовину меньше, чем для труб с турбулизаторами; при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) теплообмен в шероховатых трубах приближается к теплообмену в трубах с турбулизаторами и даже немного превосходит его с увеличением значения относительной высоты.

Для плоских каналов с шероховатыми поверхностями с односторонним подводом теплоты имеет место снижение теплообмена по сравнению с прямыми круглыми шероховатыми трубами при прочих равных условиях для данного диапазона определяющих параметров на (4,10) % (табл. 4).

Данные по теплообмену на воздухе для плоских каналов с шероховатыми стенками и шероховатых труб для очень высоких чисел Рейнольдса ($Re \geq 10^6$), приведенные в табл. 4, указывают на то, с увеличением числа Рейнольдса сначала (после $Re > 10^6$) происходит некоторое снижение относительного теплообмена–гидросопротивления $(Nu/Nu_{гг})/(\xi/\xi_{гг})$, после чего (ближе к $Re \approx 10^9$) оно несколько возрастает, что характерно, например, для, так называемого, предельного теплообмена третьего рода при турбулентном течении в круглых трубах, но при более низких числах Рейнольдса [2–7, 15-16].

Относительный теплообмен в шероховатых трубах при очень высоких числах Рейнольдса ($Re = 10^6 \div 10^9$) возрастает при увеличении числа Рейнольдса и при увеличении относительной высоты шероховатости; для плоских каналов с шероховатыми стенками с односторонним обогревом увеличение теплообмена для этих условий ниже на (4,10) %, чем для круглых шероховатых труб (табл. 4).

Вывод. 1. Сгенерирован метод теоретического расчёта среднего теплообмена для плоских шероховатых каналов при одностороннем обогреве и круглых шероховатых труб на базе принципа суперпозиции полной вязкости в турбулентном пограничном слое, выгодно отличающийся от существующих, поэтому его необходимо использовать при расчёте теплообмена даже при его большей сложности.

2. При сравнительном анализе расчетных данных для относительного среднего теплообмена в шероховатых трубах и соответствующих экспериментальных значений для труб с турбулизаторами получено, что при очень больших относительных высотах шероховатости ($h/R_0 = 0,15 \div 0,30$) средний теплообмен в шероховатых трубах почти во всех случаях определенно ниже, при прочих равных условиях, чем для труб с турбулизаторами и почти равен при высоких числах Рейнольдса ($Re = 10^6$); для небольших ($h/R_0 = 0,01 \div 0,05$), средних ($h/R_0 = 0,05 \div 0,10$) и больших ($h/R_0 = 0,10 \div 0,13$) относительных высот турбулизаторов получены границы их примерного соответствия при прочих равных условиях.

3. Основное преимущество полученных по разработанному в статье методу решений для осреднённого теплообмена для шероховатых плоских каналов с односторонним обогревом по сравнению с эмпирическими закономерностями состоит в том, что по ним можно получить значения теплообмена в шероховатых каналах больших ($h/R_0 = 0,10$) и очень больших относительных ($h/R_0 = 0,15 \div 0,30$) высот выступов шероховатости, а также для больших чисел Рейнольдса ($Re = 10^6$), что возможно для условий каналов малых определяющих размеров (например, узких каналов).

4. Расчетные данные для шероховатых плоских каналов с односторонним обогревом и для круглых шероховатых труб по относительному теплообмену–гидросопротивлению на воздухе указывают на то, что при увеличении относительной высоты шероховатости или числа Рейнольдса имеет место увеличение относительного теплообмена при еще более существенном повышении гидравлического сопротивления.

5. На основании полученных расчётных данных по теплообмену–гидросопротивлению для плоских шероховатых каналов с односторонним подводом теплоты и круглых шероховатых труб было установлено, что увеличение теплообмена в них всегда меньше, чем соответствующее повышение гидросопротивления, поэтому они уступают по этому показателю каналам с турбулизаторами при прочих равных условиях.

6. На основании проведённых расчётов было получено, что плоские шероховатые каналы при одностороннем обогреве и круглые шероховатые трубы в области высоких значений относительной высоты шероховатости ($h/R_0 = 0,15 \div 0,30$) при высоких числах Рейнольдса ($Re = 10^6$) могут иметь преимущество по сравнению с трубами с турбулизаторами по относительному теплообмену–гидросопротивлению.

7. Расчётные данные по осреднённому теплообмену, полученные в работе, указывают на то, что в реализованном диапазоне определяющих параметров для плоских каналов с шероховатыми стенками с односторонним обогревом при прочих равных условиях средний теплообмен в них ниже на $(4 \div 10)\%$ в сравнении с круглыми трубами с шероховатыми стенками.

Библиографический список:

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
2. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2005. 632 с.
3. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 405 с.
4. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 290 с.
5. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и композитных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. 288 с.
6. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. М.: МГАКХиС, 2011. 343 с.
7. Лобанов И.Е., Доценко А.И. Математическое моделирование предельного теплообмена для турбулизированного потока в каналах. М.: МИКХиС, 2008. 194 с.
8. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. М.: Наука, 1990. 215 с.
9. Ляхов В.К. Метод относительного соответствия при расчётах турбулентных пристеночных потоков. Саратов: Издательство Саратовского университета. 1975. 123 с.
10. Ляхов В.К., Мигалин В.К. Эффект тепловой, или диффузионной, шероховатости. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1989. 176 с.
11. Миллионщиков М.Д. Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах. М.: Наука, 1969. 52 с.
12. Миллионщиков М.Д. Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах // Атомная энергия. – 1970. Т. 28. Вып. 3. С. 207–220.
13. Миллионщиков М.Д. Турбулентный тепло- и массообмен в трубах с гладкими и шероховатыми стенками // Атомная энергия. 1971. Т. 31. Вып. 3. С. 199–204.
14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
15. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Исследование предельной интенсификации теплообмена в трубах за счёт искусственной турбулизации потока // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40. № 6. С. 958–963.
16. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счёт искусственной турбулизации потока // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 1. С. 46–51.
17. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. М.: Госатомиздат, 1961. 548 с.
18. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. М.: Атомиздат, 1977. 349 с.
19. Лобанов И.Е. Математическое моделирование предельного теплообмена за счёт турбулизации потока при турбулентном течении в плоских каналах с турбулизаторами // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXIV Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2010 г. / Под общей редакцией А.К.Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2010. С. 200–202.
20. Лобанов И.Е., Флейтлих Б.Б. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностью расположенными турбулизаторами потока на базе семи-

слоистой модели турбулентного пограничного слоя // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 2 (286). С. 42–50.

21. Лобанов И.Е., Флейтлих Б.Б. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // *Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических технологиях: тезисы Международной научной школы (Москва, 5–7 сентября 2011 г.)*. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 50–52.

22. Лобанов И.Е. Теория теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с поверхностно расположенными односторонними турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // *Московское научное обозрение*. 2012. № 4. Ч. 1. С. 7–12.

23. Лобанов И.Е. Аналитическое решение задачи об интенсифицированном теплообмене при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // *Научное обозрение*. 2012. № 2. С. 375–387.

24. Лобанов И.Е. Теплообмен при турбулентном течении в плоских каналах с равномерно расположенными поверхностными односторонними турбулизаторами потока // *Вестник машиностроения*. 2013. № 8. С. 13–17.

25. Лобанов И.Е. Теория гидравлического сопротивления в шероховатых трубах // *Вестник машиностроения*. 2013. № 7. С. 27–33.

26. Теплообмен в энергетических установках космических аппаратов / Под ред. В.К.Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.

27. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

References:

1. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. i dr. *Effektivnye poverkhnosti teploobmena*. M.: Energoatomizdat; 1998. 408 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. et al. *Effective heat-exchange suraces*. Moscow: Energoatomizdat; 1998. 408 p. (In Russ.)]

2. Lobanov I.E. *Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogoteploobmenapriturbulentnomtechenii v kanalakh*. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Moskva; 2005. 632 s. [Lobanov I.E. *Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the channels*. Doctor of technical sciences dissertation. Moscow; 2005. 632 p. (In Russ.)]

3. Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve)*. V 4-kh tomakh. Tom I. *Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniemosnovnykhanaliticheskikh i chislennykhmetodov*. M.: Izdatel'stvoAssotsiatsiiostroitel'nykhvuzov; 2009. 405 s. [Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspective heat-exchange apparatus with intensified heat-exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat-exchange for heat-exchange apparatus used in modern metallurgical production)*. In 4 volumes. Volume I. *Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in channels using major analytical and numeric methods*. Moscow: Izdatel'stvoAssotsiatsiiostroitel'nykhvuzov; 2009. 405 p. (In Russ.)]

4. Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve)*. V 4-kh tomakh Tom IV. *Spetsial'nyeaspekty matematicheskogo modelirovaniya gidrogazodinamiki, teploobmena, a takzhe teploperedachi v teploobmennykh apparatakh s intensifitsirovannym teploobmenom*. M.: MGAKKHiS; 2011. 343 s. [Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspective heat-exchange apparatus with intensified heat-exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat-exchange for heat-exchange apparatus used in modern metallurgical production)*. In 4 volumes. Volume II. *Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in channels using minor analytical and numeric methods*. Moscow: Izdatel'stvoAssotsiatsiiostroitel'nykhvuzov; 2010. 290 p. (In Russ.)]

5. Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dly ametallurgicheskogoproizvodstva. Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve)*. V 4-kh tomakh Tom IV. *Spetsial'nyeaspekty matematicheskogo modelirovaniya gidrogazodinamiki, teploobmena, a takzhe teploperedachi v teploobmennykh apparatakh s intensifitsirovannym teploobmenom*. M.: MGAKKHiS; 2010. 288 s. [Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspective heat-exchange apparatus with intensified heat-exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat-exchange for heat-exchange apparatus used in modern metallurgical production)*. In 4 volumes. Volume III. *Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in channels using multi-layer, super-multi-layer and compound models of turbulent boundary layer*. Moscow: MGAKKHiS; 2010. 288 p. (In Russ.)]

6. Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve)*. V 4-kh tomakh Tom IV. *Spetsial'nyeaspekty matematicheskogo modelirovaniya gidrogazodinamiki, teploobmena, a takzhe teploperedachi v teploobmennykh apparatakh s intensifitsirovannym teploobmenom*. M.: MGAKKHiS; 2011. 343 s. [Lobanov I.E., Shteyn L.M. *Perspective heat-exchange*

apparatus with intensified heat-exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat-exchange for heat-exchange apparatus used in modern metallurgical production). In 4 volumes. Volume IV. Special aspects of mathematical modeling of hydro-gas-dynamics, heat-exchange, and heat transfer in heat-exchange apparatus with intensified heat-exchange. Moscow: MGAKKHiS; 2011. 343 p. (In Russ.)

7. Lobanov I.E., Dotsenko A.I. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena dlya turbulizirovannogo potoka v kanalakh. M.: MIKKhS; 2008. 194 s. [Lobanov I.E., Dotsenko A.I. Mathematical modeling of terminal heat-exchange for turbulated flow in channels. Moscow: MIKKhS; 2008. 194 p. (In Russ.)]

8. Ievlev V.M. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy. M.: Nauka; 1990. 215 s. [Ievlev V.M. Numeric modeling of turbulent flows. Moscow: Nauka; 1990. 215 p. (In Russ.)]

9. Lyakhov V.K. Metod otnositel'nogo sootvetstviya pri raschetakh turbulentnykh pristenochnykh potokov. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta; 1975. 123 s. [Lyakhov V.K. Method of relative correspondence during the calculations of turbulent near-wall flows. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta; 1975. 123 p. (In Russ.)]

10. Lyakhov V.K., Migalin V.K. Effekteplovoy, ilidiffuzionnoy, sherokhovatosti. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta; 1989. 176 s. [Lyakhov V.K., Migalin V.K. Effect of heat, or diffusion roughness. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta; 1989. 176 p. (In Russ.)]

11. Millionshchikov M.D. Turbulentnye techeniya v pogrannichnom sloe i v trubakh. M.: Nauka; 1969. 52 s. [Millionshchikov M.D. Turbulent flows in boundary layer and in pipes. Moscow: Nauka; 1969. 52 p. (In Russ.)]

12. Millionshchikov M.D. Turbulentnye techeniya v pristenochnom sloe i v trubakh. Atomnayaenergiya. 1970; 28(3):207-220. [Millionshchikov M.D. Turbulent flows in near-wall layer and in pipes. Atomic Energy. 1970; 28(3):207-220. (In Russ.)]

13. Millionshchikov M.D. Turbulentnyy teplo- i massoobmen v trubakh s gladkimi i sherokhovatymistenkami. Atomnayaenergiya. 1971; 31(3):199-204. [Millionshchikov M.D. Turbulent heat- and mass-exchange in pipes with smooth and rough walls. Atomic Energy. 1971; 31(3):199-204. (In Russ.)]

14. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. M.: Atomizdat; 1979. 416 s. [Kutateladze S.S. Fundamentals of heat-exchange theory. Moscow: Atomizdat; 1979. 416 p. (In Russ.)]

15. Dreytser G.A., Lobanov I.E. Issledovanie predel'noy intensifikatsii teploobmena na v trubakh zaschet iskusstvennoy turbulizatsii potoka. Teplofizika vysokikh temperatur. 2002;40(6):958-963. [Dreytser G.A., Lobanov I.E. Study of terminal heat-exchange intensification in pipes with artificial flow turbulisation. High Temperature. 2002;40(6):958-963. (In Russ.)]

16. Dreytser G.A., Lobanov I.E. Predel'nay intensifikatsiya teploobmena v trubakh za schet iskusstvennoy turbulizatsii potoka. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 2003;76(1):46-51. [Dreytser G.A., Lobanov I.E. Terminal heat-exchange intensification in pipes with artificial flow turbulisation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003;76(1):46-51. (In Russ.)]

17. Novikov I.I., Voskresenskiy K.D. Prikladnaya termodinamika i teploperedacha. M.: Gosatomizdat; 1961. 548 s. [Novikov I.I., Voskresenskiy K.D. Applied thermodynamics and heat transfer. Moscow: Gosatomizdat; 1961. 548 p. (In Russ.)]

18. Novikov I.I., Voskresenskiy K.D. Prikladnaya termodinamika i teploperedacha. M.: Atomizdat; 1977. 349 s. [Novikov I.I., Voskresenskiy K.D. Applied thermodynamics and heat transfer. Moscow: Atomizdat; 1977. 349 p. (In Russ.)]

19. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena za schet turbulizatsii potoka pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s turbulizatorami. Materialy XXXIV Akademicheskikh chteniypokosmonavtike «Aktual'nye problemy rossiyskoy kosmonavtiki». Moskva; 2010. S. 200-202. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of terminal heat-exchange with flow turbulisation under the turbulent flow in the flat channels with turbulizators. Materials of XXXIV Academic readings about cosmonautics «Relevant problems of Russian cosmonautics». Moscow; 2010. P. 200-202. (In Russ.)]

20. Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheskimi poverkhnostnymi polozhennymi turbulizatorami potoka na bazese misloynoy modeli turbulentnogo pogrannichnogo sloya. Fundamental'nye i prikladnye probleme tekhniki i tekhnologii. 2011;2(286):42-50. [Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Fundamental and Applied Problems of Technics and technology. 2011;2(286):42-50. (In Russ.)]

21. Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheskimi poverkhnostnymi turbulizatorami potoka na bazese misloynoy modeli turbulentnogo pogrannichnogo sloya. Tezisy Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly «Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh tekhnologiyakh». Moskva; 2011. S. 50-52. [Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Abstracts of International scientific school «Problems of gas dynamics and heat-exchange in energetic technologies». Moscow; 2011. P. 50-52. (In Russ.)]

22. Lobanov I.E. Teoriya teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s poverkhnostnymi odnostoronnimi turbulizatorami potoka na baze misloynoy modeli turbulentnogo pogrannichnogo sloya. Moskovskoe nauchnoe obozrenie. 2012;4(1):7-12. [Lobanov I.E. Theory of heat exchange under turbulent flow in flat channels with with single-sided flow turbulizators, situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent bounda-

ry layer. *Moskovskoenauchnoeobozrenie*. 2012;4(1):7-12. (In Russ.)]

23. Lobanov I.E. Analiticheskoe reshenie zadachi ob intensifitsirovannom teploobmene pr i turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheski poverkhnostnoras polozhennymi turbulizatoramipotoka na basesemisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya. *Nauchnoe obozrenie*. 2012;2:375-387. [Lobanov I.E. Analytical solution of the problem of intensified heat exchange under turbulent flow in flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. *Science review*. 2012;2:375-387. (In Russ.)]

24. Lobanov I.E. Teploobmen pri turbulentnom techenii v ploskikhkanalakh s ravnomernoraspolozhennym i poverkhnostnym i odносторонними turbulizatorami potoka. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012;8:13-17. [Lobanov I.E. Heat exchange under turbulent flow in flat channels with evenly situated surface single-sided flow turbulizators. *Russian Engineering Research*. 2012;8:13-17. (In Russ.)]

25. Lobanov I.E. Teoriya gidravlicheskogo soprotivleniya v sherokhovatykh trubakh. *Vestnik mashinostroeniya*. 2013;7:27-33. [Lobanov I.E. Theory of hydraulic resistanse in rough pipes. *Russian Engineering Research*. 2013;7:27-33. (In Russ.)]

26. Teploobmen v energeticheskikh ustanovkakh kosmicheskikh apparatov. Pod red. V.K. Koshkina. M.: Mashinostroenie; 1975. 272 s. [Heat exchange in energetic installations of cosmic apparatus. Koshkin V.K. (Ed.). Moscow: Mashinostroenie; 1975. 272 p. (In Russ.)]

27. Zhukauskas A.A. Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh. M.: Nauka; 1982. 472 s. [Zhukauskas A.A. Convective transfer in heat-exchangers. Moscow: Nauka; 1982. 472 p. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

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

Information about the author.

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

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.09.2017.

Принята в печать 26.11.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 24.09.2017.

Accepted for publication 26.11.2017.

Для цитирования: Хураמיшина Р.А. Параметрическая диагностика технического состояния центробежного нагнетателя в эксплуатации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):72-86. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

For citation: Khuramshina R. A. Parametric diagnostics of the centrifugal supercharger's technical condition during operation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 72-86. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.7.036

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-72-86

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Хураמיшина Р.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, г.Уфа, ул.Космонавтов 1,Россия,
e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

Резюме: *Цель.* Основной задачей является разработка математической модели центробежного компрессора и параметрическая диагностика технического состояния центробежного нагнетателя в эксплуатации. **Метод.** Предложена модель расчета термодинамических свойств природного газа, приведения параметров центробежного компрессора к начальным условиям и к частоте вращения, а также и интегральных показателей технического состояния нагнетателя. Методом параметрической диагностики определено техническое состояние газового тракта центробежного нагнетателя компрессорной установки. **Результат.** Выполнена программная реализация математическая модели rotating центробежного компрессора в ПК DVIgWT. В отличие от существующей методики ВНИИГАЗ, анализ проведенных расчетов показал, что математическая модель адекватная, наличие погрешности связано с учетом свойств газов изо-бутана и и-гексана. Выполняемые исследования по оценке технического состояния центробежного компрессора способны указать на наличие или отсутствие дефектов центробежного компрессора. **Вывод.** Существует ряд методов диагностики центробежного нагнетателя, но самым эффективным методом является вибродиагностика. Однако поиск неисправностей и зарождающихся дефектов в проточной части центробежного компрессора не может ограничиваться только данными вибродиагностики, которая дает около 60% достоверной информации о состоянии газоздушного тракта. Около 20% неисправностей компрессора и примерно половина опасных режимов работы проточной части нагнетателя обнаруживаются с помощью анализа термогазодинамических параметров (параметрическая диагностика). Основная сложность контроля технического состояния проточной части центробежного нагнетателя заключается в трудности количественной оценки процессов, протекающих в нагнетателе, что приводит к проблемам установления достоверного диагноза за приемлемый промежуток времени.

Ключевые слова: математическая модель, центробежный компрессор, термодинамические свойства, центробежный нагнетатель, параметрическая диагностика

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

PARAMETRIC DIAGNOSTICS OF THE CENTRIFUGAL SUPERCHARGER'S
TECHNICAL CONDITION DURING OPERATION

Regina A. Khuramshina

Ufa State Petroleum Technological University,
1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Russia,
e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

Abstract. Objectives The main aim is to develop a mathematical model of a centrifugal compressor and carry out a parametric diagnostics of a centrifugal supercharger's technical condition during operation. **Methods** A model is proposed for calculating the thermodynamic properties of natural gas, reducing the parameters of a centrifugal compressor to the initial conditions and to the rotation frequency, as well as the integral indicators of the supercharger's technical state. The technical state of the gas path of the centrifugal supercharger of the compressor unit is determined by the parametric diagnostic method. **Results** The software implementation of the mathematical model of centrifugal compressor is carried out using a DVIGwT PC. The analysis of calculations indicates that the model is appropriate, with the error being due to taking into account the properties of iso-butane and i-hexane, in contrast with the VNIIGAZ technique. The evaluation studies of a centrifugal compressor's state are indicative of the presence or absence of its defects. **Conclusion** Among a number of the diagnostic methods for evaluating a centrifugal supercharger, the most effective is vibrodiagnostics. However, the search for malfunctions and nascent defects in the flowing part of the centrifugal compressor cannot be limited only to vibrodiagnostic data, which provides about 60% of the reliable information about the state of the gas-air tract. About 20% of the compressor's malfunctions and approximately half of the dangerous modes of the supercharger's flow-through part is detected using thermogasdynamic parametric analysis (parametric diagnostics). The main difficulty of the control over the technical state of the flow-through part of the centrifugal supercharger is in the complication of the quantitative evaluation of the processes taking place in the supercharger, which leads to problems in providing reliable diagnosis during a reasonable period of time.

Keywords: mathematical model, centrifugal compressor, thermodynamic properties, centrifugal supercharger, parametric diagnostics

Введение. В процессе эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) существуют проблемы, связанные с контролем и оценкой их технического состояния. В частности, одной из важных проблем является диагностический контроль центробежного нагнетателя (ЦБН), который предназначен, как для контроля технического состояния собственно ЦБН, так и для повышения достоверности и глубины диагностирования ЦБН. Поэтому актуальной является параметрическая диагностика ЦБН на основе широкого использования вычислительных комплексов.

Постановка задачи. Техническая диагностика – наука о распознавании состояния технической системы, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации [1-2].

Целью технической диагностики являются определение возможности и условий дальнейшей эксплуатации диагностируемого оборудования и в конечном итоге повышение промышленной и экологической безопасности [3-5].

Задачами технической диагностики, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, являются [6-10]:

- обнаружение дефектов и несоответствий, установление причин их появления и на этой основе определение технического состояния оборудования;

- прогнозирование технического состояния и остаточного ресурса (определение с заданной вероятностью интервала времени, в течение которого сохранится работоспособное состояние оборудования).

Существуют следующие виды диагностирования газоперекачивающих агрегатов [11-21]:

1. Динамические методы;
2. Дефектоскопия;
3. Контроль загрязнений;
4. Анализ тенденций;
5. Анализ предпосылок.

Решение перечисленных задач, особенно для сложных технических систем и оборудования, позволяет получить большой экономический эффект и повысить промышленную безопасность соответствующих производственных объектов.

Техническая диагностика, благодаря раннему обнаружению дефектов, позволяет предотвратить внезапные отказы оборудования, что повышает надежность, эффективность и безопасность промышленных производств, а также дает возможность эксплуатации сложных технических систем по фактическому техническому состоянию.

Методы исследования. Методы диагностики технического состояния можно разделить на два принципиально отличающихся типа [22]:

1. Разрушающие;
2. Неразрушающие.

К методам разрушающего контроля обычно относят предпусковые или периодические гидравлические испытания аппаратов, а также механические испытания образцов металла, вырезанных из их элементов.

Неразрушающие методы контроля предполагают применение физических методов контроля качества, не влияющих на работоспособность конструкции аппарата.

В настоящее время для обнаружения и идентификации дефектов используется широкий спектр методов неразрушающего контроля (НК). Современная классификация методов НК включает девять видов контроля: электрический, магнитный, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, визуально-измерительный, радиационный, акустический и контроль проникающими веществами.

Каждый из видов НК подразделяют на методы, отличающиеся следующими признаками [23]:

- характером взаимодействия поля или вещества с объектом, определяющим соответствующие изменения поля или состояния вещества;
- параметром поля или вещества (первичным информативным параметром), измеряемым в процессе контроля;
- способом измерения параметра поля или вещества.

Методы НК основаны на использовании физических явлений для обнаружения и определения параметров дефекта. В свою очередь неразрушающие методы контроля подразделяются на – пассивные (интегральные) и активные (локальные).

К активным методам НК относятся методы, в которых измеряется изменение возбуждаемого физического поля, а к пассивным методам относятся методы, использующие свойства физического поля, возбуждаемого самим контролируемым объектом.

Локальные методы позволяют обнаружить дефект лишь на ограниченной площади, а интегральные методы способны проконтролировать весь крупногабаритный объект в целом.

Активными методами являются: визуальный и измерительный контроль, ультразвуковая дефектоскопия, магнитные методы, радиографические капиллярные методы, метод вихревых токов, электрический метод.

К пассивным методам относятся: тепловизионный, виброакустические методы и метод акустической эмиссии.

При выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций

необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; виды деятельности, при которых применяется неразрушающий контроль (изготовление, ремонт, техническое диагностирование); формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций [15].

При определении технического состояния системы необходимо с высокой степенью достоверности установить начальные состояния входящих в нее элементов – то есть следует провести диагностику агрегата непосредственно после окончания ремонтных операций. Необходимо так же, с достаточной степенью точности, установить рабочий отрезок времени функционирования технической системы, поскольку режимы работы компрессорных установок при пуске и остановке могут создавать разного рода опасные условия, отличающиеся от установившихся режимов работы.

С помощью того или иного метода диагностики ГПА можно и весьма целесообразно прогнозировать изменение технического состояния агрегата с целью вынужденных остановок ГПА, повышения эффективности их эксплуатации, определения видов и сроков проведения ремонта [1].

Техническое состояние газоперекачивающего агрегата сказывается на всей технологии транспортировки газа по газопроводу. Можно утверждать что, если при данном расходе топливного газа по агрегату снизилась производительность нагнетателя, то при прочих равных условиях это могло произойти из-за ухудшения состояния ГПА, нагнетателя или того и другого вместе.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков существующих методов диагностики текущего состояния компрессорной установки показал, что большая часть дефектов и неисправностей, примерно 60%, может быть установлена методами вибродиагностики, пригодными для обнаружения дефектов практически во всех элементах агрегата; около 20% неисправностей компрессора и примерно половина опасных режимов работы проточной части нагнетателя обнаруживается только анализом термогазодинамических параметров (параметрическая диагностика); примерно 20% неисправностей элементов компрессора, обнаруженных методами вибродиагностики можно подтвердить анализом термогазодинамических параметров машины и около 20% неисправностей можно зарегистрировать по изменению температуры, состава, уровню загрязнений смазочного масла.

Распределение методов активного контроля ГПА представлено на рис. 1.



Рис.1. Распределение методов активного контроля ГПА

Fig.1. Distribution of methods for active monitoring of gas-turbine engines

Одним из основных направлений технической диагностики ГПА является метод параметрической диагностики, как наиболее перспективный и имеющий значительный опыт.

использования в авиационной и других отраслях промышленности. Основой метода параметрической диагностики является определение изменения параметров технического состояния агрегата или его отдельных элементов по изменению его технических и топливоэнергетических показателей – мощности, производительности, КПД привода и нагнетателя в процессе эксплуатации [17-20].

Об изменении технического состояния агрегата или его отдельных элементов судят по изменению характеристик их рабочих режимов. Самоизменение оценивается сравнением характеристик, построенных для данного момента, и времени, принятого за исходное.

В качестве исходного может быть принято время проведения стендовых, сдаточных или других видов испытаний агрегата. Неизменность характеристик агрегата будет говорить о его нормальном состоянии; «расслоение» характеристик будет свидетельствовать об изменениях, происходящих в ГПА.

Комплексная оценка технического состояния потенциально опасных элементов технической системы в период эксплуатации в основном базируется на структурном анализе надежности ее компонентов, динамических безраборных методов контроля (диагностика по параметрам вибрации и термогазодинамическим характеристикам) и анализе загрязнений [18]. Успех диагностирования в значительной мере обусловлен правильностью выбора информативных компонентов для построения принципиальных диагностических моделей объекта и моделей распознавания, а также идентификации сигналов измерительных систем.

Обсуждение результатов. Определение политропного КПД и мощности ЦБН природного газа выполняется в соответствии с методическими указаниями по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323947-43-99, разработанные ВНИИГАЗ [2].

Основой системы определений мощности, эффективности и других показателей ЦБК и их приводов, является термодинамический анализ сжатия газа, предусматривающий использование различных термодинамических и калорических функций реального газа.

В качестве эталонной (полезной) работы для ЦБН природного газа применяется политропная работа.

Показатели и характеристики ЦБН определяются по статическим параметрам компримируемого газа (давлению и температуре), измеренных в сечениях входного и выходного фланцев (патрубков).

Для определения плотности компримируемого газа используется следующее уравнение:

$$p_{1H} = \frac{p_{1H} \cdot 10^3}{Z_{1H} \cdot R \cdot T_{1H}}, \quad (1)$$

где Z_{1H} - функция сжимаемости, поправка реального газа.

Функция сжимаемости определяется с использованием базового уравнения состояния. В качестве базового уравнения состояния применено модифицированное (упрощенное) уравнение состояния «Бенедикта-Вэбба-Рабина» (BWR), представленное в приведенной форме, и на его основе определены формулы для расчета других функций сжимаемости.

Базовое уравнение состояния:

$$Z = 1 + \left(\frac{\alpha_1}{\tau} - \frac{\alpha_2}{\tau^2} - \frac{\alpha}{\tau_4} \right) \cdot \frac{\pi}{4} + \left(\frac{\alpha_4}{\tau^2} - \frac{\alpha_5}{\tau^3} + \frac{\alpha_6}{\tau^5} \right) \cdot \frac{\pi^2}{Z^2}. \quad (2)$$

Приведенный объемный расход газа на входе к начальным условиям:

$$Q_{1пл.н.у} = Q_{1H} \cdot p_{1H} \cdot z_{1HH} \cdot R_0 \cdot T_{1HH} / (p_{1HH} \cdot 10^3). \quad (3)$$

Приведенный объемный расход газа через нагнетатель:

$$Q_{1н.пр} = Q_{пр.н.у} \cdot \frac{n_0}{n_{ст}}, \quad (4)$$

где $n_0 = 5300 \frac{об}{мин}$.

Приведенная относительная внутренняя мощность ЦБН. Для расчетов режимов работы КС применяются характеристики ЦН, представляющие зависимость степени повышения давления ε , политропического КПД, $\eta_{пол}$ и приведенной относительной внутренней мощности

$$\left[\frac{N_t}{p_{1н}} \right] = \frac{N_t}{p_{1н}} \cdot \left(\frac{n_0}{n_{ст}} \right)^3 \quad (5)$$

Приведенная степень сжатия:

$$\varepsilon_{пр} = \left(\frac{m_{v_0} \cdot H_{n_{пр}}}{Z_{1H_0} \cdot R_0 \cdot T_{1H_0}} + 1 \right)^{\frac{1}{m_0}} \quad (6)$$

где $m_{v_0} = \frac{K-1}{K}$ – объемный показатель политропы,

$H_{n_{пр}} = H_n \cdot \left(\frac{n_0}{n_{см}} \right)^2$ – приведенный политропный напор.

Коэффициент технического состояния проточной части ЦБН по отклонению политропного КПД [3]:

В качестве количественных оценок смещения характеристик ГПА, ГТУ или нагнетателя иногда принимаются коэффициенты технического состояния по КПД K_η или по мощности.

$$K_\eta = \frac{\eta_{пол}}{\eta_{пол\ макс}} \quad (7)$$

где $\eta_{пол\ макс} = 0,835$.

Удаленность режима ЦБН от помпажа:

$$K_{зап} = \frac{Q_{пр.н.у} - Q_{п.}}{Q_{п.}} \cdot 100\% \quad (8)$$

где $Q_{п.}$ – помпажный расход, принимается по ГДХ.

Техническое состояние центробежного нагнетателя оценивается по табл.1.

Таблица 1. Классы технического состояния проточной части центробежного нагнетателя
Table 1. Classes of technical condition of the flowing part of a centrifugal supercharger

Значение коэффициента технического состояния	Без дефектов	Наличие эксплуатационного износа и восстанавливаемых дефектов	Наличие дефектов на ранней стадии развития	Наличие существенных дефектов	Классы технического состояния
K_η	0,98...1,0				Исправное
		0,90...0,98			Удовлетворительное
			0,85...0,90		Удовлетворительное
				<0,85	Эксплуатация нежелательна

Реализация математической модели нагнетателя в виде отдельного модуля проводилась в программе «Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIwT)» [3]. В DVIwT. введена паспортная характеристика ЦБН для номинального, летнего и зимнего режимов с помощью приложения SgarEdit.

Оценка адекватности математической модели нагнетателя выполнена в сравнении с данными ВНИИГАЗ [4] (табл. 2). Анализ результатов расчета показывает, что максимальная погрешность в определение политропического КПД составляет 0,695%. Погрешность в определение политропического КПД зависит от погрешности определения полного напора, на который влияет состав газа.

Если значение КПД в результате расчета получается выше КПД максимального, равного, то следует считать, что замеренные данные имеют большую погрешность и данную точку не следует включать в расчет.

Система компьютерного моделирования DVIGwT предназначена для проведения структурного и параметрического анализа газотурбинных двигателей, составления и расчёта тепловых схем паротурбинных и парогазовых установок.

Таблица 2. Результаты расчета
Table 2. Results of calculation

Параметр	Размерность	ВНИИГАЗ			КС, режим 1			КС, режим 2		
		КС	DVIwT	Δ, %	КС	DVIwT	Δ, %	КС	DVIwT	Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициент сжимаемости на входе	–	0,881	0,881	0,016	0,895	0,895	0	0,897	0,897	0
Коэффициент сжимаемости на выходе	–	0,891	0,891	0,022	0,903	0,903	0	0,904	0,904	0
Полный напор	кДж/кг	59,444	59,847	0,674	34,200	34,610	0,41	42,45	42,98	-0,5939
Политропный КПД замеренным параметрам	–	0,829	0,823	0,695	0,702	0,693	-0,01	0,797	0,787	0,010
Внутренняя мощность компрессора	кВт	11,865	11,946	0,02	11,39	11,53	-1,22	14,34	14,5195	-0,182
Степень повышения давления в компрессоре, приведенная	–	1,484	1,458	-1,75	1,269	1,271	0,15	1,320	1,310	0,009

В системе DVIGwT математическая модель создается из типовых элементов посредством их соединения типовыми информационными связями через соответствующие соединительные звенья элементов.

Построение модели осуществляется на визуальном уровне, отображаемом в соответствующем окне на мониторе компьютера, при этом информационное построение модели происходит автоматически. Интерфейс системы выполнен в многооконном режиме, состоящим из главного меню, панели инструментов, окон: «Модели», «Доступные типы элементов», и приближен к стандартному виду операционной системы Windows. После запуска системы на экране появляется главное меню.

При создании новой модели или открытии существующей модели из имеющегося набора моделей в каталоге «MOD» появляются окно «Модель» и окно «Доступные типы элементов». При просмотре файла результатов в виде графиков появляется окно модуля вывода графиков со своим интерфейсом.

Система оснащена возможностью вызова справки. Вызов справочной информации по системе осуществляется нажатием клавиши F1; вызов справочной информации по элементам, входным и выходным параметрам – одновременным нажатием комбинации клавиш Alt+F1. Создание новой модели выполняется любым из следующих способов. Окно «Модель» появляется на экране монитора при выполнении команды: «Открыть» [Файл – Открыть] или при нажатии соответствующих кнопок на панели инструментов. Результат выполнения команды показан на рис.2.

Окно «Модель», при активной закладке «Иерархия», разделено на два окна: «Иерархия» и «Текущий уровень». В окне «Иерархия» отражается иерархическая структура модели. Заметим, что всегда первым элементом иерархической структуры является пункт «Начальные условия» а последним – «Общие результаты».

В окне «Текущий уровень» отображается расчетная схема модели установки, которая

конструируется из доступных элементов, путем их перетаскивания мышью из окна «Доступные типы элементов». Нажатие курсором мышки на название «Иерархия» или «Текущий уровень» вызывает разворачивание соответствующего окна до размеров, соответствующих окну «Модель». Повторное нажатие на соответствующее название приводит к возврату окон в исходное состояние.

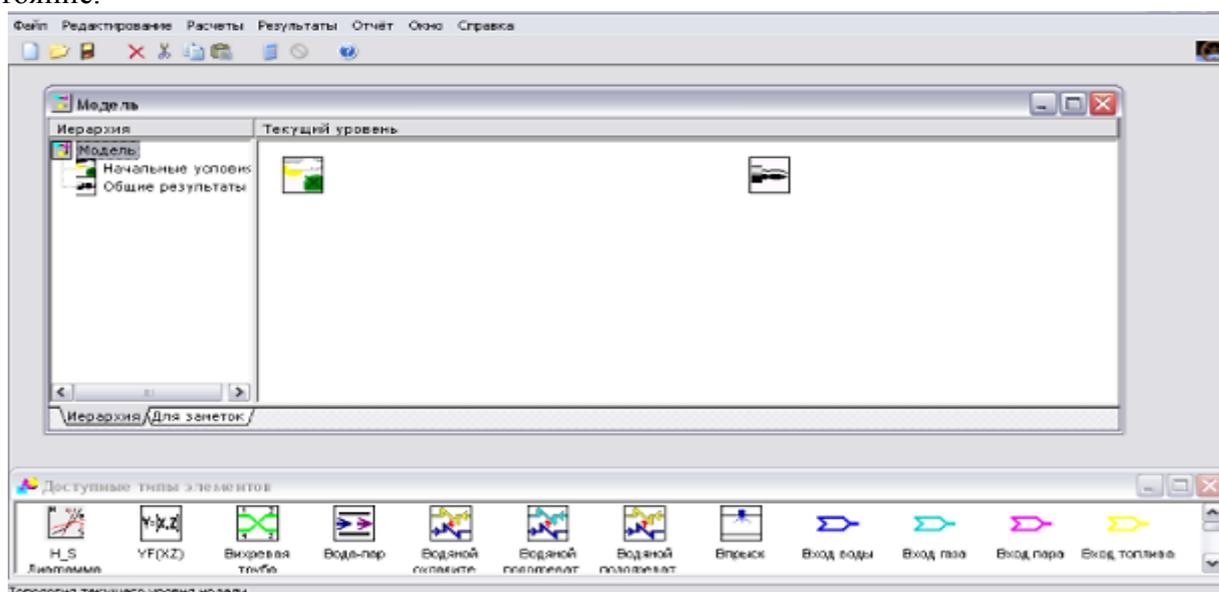


Рис. 2. Окно «Модель»
Fig.2. Model Window

Окно «Доступные типы элементов» появляется на экране монитора при выполнении команды «Новая модель» или «Открыть» [Файл – Открыть] или при нажатии соответствующих кнопок на панели инструментов и содержит набор типовых элементов, необходимых для конструирования схемы установки. Изображение окна «Доступные типы элементов» показано на рис. 3.

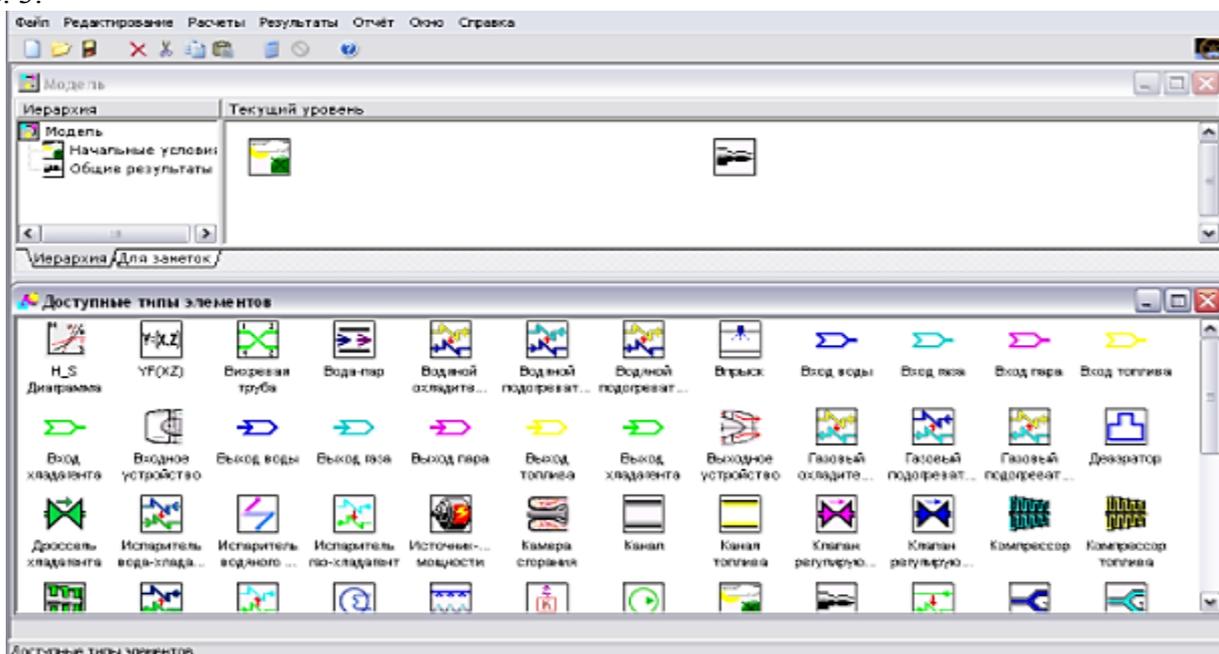


Рис. 3. Окно «Доступные типы элементов»
Fig. 3. The Available Element Types Window

Типовые элементы представлены в виде «иконок» со схематическим изображением, отражающим суть элемента. Для удобства пользования элементы расположены в алфавитном

порядке. Добавление нового элемента осуществляется путём его перетаскивания в поле правой части окна «Модель» – окно «Текущий уровень».

Для задания исходных данных по элементам модели, выполняется двойное нажатие левой клавишей мыши по элементу модели, которое открывает окно элемента модели с одноименным названием (например, для элемента «Входное устройство» открываем окно «Входное устройство»). В закладке «Входные параметры» задаются исходные данные. Данная операция повторяется для всех элементов модели. В этих элементах значения входных параметров задаются в первом приближении.

При затруднениях в задании исходных данных необходимо сделать активным интересующий входной параметр и нажать сочетание клавиш Alt+F1, вызвав тем самым справку по данному параметру. На экране появится окно справки с соответствующим пояснением.

Пример вызова справки для параметра «Теплотворная способность топлива [кДж/кг]» во вкладке «Входные параметры» элемента модели «Начальные условия» представлен на рис. 4.

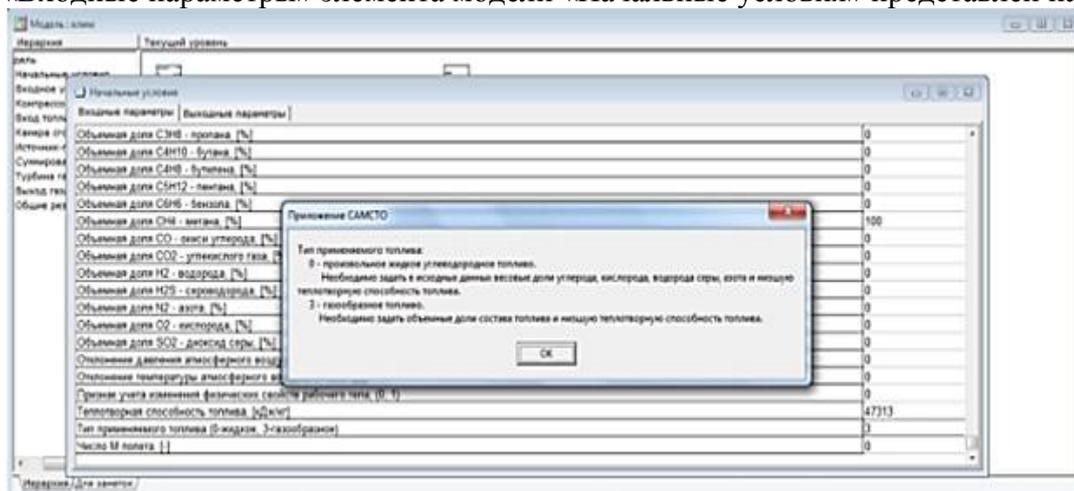


Рис.4.Окно справки
Fig.4. Help Window

Ниже представлен процесс задания исходных данных для всех элементов модели, отражающий особенности формирования каждого элемента.

Элемент модели «Начальные условия». При двойном клике мышью на элементе модели открывается следующее окно (рис. 5):

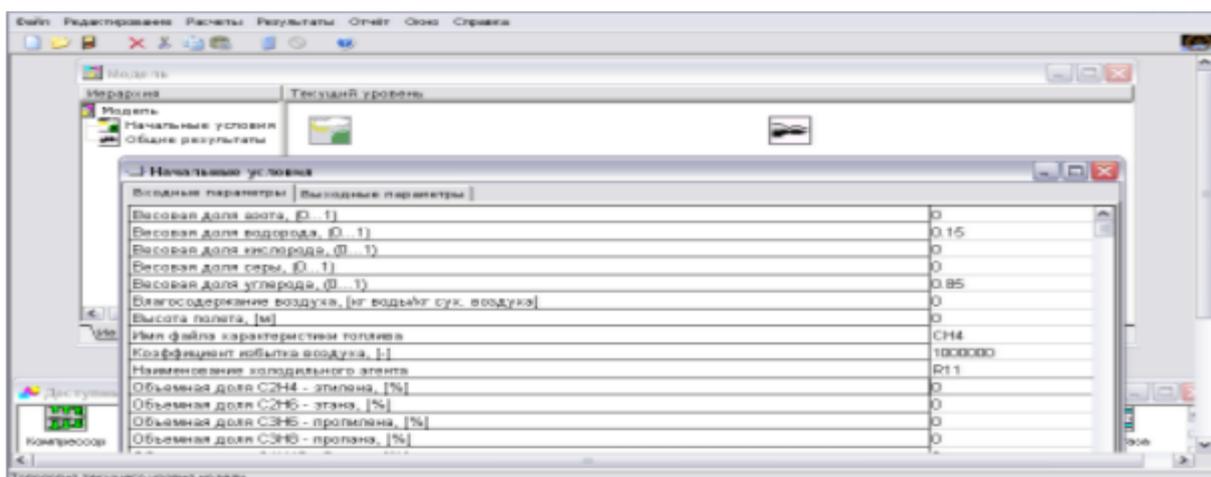


Рис. 5. Исходные данные к элементу модели «Начальные условия»
Fig. 5. Initial data to the element of the model «Initial conditions»

Во вкладке «Входные параметры» в соответствующих строках указывается тип топлива, применяемого в ГТУ и его теплотворная способность.

Элемент модели «Входное устройство». В расчёте принимается значение коэффициента

полного давления входного устройства (ВУ) равным единице и задается расход воздуха на входе в ВУ в соответствии с исходными данными.

Окно исходных данных для элемента «Входное устройство» представлено на рис. 6.

Входные параметры	Выходные параметры
Заданное значение коэффициента полного давления ВУ [-]	1
Имя файла характеристики коэффициента полного давления ВУ	Signalx
Номер входного устройства [1,2,3...]	1
Приведенная скорость на выходе ВУ [-]	0.6
Приведенный расход воздуха на входе ВУ [кг/с]	408.897
Признак задания коэффициента полного давления ВУ (0, 1, 2, 3)	0

Рис.6. Исходные данные к элементу модели «Входное устройство»

Fig.6. Input data to the «Input device» model element

Элемент модели «Компрессор». Для элемента «Компрессор» задаются следующие параметры:

1. Адиабатический КПД компрессора (0,83...0,88);
2. Относительный расход воздуха 1 и 2 отборов;
3. Частота вращения ротора ГТУ;
4. Расход воздуха через ГТУ;
5. Степень повышения полного давления в компрессоре.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Компрессор» представлено на рис.7.

Входные параметры	Выходные параметры
Адиабатический (политропный) КПД в точке образмеривания характеристики компрессора [-]	0.88
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kкрд	Неизвестно
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kкр1	Неизвестно
Имя файла характеристики компрессора	kom10
Номер компрессора [1,2,3...]	1
Окружная скорость [м/с]	Неизвестно
Относительная адиабатическая работа компрессора до 1 отбора [-]	1
Относительная адиабатическая работа компрессора до 2 отбора [-]	1
Относительный расход воздуха 1 отбора [-]	0.11
Относительный расход воздуха 2 отбора [-]	0
Приведенная скорость на входе в компрессор [-]	0.5
Приведенная скорость на выходе из компрессора [-]	0.5
Приведенная частота вращения в точке образмеривания характеристики	3000
Приведенный расход воздуха в точке образмеривания характеристики [кг/с]	408.897
Признак учета влияния числа Re на характеристики компрессора: 0 - нет, 1 - да	0
Расчет компрессора: 0 - стандартного, 1 - дозимного	0
Расчет: 0-без поправок, 1-с поправками на Пик и КПД от влажности	0
Расчет: 0-без хар-к, 1-со станд. хар-кой, 2-с АВНА, 3-КПД политропный	1
Рисование характеристики: 0 - нет, 1 - да	1
Средний диаметр первого рабочего колеса [м]	Неизвестно
Степень повышения давления в рабочей точке [-]	13.82
Степень повышения давления в точке образмеривания характеристики [-]	13.82
Теоретический напор	Неизвестно
Угол установки ВНА в рабочей точке [град]	Неизвестно
Угол установки ВНА в точке образмеривания характеристики компрессора [град]	Неизвестно
Харда пополок на среднем диаметре [м]	Неизвестно
Частота вращения в точке завязки	3000

Рис.7. Исходные данные элемента модели «Компрессор»

Fig.7. Initial data of the element of the «Compressor» model

Элемент модели «Вход топлива». Для элемента «Вход топлива» необходимо задать давление подаваемого в камеру сгорания топлива, расход топлива, степень сухости и его температуру.

Окно формирования исходных данных представлено на рис. 8.

Входные параметры	Выходные параметры
Давление топлива, [кПа]	2300
Начальный расход топлива, [кг/с]	9.103
Номер устройства ввода топлива, {1,2,3...}	1
Степень сухости, [-]	2
Температура топлива, [°C]	20

Рис.8. Исходные данные элемента модели «Вход топлива»

Fig.8. Initial data of the model element «Fuel input»

Элемент модели «Камера сгорания». Для элемента «Камера сгорания» задаются следующие параметры:

1. Значение коэффициента полного давления (0,94...0,96);
2. Значение коэффициента полноты сгорания топлива (0,985...0,995);
3. Температура газа на выходе из камеры сгорания.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Камера сгорания» представлено на рис. 9.

Входные параметры	Выходные параметры
Заданное значение коэффициента полного давления, [-]	0.94
Заданное значение коэффициента полноты сгорания топлива, [-]	0.99
Имя файла характеристики коэффициента полного давления	Sigmakc
Имя файла характеристики коэффициента полноты сгорания	ettaz
Коэффициент избытка воздуха в КС, [-]	2.535
Номер теплового потока, {1, 12, 123, ...}	1
Порядковый номер камеры сгорания, {1,2,3...}	1
Приведенная скорость на входе в камеру сгорания, [-]	0.3
Приведенная скорость на выходе из камеры сгорания, [-]	0.2
Признак задания коэффициента полного давления {0, 1, 2, 3, 4}	0
Признак задания коэффициента полноты сгорания {0, 1, 2, 3, 4}	0
Признак задания температуры газа на выходе из КС: 0 - Т'кс; 1 - альфа КС.	0
Суммарный объем жаровой трубы, [м³]	1.5
Температура газа на выходе из камеры сгорания, [K]	1493

Рис.9. Исходные данные элемента модели «Камера сгорания»

Fig.9. Initial data of the combustion chamber element

Элемент модели «Турбина газовая» Для элемента «Турбина газовая» задаются следующие параметры:

1. Адиабатический КПД турбины (0,9...0,925);
2. Доля охлаждающего воздуха, подведенного к СА турбины 0,11;
3. Механический КПД ротора;

Окно формирования исходных данных элемента модели «Турбина газовая» представлено на рис.10.

Входные параметры	Выходные параметры
Адиабатический (политропный) КПД турбины в точке образумеривания жарки, [-]	0.905
Доля охлаждающего воздуха, подведенного к са турбины, {0..1}	0.65
Имя файла характеристики турбины	21
Механический КПД ротора, [-]	0.99
Площадь горла соплового аппарата, [м²]	Неизвестно
Порядковый номер турбины, {1..3}	1
Приведенная скорость на входе в турбину, [-]	0.7
Приведенная скорость на выходе из турбины, [-]	0.7
Приведенная частота вращения в точке образумеривания характеристики, [1/с*0.5]	Неизвестно
Признак учета влияния числа Re на характеристики турбины: 0 - нет; 1 - да	0
Пропускная способность турбины в точке образумеривания, [кг/с*0.5/кПа]	Неизвестно
Расчет турбины: 0 - стандартной; 1 - перераширенная	0
Расчет без жарки: 1 - со станд жаркой; 2 - с жаркой с рассл по Блоти; 3 - Кп	0
Расовые характеристики: 0 - нет; 1 - да	1
Степень подогрева охлаждающего воздуха в системе охлаждения, [-]	1
Степень понижения давления в точке образумеривания характеристики, [-]	2
Хорда рабочих лопаток на среднем диаметре, [м]	Неизвестно
Хорда сопловых лопаток на среднем диаметре, [м]	Неизвестно

Рис.10. Исходные данные элемента модели «Турбина газовая»

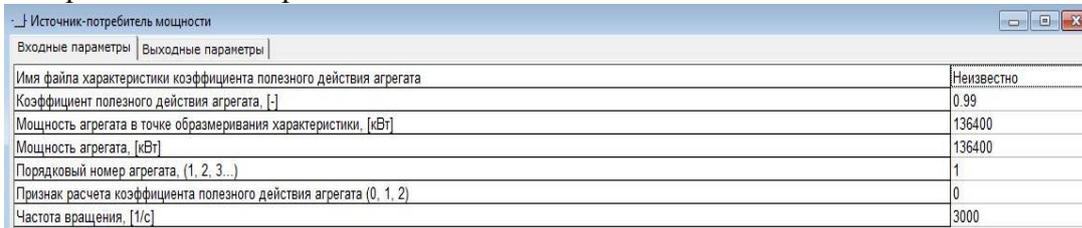
Fig.10. Initial data of the element of the model «Turbine gas»

Элемент модели «Суммирование мощности». Входные параметры данного элемента модели остаются неизменными.

Элемент модели «Источник-потребитель мощности». Для элемента «Источник-потребитель мощности» задаются следующие параметры:

1. КПД турбогенератора;
2. Мощность агрегата;
3. Частота вращения.

Окно формирования исходных данных элемента модели «Источник-потребитель мощности» представлено на рис. 11.



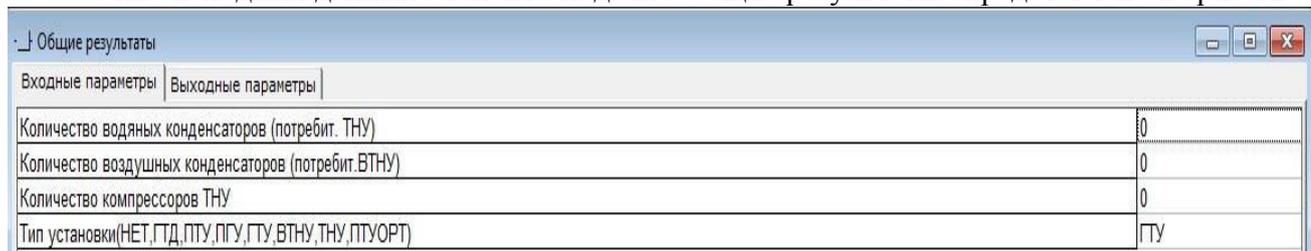
Имя файла характеристики коэффициента полезного действия агрегата	Неизвестно
Коэффициент полезного действия агрегата, [%]	0.99
Мощность агрегата в точке образмеривания характеристики, [кВт]	136400
Мощность агрегата, [кВт]	136400
Порядковый номер агрегата, (1, 2, 3...)	1
Признак расчета коэффициента полезного действия агрегата (0, 1, 2)	0
Частота вращения, [1/с]	3000

Рис.11. Исходные данные элемента модели «Источник-потребитель мощности»

Fig.11. Source data of the «Source-consumer power» model element

Элемент модели «Общие результаты». В данном элементе необходимо указать тип рассчитываемой установки. В нашем случае в строку параметра «Тип установки» с клавиатуры в русской раскладке вбивается тип установки «ГТУ».

Окно исходных данных элемента модели «Общие результаты» представлено на рис.12.



Количество водяных конденсаторов (потребит. ТНУ)	0
Количество воздушных конденсаторов (потребит. VTNU)	0
Количество компрессоров ТНУ	0
Тип установки (NET, GTD, GTPU, PGU, GTU, VTNU, TNU, PTUORT)	ГТУ

Рис.12. Исходные данные элемента модели «Общие результаты»

Fig.12. Initial data of the element of the model «General results»

После задания исходных данных для всех элементов модели, можно приступить непосредственно к её расчёту.

Запуск термодинамического расчёта производится любым из предложенных способов: нажатием на панели управления кнопки «Начать расчет» или через пункт меню «Расчеты» [Расчеты – Начать расчет], при этом выполняется простой расчет двигателя без подбора и оптимизации параметров. При нормальном окончании расчета и указании в команде «Настройки» «Выдавать сообщения об окончании расчета», появится информационное окно с сообщением – «Расчет окончен» (рис.13).

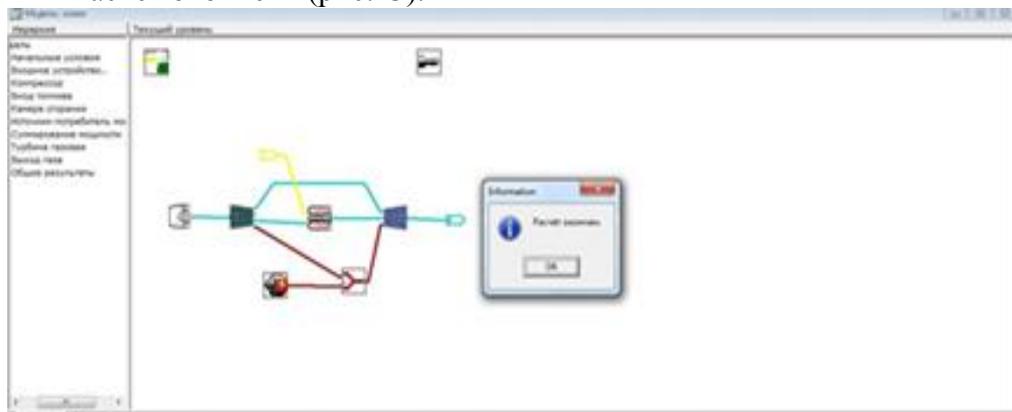
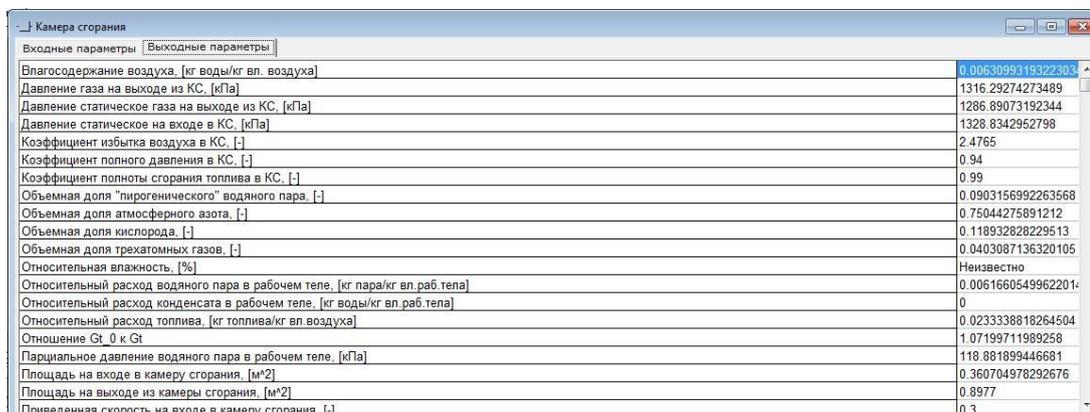


Рис.13. Сообщение об окончании расчета
Fig.13. Report about the end of the calculation

Получившиеся результаты отображаются в закладке «Выходные параметры» по всем элементам модели (двойное нажатие левой клавишей мыши на элементе модели и выбор соответствующей закладки в окне модели).

На рис.14 представлены результаты расчёта элемента модели «Камера сгорания».



Параметр	Значение
Влагосодержание воздуха, [кг воды/кг вл. воздуха]	0.0063099319322303
Давление газа на выходе из КС, [кПа]	1316.29274273489
Давление статическое газа на выходе из КС, [кПа]	1286.89073192344
Давление статическое на входе в КС, [кПа]	1328.8342952798
Коэффициент избытка воздуха в КС, [-]	2.4765
Коэффициент полного давления в КС, [-]	0.94
Коэффициент полноты сгорания топлива в КС, [-]	0.99
Объемная доля "пирогенического" водяного пара, [-]	0.0903156992263568
Объемная доля атмосферного азота, [-]	0.75044275891212
Объемная доля кислорода, [-]	0.118932828229513
Объемная доля трехатомных газов, [-]	0.0403087136320105
Относительная влажность, [%]	Неизвестно
Относительный расход водяного пара в рабочем теле, [кг пара/кг вл. раб. тела]	0.0061660549962201
Относительный расход конденсата в рабочем теле, [кг воды/кг вл. раб. тела]	0
Относительный расход топлива, [кг топлива/кг вл. воздуха]	0.0233338818264504
Отношение G_f к G_t	1.07199711989258
Парциальное давление водяного пара в рабочем теле, [кПа]	118.881899446681
Площадь на входе в камеру сгорания, [м ²]	0.360704978292676
Площадь на выходе из камеры сгорания, [м ²]	0.8977
Повышенная скорость на выходе из камеры сгорания, [-]	0.3

Рис.14. Закладка «Выходные параметры» с результатами расчёта в окне элемента «Камера сгорания»

Fig.14. «Output parameters» tab with calculation results in the «Combustion chamber» element window

Погрешность в определении, по сравнению с данными, должна составлять менее 3%.

В случае превышения заданной погрешности, необходимо скорректировать исходные данные по элементам модели. Корректируются значения параметров элементов ГТУ, выбираемых из диапазона (КПД компрессора, газовой турбины, турбогенератора; значение коэффициента полного давления и коэффициента полноты сгорания топлива; относительные величины отборов охлаждающего воздуха в компрессоре).

Вывод. Основная сложность контроля технического состояния проточной части центробежного нагнетателя заключается в трудности математического моделирования или количественной оценки процессов, протекающих в нагнетателе, что приводит к сложным проблемам установления достоверного диагноза за определенный промежуток времени.

Разработана математическая модель центробежного компрессора, включающая расчет термодинамических свойств природного газа, приведение параметров центробежного компрессора к начальным условиям и к частоте вращения; определены интегральные показатели технического состояния нагнетателя.

Выполнена программная реализация математической модели центробежного компрессора в ПК DVIwT. Анализ расчетов показывает, что математическая модель адекватная, наличие погрешности связано с учетом свойств газов изо-бутана и и-гексана (в отличие от методики ВНИИГАЗ).

Выполняемые исследования по оценке технического состояния центробежного компрессора, эксплуатируемой на КС, способны указать на наличие или отсутствие дефектов центробежного компрессора.

Комплексное использование методов технической диагностики обеспечивает возможность, при наличии современных универсальных аппаратных средств, эффективного контроля работоспособности энергетических установок, совершенствования системы обслуживания, снижения затрат на ремонтные операции, оптимизации управления компрессорными станциями в составе автоматизированной системы управления газопроводов.

Математическое моделирование центробежного компрессора создает возможность для автоматизации оценки технического состояния газоперекачивающего агрегата. Это поможет своевременно обнаружить и устранить проблемы, что позволит обеспечить нормальную эксплуатацию газоперекачивающего агрегата.

Библиографический список:

1. Козаченко коэффициент А.Н. Эксплуатация компрессорных проточной станций адекватная магистральных газопроводов. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99 Щуровский В.А и дру., ВНИИГАЗ, 1993 г.
3. Газотурбинная установка ГТУ – 16П Комплексное диагностическое обследование по эксплуатационным параметрам. Методика 83-00-900ПМ 156 ОАО «Авиадвигатель», Методика 83-00-900ПМ 156 ОАО «Авиадвигатель», 2005.
4. Горюнов И.М. «Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIwT)» / Программа для ЭВМ №2004610623 от 04.03.2004 РОМПАТЕНТ, Москва, 2004.
5. Межерецкий А.П., Корсов Ю.Г. Параметрическая диагностика газотурбинных установок для привода нагнетателей природного газа. М.: Энергомашиностроение, 1987, №2.
6. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение» №, 1987. – 240 с.
7. Кунина П.С., Павленко П.П.. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с центробежным нагнетателями. Ростов-га-Дону, изд-вл РГУ, 2011. -362 с.
8. Щуровский В.А., Зайцев Ю.А. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. – М.: Недра, 1999. – 191 с.
9. Газоперекачивающий агрегат ГПА – 16Р «Уфа» Руководство по эксплуатации, 911.00.00.000 РЭ 0 ЛУ, Книга 1 «Техническое описание и работа».
10. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов, Справочник, М.: Нефть и газ, 1999 год
11. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных, газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99 Щуровский В.А и др., ВНИИГАЗ, 1999 г.
12. Каталог газодинамических характеристик ЦБК природного газа Щуроаский В.А., Сальников С.Ю., Барцев И.В. и др. ВНИИГАЗ, 2005 г.
13. Рид, ДЖ. Праусниц, Т. Шервуд. Свойства газов и жидкостей: Справочник пособие/ Пер. С англ. Под редакцией Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. И доп. – Л.: Химия, 1982. -592 с., ил. – Нью-Йорк, 1977
14. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rinderquille und die Bestimmung der moqenital von Giille. Dtsch. Aqrartech. B.12, No. 7. 1969.
15. Amso is the only pump we can use in our speeded up production system "Pit and Quarry " Vol 48, 2015, 11.
16. Jetsboost pumping capacity, «Pocr Products», Vol 49, 2010, N 10
17. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rinderquille und die Bestimmung der moqenital von Giille. Dtsch. Aqrartech. B.12, No. 7. 2016.
18. Allott D. Farm Building Digest, 2017, 9.
19. Norcr LANDBRUR, 2016, 26, 10, 263.
20. Farm Industry News, 2017, 6, 3, 36.
21. Зарицкий С.А. Диагностика газоперекачивающих агрегатов газотурбинными приводами. М.: Недра, 2016
22. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М.: Высшая школа, 2006.- 279 с.
23. Коллакот Р. Диагностика повреждений: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 512 с.

References:

1. Kozachenko A.N. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov. M.: Neft' i gaz; 1999. 463 s. [Kozachenko A.N. Operation of compressor stations of main gas pipelines. M.: Neft' i gaz; 1999. 463 p. (In Russ.)]
2. Shchurovskii V.A i dr. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh raschetov pri ispytaniyakh gazoturbinykh gazoperekachivayushchikh agregatov PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ; 1993. [Shchurovskii V.A i dr. Methodological instructions for carrying out thermal and gas-dynamic calculations for testing gas-turbine gas-pumping units PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ; 1993. (In Russ.)]
3. Gazoturbinnaya ustanovka GTU – 16P. Kompleksnoe diagnosticheskoe obsledovanie po ekspluatatsionnym parametram. Metodika 83-00-900PM 156 ОАО «Авиадвигатель». 2005. [Gas turbine unit GTU-16P. Complex diagnostic examination for operational parameters. Method 83-00-900PM 156 of ОАО «Авиадвигатель». 2005. (In Russ.)]

4. Goryunov I.M. «Sistema matematicheskogo modelirovaniya teplovykh, energeticheskikh i kombinirovannykh ustanovok (DVIwT)». Programma dlya EVM №2004610623 ot 04.03.2004. ROSPATENT. Moskva; 2004. [Goryunov I.M. «System of mathematical modeling of thermal, power and combined installations (DVIwT)». PC programme №2004610623 from 04.03.2004. ROSPATENT. Moscow; 2004. (In Russ.)]
5. Mezheretskii A.P., Korsov Yu.G. Parametricheskaya diagnostika gazotrubinnykh ustanovok dlya privoda nagnetatelei prirodnogo gaza. M.: Energomashinostroenie; 1987. №2. [Mezheretskii A.P., Korsov Yu.G. Parametric diagnostics of gas-turbine units for driving natural gas superchargers. Moscow: Energomashinostroenie; 1987. №2. (In Russ.)]
6. Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika. M.: Mashinostroenie; 1987. 240 s. [Birger I.A. Technical diagnostics. M.: Mashinostroenie; 1987. 240 p. (In Russ.)]
7. Kunina P.S., Pavlenko P.P. Diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov s tsentrobezhnym nagnetatelyami. Rostov-na-Donu: Izd-vo RGU; 2011. 362 s. [Kunina P.S., Pavlenko P.P. Diagnostics of gas-pumping units with centrifugal superchargers. Rostov-on-Don: Publishing house of the Rostov State University; 2011. 362 p. (In Russ.)]
8. Shchurovskii V.A., Zaitsev Yu.A. Gazoturbinnye gazoperekachivayushchme agregaty. M.: Nedra; 1999. 191 s. [Shchurovskii V.A., Zaitsev Yu.A. Gas-turbine gas-pumping units. M.: Nedra; 1999. 191 p. (In Russ.)]
9. Gazoperekachivayushchii agregat GPA – 16R «Ufa» Rukovodstvo po ekspluatatsii, 911.00.00.00.000 RE 0 LU, Kniga 1 «Tekhnicheskoe opisanie i rabota». [Gas-pumping unit GPA-16R «Ufa». Operation manual, 911.00.00.00.000 RE 0 LU, Book 1 «Technical description and work». (In Russ.)]
10. Ekspluatatsiya kompressornykh stantsii magistral'nykh gazoprovodov. Spravochnik. M.: Neft' i gaz; 1999. [Operation of compressor stations of main gas pipelines. Reference book. M.: Neft' i gaz; 1999. (In Russ.)]
11. Shchurovskii V.A i dr. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh raschetov pri ispytaniyakh gazoturbinnnykh, gazoperekachivayushchikh agregatov PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ;1999. [Shchurovskii V.A et al. Methodological instructions for carrying out thermal and gas-dynamic calculations for testing gas turbine and gas-pumping units PR 51-31323949-43-99. VNIIGAZ;1999. (In Russ.)]
12. Shchurovskii V.A., Sal'nikov S.Yu., Bartsev I.V. i dr. Katalog gazodinamicheskikh kharakteristik TsBK prirodnogo gaza. VNIIGAZ; 2005. [Shchurovskii V.A., Sal'nikov S.Yu., Bartsev I.V. et al. Catalogue of Gas Dynamic Characteristics of the CSC of Natural Gas. VNIIGAZ; 2005. (In Russ.)]
13. Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. Svoistva gazov i zhidkosti: Spravochnik posobie (Pod redaktsiei B.I. Sokolova). L.: Khimiya; 1982. 592 s. [Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. Properties of Gases and Liquids: A Reference Manual (Edited by B.I. Sokolov). L.: Khimiya; 1982. 592 p. (In Russ.)]
14. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rindergiille und die Bestimmung der mogenital von Giille. Dtsch. Agrartechn. 1969; B.12(7).
15. Amso is the only pump we can use in our speeded up production system. Pit and Quarry. 2015;48:11.
16. Jetsboost pumping capacity. Pocr. Products. 2010;49(10).
17. Zinre R. Homogenisierungsverfahren fiir Rindergiille und die Bestimmung der mogenital von Giille. Dtsch. Agrartechn. 2016; B.12(7).
18. Allott D. Farm Building Digest. 2017;9.
19. Norcr LANDBRUR. 2016;26(10):263.
20. Farm Industry News. 2017;6(3):36.
21. Zaritskii S.A. Diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov gazoturbinnymi privodami. M.: Nedra; 2016. [Zaritskii S.A. Diagnosis of gas pumping units by gas turbine drives. M.: Nedra; 2016. (In Russ.)]
22. Bogdanov E.A. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya. M.: Vysshaya shkola; 2006. 279 s. [Bogdanov E.A. Basics of technical diagnostics of oil and gas equipment. M.: Vysshaya shkola; 2006. 279 p. (In Russ.)]
23. Kollakot R. Diagnostika povrezhdenii. M.: Mir; 1989. 512 s. [Kollakot R. Diagnostics of damages. M.: Mir; 1989. 512 p. (In Russ.)]

Сведения об авторе.

Хурамшина Регина Азатовна – магистрант.

Information about the author.

Regina A. Khuramshina – Graduate student.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.09.2017.

Принята в печать 20.11.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 22.09.2017.

Accepted for publication 20.11.2017.

Для цитирования: Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболоидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):87-98. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98

For citation: Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of earthquake focus coordinate determination errors on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;44 (4):87-98. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОШИБОК В ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ОТ МЕТОДОВ РАСЧЕТА (СФЕР И ГИПЕРБОЛОИДОВ)

Асланов Г.К.¹, Асланов Т.Г.², Курбанмагомедов К.Д.³, Шахтарин Б.И.⁴

¹⁻²Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

³Институт системных технологий,

³367015, г. Махачкала, пр. Али-Гаджи Акушинского, 21, Россия,

⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

⁴105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,

¹⁻²e-mail: tabasik@gmail.com, ³e-mail: dimgou@mail.ru, ⁴e-mail: shakhtarin@mail.ru

Резюме: *Цель.* Статья является продолжением серии статей по анализу влияния типа используемых поверхностей второго порядка на точность определения координат эпицентра и гипоцентра землетрясения. **Метод.** Для нахождения плотности распределения вероятностей ошибок в определении гипоцентра землетрясения используются метод сфер, комбинированный метод сфер и гиперболоидов, а также метод гиперболоидов. Методы, используемые для определения координат гипоцентра, гиперболоиды, имеют меньшие ошибки по сравнению с методом сфер. Это объясняется тем, что при определении времен пробега сейсмических волн введено допущение, что прирост ошибки одинаков для разности времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам для методов, использующих гиперболоид и для разности времен прихода двух сейсмических волн к сейсмодатчику, для методов использующих сферу. **Результат.** В работе получено выражение для определения координат очага землетрясения методом гиперболоидов, а также плотности распределения вероятностей ошибок в определении гипоцентра землетрясения при расчетах по методу сфер, по комбинированному методу сфер и гиперболоидов, а также по методу гиперболоидов. Составлен график распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения при разных размещениях сейсмодатчиков и для различных значений ошибок в определении разностей времен пробега сейсмических волн. **Вывод.** Полученные зависимости имеют вид распределения ошибок, близких к распределению Коши. Всплеск в районе нуля у всех распределений получен в результате расчетов координат очага землетрясения при отсутствии ошибок в определении разности времен. Комбинированный метод гиперболоида и сферы имеет форму распределения близкую к методу гиперболы и кривую распределения в районе, близкому к нулю, схожую с методом сфер.

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

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATE
DETERMINATION ERRORS ON CALCULATION METHODS
(SPHERES AND HYPERBOLOIDS)

Gaidarbek K. Aslanov¹, Tagirbek G. Aslanov²,
Kurbanmagomed D. Kurbanmagomedov³, Boris I. Shakhtarin⁴

¹⁻²Daghestan State Technical University,
¹⁻²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

³Institute of System Technologies,
³21 Ali-Haji Akushinsky Ave., Makhachkala 367015, Russia,

⁴Bauman Moscow State Technical University,
⁴5/1 2-ya Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia,

¹⁻²e-mail: tabasik@gmail.com, ³e-mail: dimgou@mail.ru, ⁴e-mail: shakhtarin@mail.ru

Abstract. Objectives This work is a continuation of a series of articles devoted to an analysis of the effect of the utilised second-order surface types on the accuracy of determining earthquake epicentre and hypocentre coordinates. **Methods** In order to find the density of error probability distribution during the determination of earthquake hypocentres, approaches using spheres, hyperboloids, as well as combined spheres and hyperboloids, are used. The hyperboloid-based methods used for determining hypocentre coordinates have fewer errors as compared to the sphere-based method. This is explained by the fact that when determining the travel times of seismic waves, it is assumed that the error increase is the same for the difference in the seismic wave arrival times to two seismic sensors (for methods using hyperboloid), and for the difference in the arrival times of the two seismic waves to the one seismic sensor (for methods using spheres). **Results** The expression for determining the earthquake focus coordinates by the hyperboloid method, as well as the density of error probability distribution during the earthquake hypocentre determination, is obtained for calculations using the sphere method, the hyperboloid method, as well as the combined sphere and hyperboloid method. A graph for the error distribution when determining the earthquake hypocentre is obtained for different locations of seismic sensors and for various error values concerning differences in the travel times of seismic waves. **Conclusion** The obtained dependencies have the form of an error distribution close to the Cauchy distribution. A wavelet in the zero regions for all distributions was obtained as a result of calculations of the earthquake focus coordinates in the absence of errors in the determination of the time difference. The combined method of the hyperboloid and the sphere has a distribution form close to the hyperboloid method, while the distribution curve in the region close to zero is similar to the sphere method.

Keywords: earthquake, seismic sensor, error, equation, hyperboloid, sphere, probability distribution density

Введение. В настоящее время разработаны программы [6-9], позволяющие по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек [10-12], времени суток и т.д. оценить людские потери [13], что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов. Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности, в основном, из-за неверного определения глубины очага и эпицентра землетрясения [14-20].

Определение координат очага землетрясения, в основном, производится по разности времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн на разнесенные в пространстве сейсмодатчики [21-22]. При этом основную ошибку в определении координат очага землетрясения вносит неверный выбор сейсмодатчиков [1-2, 19, 22-23].

В работе получены плотности распределения вероятностей ошибок в определении гипо-

центра землетрясения при расчетах по методу сфер [3], по комбинированному методу сфер и гиперboloидов [2 - 4], а также по методу гиперboloидов.

Постановка задачи. Для нахождения плотности распределения вероятностей ошибок в определении гипоцентра землетрясения используются метод сфер, комбинированный метод сфер и гиперboloидов, а также метод гиперboloидов. Во всех методах для определения гипоцентра землетрясения в качестве исходных данных используются значения скоростей поперечной и продольной сейсмических волн [21]. Кроме скоростей сейсмических волн, в методе сфер используются значения разностей времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн на сейсмодатчики, в комбинированном методе сфер и гиперboloидов используются разности времен прихода продольной и поперечной волн на опорный сейсмодатчик и разность времен прихода продольной волны к двум разнесенным сейсмодатчикам, а в методе гиперboloидов используется разность времен прихода продольной волны к каждой паре из четырех сейсмодатчиков.

Во всех рассматриваемых методах задается ошибка в определении разностей времен. По исходным данным, с учетом ошибок в определении разностей времен и без них, определяются глубины и эпицентры землетрясения. Разность значений глубин и эпицентров землетрясения определяют невязку.

Методы исследования. В работе [3] получена формула, позволяющая вычислить координаты очага землетрясения методом сфер:

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

где X, Y, Z – координаты гипоцентра землетрясения;

X_i, Y_i – координаты соответственно второго и третьего сейсмодатчика;

R_i – радиусы сфер, в центрах которых расположены сейсмодатчики с радиусами равными расстоянию до гипоцентра землетрясения, которые определяются формулой $R_i = t_i V_1 V_2 / (V_2 - V_1)$;

V_1, V_2 – скорости соответственно поперечной и продольной волны;

t_i – разность времен прихода сейсмических волн к сейсмодатчику.

В свидетельстве на государственную регистрацию программы ЭВМ [4] приведена формула, позволяющая вычислить координаты очага землетрясения комбинированным методом сфер и гиперboloида:

$$\begin{cases} X = \frac{X_2^2 (V_1 - V_2) - t_r^2 V_1^2 (V_1 - V_2) - 2t_r t_1 V_1^2 V_2}{2X_2 (V_1 - V_2)} \\ Y = \frac{(X_3 - X)^2 + Y_3^2 + R_1^2 - X^2 - R_3^2}{2Y_3} \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2} \end{cases}$$

где t_r – разность времен прихода продольной сейсмической волны к двум сейсмодатчикам.

Следует отметить, что в приведенных двух формулах расчета гипоцентра, первый сейсмодатчик принят за опорный и расположен в начале координат, а при комбинированном методе, считается, что второй сейсмодатчик расположен на оси абсцисс.

Задавая ошибку в определении разности времен прихода сейсмических волн можно определить координаты гипоцентра с учетом ошибки.

Разность координат очага землетрясения, вычисленная с учетом ошибок в измерении времен прихода сейсмических волн и без них, позволяет определить зависимость ошибки в определении гипоцентра землетрясения от значений ошибок в измерении разностей времен прихода сейсмических волн.

В этом случае ставится задача, получить выражение для определения координат очага землетрясения методом гипербол.

На рис.1 приведено пространственное расположение координат сейсмодатчиков и очага землетрясения. На рис. 1а приведено расположение четырех сейсмодатчиков D_i и эпицентра землетрясения O' с видом сверху.

На рис. 1б приведена косоугольная проекция для двух сейсмодатчиков и очага землетрясения, где буквой O обозначен очаг землетрясения.

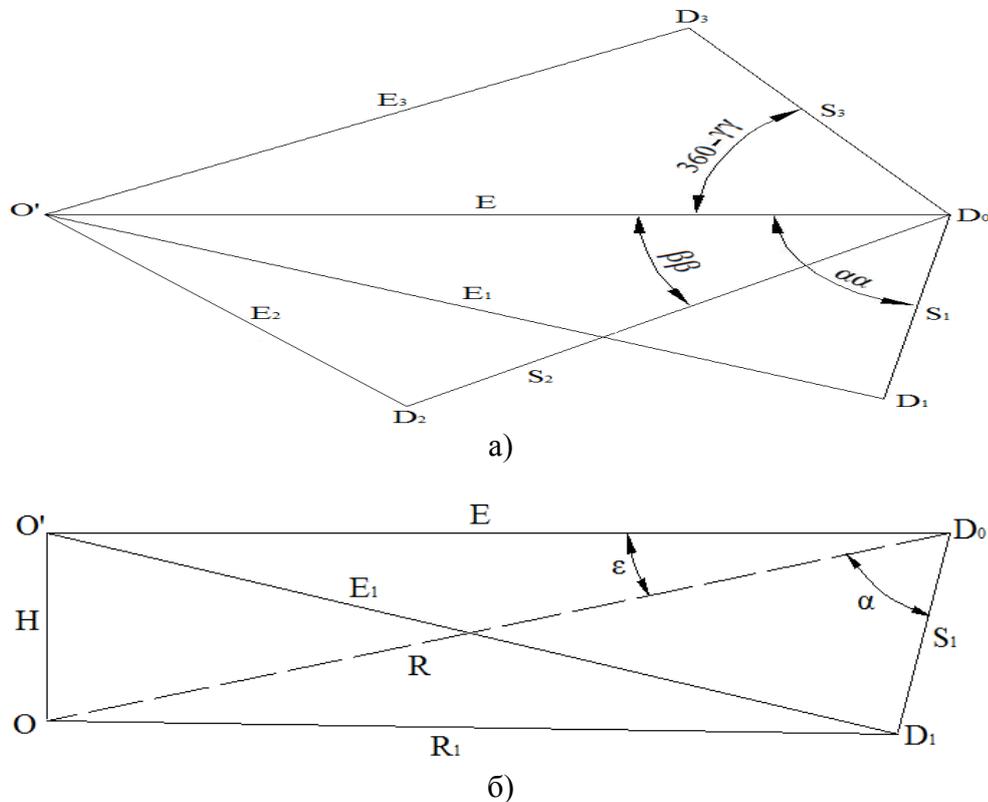


Рис.1. Пространственное расположение сейсмодатчиков и очага землетрясения
Fig.1. Spatial location of seismic and earthquake sources

По теореме Пифагора имеем:

$$H^2 + E^2 = R^2; \quad (1)$$

$$H^2 + E_1^2 = R_1^2; \quad (2)$$

где H – глубина очага землетрясения;

E_i – расстояния от эпицентра землетрясения O' до сейсмодатчиков D_i ;

R_i – расстояния от очага землетрясения O до сейсмодатчиков D_i .

По теореме косинусов получим:

$$S_1^2 + R^2 - 2S_1R \cos \alpha = R_1^2;$$

$$S_1^2 + E^2 - 2S_1E \cos \alpha\alpha = E_1^2$$

где S_i – расстояния между опорным сейсмодатчиком D_0 и остальными сейсмодатчиками;

α – угол, образованный между очагом землетрясения и первым сейсмодатчиком с вершиной, в точке расположения опорного сейсмодатчика;

$\alpha\alpha$ – угол, образованный между эпицентром землетрясения и первым сейсмодатчиком, с вершиной в точке расположения опорного сейсмодатчика.

Переносим в левую часть косинусы углов, получим

$$\cos \alpha = \frac{S_1^2 + R^2 - R_1^2}{2S_1R} \quad (3)$$

$$\cos \alpha\alpha = \frac{S_1^2 + E^2 - E_1^2}{2S_1E} \quad (4)$$

Подставляя уравнения (1) и (2) в уравнение(4), получим

$$\cos \alpha\alpha = \frac{S_1^2 + R^2 - R_1^2}{2S_1\sqrt{R^2 - H^2}} \quad (5)$$

Определим расстояние R_1 через расстояние R и разности расстояний ΔR_1 , из уравнений (3) и (5)

$$\cos \alpha = \frac{S_1^2 + \Delta R_1(2R - \Delta R_1)}{2S_1R} \quad (6)$$

$$\cos \alpha\alpha = \frac{S_1^2 + \Delta R_1(2R - \Delta R_1)}{2S_1\sqrt{R^2 - H^2}} \quad (7)$$

Разделим уравнение (6) на уравнение (7), получим

$$\frac{\cos \alpha}{\cos \alpha\alpha} = \sqrt{1 - H^2/R^2} \quad (8)$$

Произведя замену в уравнении (8) H/R на $\sin \varepsilon$, после некоторых преобразований получим

$$\cos \alpha = \cos \alpha\alpha \cos \varepsilon \quad (9)$$

где ε – угол, образованный между эпицентром и гипоцентром землетрясения с вершиной угла, в точке расположения опорного сейсмодатчика

Аналогично, получим уравнения и для углов β и γ

$$\cos \beta = \cos \beta \cos \varepsilon \quad (10)$$

$$\cos \gamma = \cos \gamma \cos \varepsilon \quad (11)$$

Уравнение гиперболы, с фокусами в точках расположения опорного и первого сейсмодатчиков в полярной системе координат имеет вид [2]:

$$R = \frac{S_1^2 - (\Delta t_1 V_1)^2}{2\Delta t_1 V_1 + 2S_1 \cos \alpha} \quad (12)$$

где V_1 – скорость продольной сейсмической волны;
 Δt_1 – разность времен прихода продольной сейсмической волны к опорному и первому сейсмодатчику.

Задача определения местоположения объекта на плоскости решена в [2], для перехода в трехмерное пространство произведем подстановку уравнений (9) – (11) в уравнения гипербол, образованных опорным и остальными тремя сейсмодатчиками, при этом, произведя замену $\Delta t_i V_i$ на разность расстояний S_i , получим

$$R = \frac{S_1^2 - \Delta S_1^2}{2(\Delta S_1 + S_1 \cos \alpha \cos \varepsilon)} \quad (13)$$

$$R = \frac{S_2^2 - \Delta S_2^2}{2(\Delta S_2 - S_2 \cos \beta \cos \varepsilon)} \quad (14)$$

$$R = \frac{S_3^2 - \Delta S_3^2}{2(\Delta S_3 - S_3 \cos \gamma \cos \varepsilon)} \quad (15)$$

Подставим в уравнения (13) – (15) выражения $\beta \cos \varepsilon - \alpha \cos \varepsilon = \alpha \beta$ и $\gamma \cos \varepsilon - \alpha \cos \varepsilon = \alpha \gamma$, и разделим полученные уравнения на R , получим

$$R = \frac{S_1^2 - \Delta t_1^2 + 2S_1 \cos \alpha \alpha E}{2\Delta t_1} \quad (16)$$

$$R = \frac{S_2^2 - \Delta t_2^2 + 2S_2 \cos(\alpha \beta + \alpha \alpha) E}{2\Delta t_2} \quad (17)$$

$$R = \frac{S_3^2 - \Delta t_3^2 + 2S_3 \cos(\alpha \gamma + \alpha \alpha) E}{2\Delta t_3} \quad (18)$$

Перенесем в левую часть уравнения (16) расстояние до эпицентра E , и подставим полученное выражение в уравнения (17) и (18).

$$E = \frac{2\Delta t_1 R - S_1^2 + \Delta t_1^2}{2S_1 \cos \alpha}$$

$$R = \frac{S_2^2 S_1 - \Delta t_2^2 S_1 + S_2 (\cos \alpha \beta + \sin \alpha \beta \tan \alpha \alpha) (2 \Delta t_1 R - S_1^2 + \Delta t_1^2)}{2 \Delta t_2 S_1} \quad (19)$$

$$R = \frac{S_3^2 S_1 - \Delta t_3^2 S_1 + S_3 (\cos \alpha \gamma + \sin \alpha \gamma \tan \alpha \alpha) (2 \Delta t_1 R - S_1^2 + \Delta t_1^2)}{2 \Delta t_3 S_1} \quad (20)$$

Из уравнения (19) найдем угол $\tan \alpha \alpha$,

$$\tan \alpha \alpha = \frac{2 R \Delta t_2 S_1 - S_2^2 S_1 + \Delta t_2^2 S_1 - S_2 \cos \alpha \beta (2 \Delta t_1 R - S_1^2 + \Delta t_1^2)}{S_2 \sin \alpha \beta (2 \Delta t_1 R - S_1^2 + \Delta t_1^2)} \quad (21)$$

Подставив уравнение (21) в (20), после некоторых преобразований получим:

$$R = (S_1 S_2 S_3 (S_3 \sin \alpha \beta - S_2 \sin \alpha \gamma) + S_1 (\Delta t_2^2 S_3 \sin \alpha \gamma - \Delta t_3^2 S_2 \sin \alpha \beta) + S_1^2 S_3 S_2 \sin(\alpha \gamma - \alpha \beta) + \Delta t_1^2 S_3 S_2 \sin(\alpha \beta - \alpha \gamma)) / (2 \Delta t_1 S_2 S_3 \sin(\alpha \gamma - \alpha \beta) + 2 S_1 (\Delta t_3 S_2 \sin \alpha \beta - \Delta t_2 S_3 \sin \alpha \gamma)) \quad (22)$$

Уравнение (22) позволяет определить расстояние от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения. Поскольку нам известны разности времен прихода сейсмической волны к опорному и к остальным сейсмодатчикам, то можно найти расстояния от очага землетрясения и до остальных сейсмодатчиков:

$$R_1 = \Delta t_1 V_1 + R; R_2 = \Delta t_2 V_1 + R; R_3 = \Delta t_3 V_1 + R;$$

Для проведения сравнительного анализа с результатами работ [3-5] необходимо определить координаты очага методом гипербол в декартовых координатах.

Для этого воспользуемся формулой, приведенной в работе [3]:

$$X = \frac{R_2^2 Y_3 - Y_3 X_2^2 - Y_2^2 Y_3 + Y_2 X_3^2 + Y_3^2 Y_2 + R_1^2 Y_2 - R_3^2 Y_2 - R_1^2 Y_3}{2(Y_2 X_3 - Y_3 X_2)};$$

$$Y = \frac{R_2^2 X_3 - X_3 Y_2^2 - X_2^2 X_3 + X_2 Y_3^2 + X_3^2 X_2 + R_1^2 X_2 - R_3^2 X_2 - R_1^2 X_3}{2(X_2 Y_3 - X_3 Y_2)};$$

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

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

На рис.2 и 3 приведены нормированные плотности распределения ошибки в определении гипоцентра землетрясения. Для получения распределения производилось определение координат очага землетрясения с изменением координат сейсмодатчиков с шагом 18,75 км, также были введены преднамеренные ошибки в определении разности времен, по разности координат очагов землетрясений с ошибкой и без нее, и была получена дисперсия.

На рис.2, кривой 1 соответствует метод сфер, кривой 2 – комбинированный метод сфер и гиперболоида, а кривой 3 – метод гипербол.

При расчете производилось изменение ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от -0.5 до 0.5 с шагом 0.25 с.

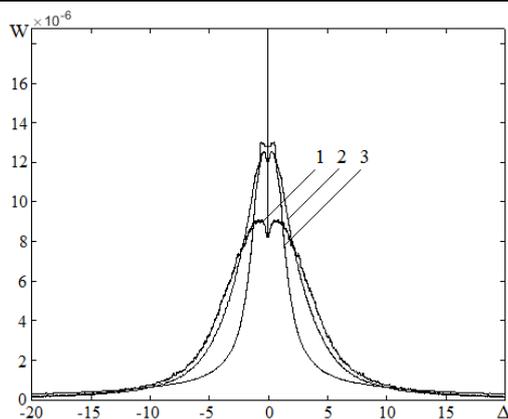
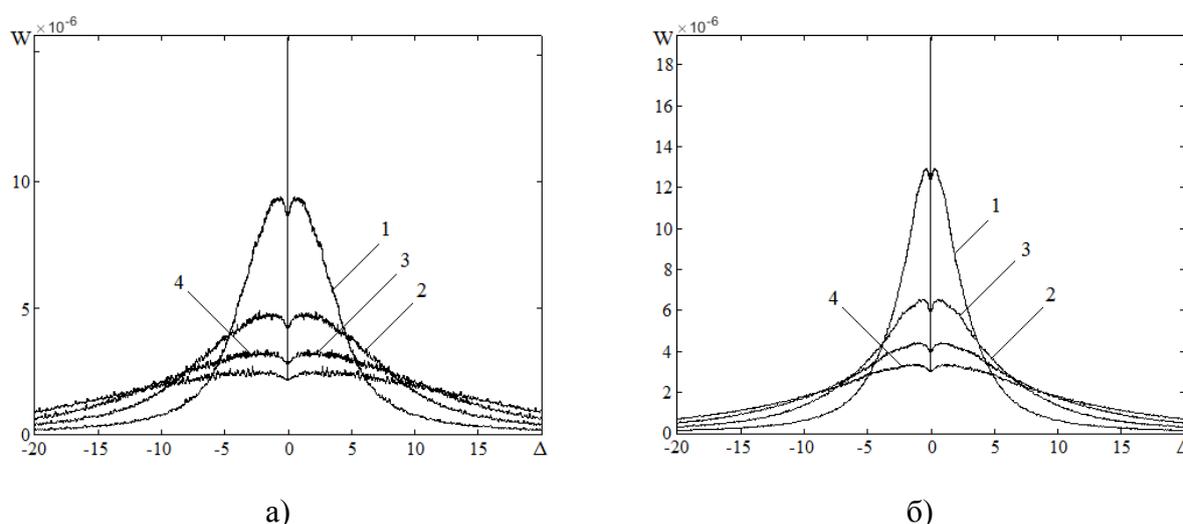


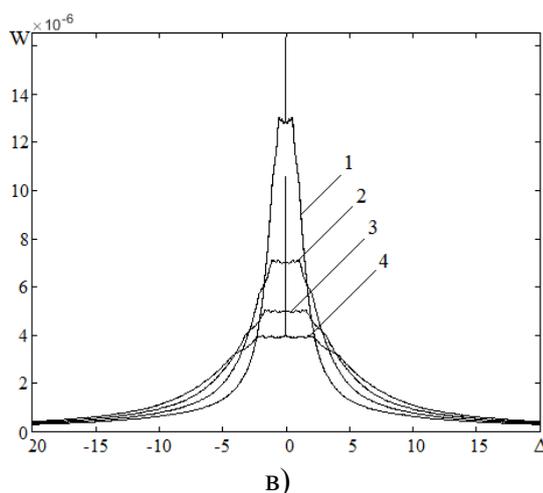
Рис.2. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами

Fig. 2. Density of error distribution in determining the hypocentre of the earthquake by three methods



а)

б)



в)

Рис. 3. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами с различными интервалами ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн

Fig. 3. Error distribution density in the determination of the earthquake hypocenter by three methods with different error intervals in determining the difference in arrival times of seismic waves

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

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

На рис. 3а приведено распределение ошибок в определении гипоцентров землетрясений методом сфер, на рис. 3б – для комбинированного метода сфер и гиперблоида и на рис. 3в – для метода гиперблоидов.

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы предложен метод определения координат очага землетрясения с использованием гиперблоидов, а также получены плотности распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения.

Из рис. 2 видно, что методы, использующие для определения координат гипоцентра гиперблоид, имеют меньшие ошибки по сравнению с методом сфер. Это объясняется тем, что при определении времен было введено допущение, что прирост ошибки одинаков для разности времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам для методов использующих гиперблоид и для разности времен прихода двух сейсмических волн к сейсмодатчику для методов, использующих сферу.

Следует отметить, что если при использовании для определения гипоцентра землетрясения разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн к одному и тому же сейсмодатчику эти волны проходят по близким трассам, то при определении координат гипоцентра по разностям времен пробега сейсмической волны к разным сейсмодатчикам, сейсмическая волна распространяется по разным трассам. Это приводит к тому, что скорости сейсмических волн на разных участках распространения различны из-за различий в структуре земных пород, что в конечном итоге приводит к более существенным ошибкам в определении разности времен.

Вывод.

1. Все полученные зависимости имеют вид распределения ошибок, близкий к распределению Коши.
2. Всплеск в районе нуля у всех распределений получен в результате расчетов координат очага землетрясения при отсутствии ошибок в определении разности времен.
3. Комбинированный метод гиперблоида и сферы имеет форму распределения, близкую к методу гиперблоида и кривую распределения в районе, близкому к нулю, схожую с методом сфер.

Библиографический список:

1. 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
2. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
3. 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.
4. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер и гиперблоида: свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017616673 Рос. Федерация / Асланов Т.Г., Давудова Д.Д., Мирзаханова Л.С.; заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). - № 2017611151; заявл. 13.02.17; опубл. 09.07.17.
5. 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.
6. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике / В.Г. Гитис, Б.В. Ермаков — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.— 256 с.

7. 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
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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.
14. 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
15. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. / И.П. Добровольский – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. —240 с.
16. Гуревич П.С. Психология чрезвычайных ситуаций учебное пособие/ П.С. Гуревич – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 495 с.
17. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография/ О.В. Мкртычев – М.: МГСУ, 2010. – 152 с.
18. 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
19. 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.
20. Rahinul H., Shoab 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
21. 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.
22. 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.
23. Асланов Г.К., Гаджиев М.М., Исмаилов Т.А., Магомедов Х.Д. О землетрясениях (прошлое и современность). – Махачкала, Информационно полиграфический центр ДГТУ. 2001.

References:

1. Aslanov T.G., Magomedov Kh.D., Musaeva U.A., Tagirov Kh.Yu. Vliyaniye prostranstvennogo raspolozheniya seismodatchikov na tochnost' opredeleniya gipotsentra zemletryaseniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki. 2016;43(4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84 [Aslanov T.G., Magomedov Kh.D., Musaeva U.A., Tagirov Kh.Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the hypocentre of an earthquake. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;43(4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84 (In Russ.)]
2. Aslanov T.G. Opredelenie koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki. 2017;44(2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125 [Aslanov T.G. Definition of earthquake focus coordinates using a combined method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(2):118-125. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125 (In Russ.)]
3. Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniem skorostey seysmicheskikh voln. Trudy institute geologii Dage-

- stanskogo nauchnogo tsentra RAN, Materialy. Makhachkala: Izdatelstvo DNTs RAN; 2010. 54-59. [Aslanov T.G., Daniyalov M.G., MagomedovKh.D., Aslanov G.K. About the method of seismic center determination with simultaneous definition of speeds of seismic waves. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Makhachkala: DSCRAS Publ.; 2010. 54-59. (In Russ.)]
4. Aslanov T.G., Davudova D.D., Mirzakhanova L.S. Opredelenie koordinat gipotsentra zemletryaseniya prii spol'zovaniy kombinirovannogo metoda sfer i giperboloida: svid. o gos. reg. progr. EVM № 2017616673 Ros. Federatsiya / zayavitel' i pravoobladatel' VGUYu (RPA MinyustaRossii). № 2017611151; zayavl. 13.02.17; opubl. 09.07.17. [Aslanov T.G., Davudova D.D., Mirzakhanova L.S. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of spheres and hyperboloid: programme state registration EVM № 2017616673 Russian Federation / applicant and owner VGUYu № 2017611151; applied 13.02.17; publ. 09.07.17. (In Russ.)]
 5. Shakhriyan'yan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoe modelirovanie kak sposob podderzhki pri nyatiyaresheniy v sluchae vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy. Katalog «Pozharnaya bezopasnost'»; 2003. S. 240-241. [Shakhriyan'yan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a method of decision-making support in case of emergency situation arising. Catalogue «Firesafety»; 2003. P. 240-241. (inRuss.)]
 6. 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 spatial-time prognosis in geoinformatics. Moscow: FIZMATLIT; 2004. 256 p. (In Russ.)]
 7. 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.
 8. Rui J., Shuanggen J. Ionosphericacousitc and rayleigh waves detected by GPS following the 2005 Mw=7.2 northern California earthquake. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. pp. 3956 – 3959.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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. 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2016. pp. 1-4.
 13. RadoutskiiV.Yu., VetrovaYu.V., Vasyutkina D.I. Opasnyeprirodnyprotsessy: uchebnoeposobie (Pod red. V.Yu. Radoutskogo). Belgorod: Izd-vo BGTU; 2013. 206 s. [RadoutskiiV.Yu., VetrovaYu.V., Vasyutkina D.I. Dangerous natural processes: a manual (Edited by V.Yu. Radoutskii). Belgorod: Izd-vo BGTU; 2013. 206 p. (In Russ.)]
 14. Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Rukovodstvo po proizvodstvu i obrabotke nablyudeniyna seysmicheskikh stantsiyakh SSSR. Akad. nauk SSSR. Sovetposeysmologii. Moskva: Izd-voAkad. nauk SSSR; 1954. [Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Observation performance and processing guide on the seismic stations of USSR. USSR Academy of Sciences. Seismology Board. Moscow: Izd-voAkad. nauk SSSR; 1954. (In Russ.)]
 15. Dobrovolskii I.P. Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya. M.: FIZMATLIT; 2009. 240 s. [Dobrovolskii I.P. Mathematical theory of preparation and forecast of a tectonic earthquake. M.: FIZMATLIT; 2009. 240 p. (In Russ.)]
 16. Gurevich P.S. Psikhologiya chrezvychainykh situatsii. Uchebnoeposobie. M.: YuNITI-DANA; 2012. 495 s. [Gurevich P.S. Psychology of emergency situations. Tutorial. M.: YuNITI-DANA; 2012. 495 p. (in Russ.)]
 17. Mkrtychev O.V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniypriseysmicheskikh i avariynykhvozdeystviyakh. M.: MGSU; 2010. 152 s. [Mkrtychev O.V. Safety of buildings and constructions during seismic and emergency impacts. Moscow: MGSU; 2010. 152 p. (In Russ.)]
 18. Aslanov T.G., TagirovKh.Yu., Aslanov G.K., AlimerdenovV.Sh. Matematicheskaya model' rascheta energeticheskogo klassa, intensivnosti i magnitudy zemletryaseniya v real'nom masshtabe vremeni. VestnikDagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki. 2015;2(37):66-71. [Aslanov T.G., TagirovKh.Yu., Aslanov G.K., AlimerdenovV.Sh. Mathematical model for calculating the energy class, intensity and magnitude of an earthquake in real time. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;2(37):66-71. (In Russ.)]
 19. Aslanov T.G. Razrabotka algoritma opredeleniya koordinat ochaga zemletryaseniya, s odnovremennym opredeleniem skorostei seismicheskikh voln. Nauchnye trudy molodykh issledovatelei programmy «Shag v budushchee». Tom 8 «Professional». Moskva; 2005. P. 32-34. [Aslanov T.G. Development of an algorithm for determining the coordinates of the earthquake focus with simultaneous determination of seismic wave velocities. Proceedings of

- young scientists of the «Step into the Future2» programme. Volume 8 «Professional». Moscow; 2005. pp. 32-34. (In Russ.)]
20. Rahinul H., Shoaib H., Akter S., Asadullahil G., Tahia F. K. Earthquake monitoring and warning system. International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). 2015. pp. 109 – 112.
 21. Alphonsa A., Ravi G. Earthquake early warning system by IOT using Wireless sensor networks. International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). 2016. pp. 1201 – 1205.
 22. Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Opredelenie struktury zemli po statisticheskim dannym vremen prikhoda seismicheskikh voln proizoshedshikh zemletryaseni. Trudy III nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Start v budushchee – 2013». Sankt-Peterburg; 2013. [Aslanov T.G., Alimerdenov V.Sh. Determination of the structure of the Earth according to the statistical data of the arrival times of seismic waves of occurred earthquakes. Proceedings of the III scientific and technical conference of young scientists and specialists «Start in the future – 2013». St. Petersburg; 2013. (In Russ.)]
 23. Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. O zemletryasenyakh (proshloe i sovremenost'). Makhachkala: Informatsionno-poligraficheskii tsentr DGTU; 2001. [Aslanov G.K., Gadzhiev M.M., Ismailov T.A., Magomedov Kh.D. About earthquakes (past and present). Makhachkala: Information and printing centre of DGTU; 2001. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Тагирбекович – доктор технических наук, профессор, кафедра «Управление и информатика в технических системах и вычислительной техники».

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, докторант.

Курбанмагомедов Курбанмагомед Динмагомедович – кандидат технических наук, доцент, директор Института системных технологий.

Шахтарин Борис Ильич – доктор технических наук, профессор, кафедра «Автономные информационные и управляющие системы».

Information about the author.

Gaidarbek K. Aslanov – Dr.Sci. (Technical), Prof., Department «Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering».

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

Kurbanmagomed D. Kurbanmagomedov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Director, Institute of System Technologies.

Boris I. Shakhtarin - Dr.Sci. (Technical), Prof., Department «Autonomous Information and Control Systems».

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.09.2017.

Принята в печать 29.10.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.09.2017.

Accepted for publication 29.10.2017.

Для цитирования: Дровникова И.Г., Змеев А.А., Попов А.Д., Rogozin E.A. Методика исследования вероятностно-временных характеристик реализации сетевых атак в программной среде имитационного моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):99-113. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-99-113

For citation: Drovnikova I.G., Zmeev A.A., Popov A.D., Rogozin E.A. Methodology for investigating the probability-time characteristics of network attacks in the simulation modelling software environment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):99-113. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-99-113

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-99-113

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАЛИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ АТАК В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ИМИ- ТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Дровникова И.Г.¹, Змеев А.А.², Попов А.Д.³, Rogozin E.A.⁴

^{1,3,4} Воронежский институт МВД России,

^{1,3,4} 394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

² Военная академия воздушно-космической обороны имени

Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,

² 170022, г. Тверь, ул. Жигарева, 50, Россия,

¹ e-mail: idrovnikova@mail.ru, ² e-mail: tzmeev@yandex.ru,

³ e-mail: anton.holmes@mail.ru, ⁴ e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Резюме. Цель. Проведён анализ открытых литературных источников и нормативных документов по проблеме защиты информации в автоматизированных системах, который показал отсутствие в этих документах количественных параметров вероятностно-временных характеристик реализации сетевых атак к информационному ресурсу автоматизированных систем. К ним можно отнести среднее время нахождения сетевой атаки в одном из ее состояний, реализующие деструктивные воздействия с целью разработки эффективной модели противодействия реализуемых в системах и средствах информационной безопасности угроз. **Метод.** Одним из методов решения этой проблемы является натурный эксперимент. При реализации его на практике возникает много трудностей, а именно определение вероятностно-временных характеристик сетевых атак (если время значительно меньше секунды). Применены новые информационные технологии, к которым можно отнести и программную среду имитационного моделирования «CPNTools». **Результат.** Разработана методика определения вероятностно-временных характеристик реализации сетевых атак к информационному ресурсу автоматизированных систем (количественные величины времен реализации сетевых атак во всех состояниях формальной модели их функционирования). Предложена классификация сетевых угроз несанкционированного доступа в автоматизированных системах на основе имеющегося у Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России банка данных. **Вывод.** Выходными данными разработанной методики являются вероятностно-временные характеристики сетевых атак к информационному ресурсу автоматизированных систем, полученные в ходе имитационного моделирования в программной среде «CPNTools» в виде времени нахождения в одном из состояний реализации этих деструктивных воздействий в автоматизированных системах. Определены перспективы применения полученных результатов, связанные с повышением реальной защищенности существующих, а также разрабатываемых автоматизированных систем.

Ключевые слова: автоматизированная система, несанкционированный доступ, вероятностно-временные характеристики, система защиты информации от несанкционированного доступа, угроза, сетевая атака

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE PROBABILITY-TIME
CHARACTERISTICS OF NETWORK ATTACKS IN THE SIMULATION MODELLING
SOFTWARE ENVIRONMENT

*Irina G. Drovnikova*¹, *Anatoly A. Zmeev*², *Anton D. Popov*³, *Evgenii A. Rogozin*⁴

^{1,3,4} Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia,

^{1,3,4} 53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia,

² Zhukov Air and Space Defense Academy,

² 50 Zhigareva Str., Tver 170022, Russia,

¹ e-mail: idrovnikova@mail.ru, ² e-mail: tzmeev@yandex.ru,

³ e-mail: anton.holmes@mail.ru, ⁴ e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Abstract. Objectives An analysis of open access literature sources and normative documents on the problem of information protection in automated systems was carried out. This showed the absence in these documents of quantitative parameters of the probability-time characteristics of network attacks carried out on information resource of automated systems. To such parameters one can attribute the average time of a network attack in one of its states, realising destructive impacts, in order to develop an effective model for countering threats implemented in systems and information security products. **Methods** One of the methods for solving this problem is a full-scale experiment; however, in practice many difficulties arise during its implementation, namely the determination of the probability-time characteristics of network attacks (if the time is much less than a second). To solve this complex problem, it is necessary to use new information technologies, which include the CPNTools simulation modelling software environment. **Results** The methodology for determining the probability-time characteristics of network attacks carried out on the information resource of automated systems (the quantitative values of the times of the network attack at all states of the formal model of their operation) is developed. A classification of network threats comprising unauthorised access in automated systems based on the data bank of the Federal Service for Technical and Export Control of Russian Federation is proposed. **Conclusion** The output data of the methodology developed in the article are the probability-time characteristics of network attacks carried out on the information resource of automated systems. This data was obtained during the simulation using CPNTools software environment in the form of the residence time (realisation) in one of the realisation states of these destructive effects in automated systems. The main aspects of the obtained results are analysed and prospects for their future use, connected with the increase of real security of existing, as well as developed, automated systems, are outlined.

Keywords: automated system, unauthorised access, probability-time characteristics, system of information protection from unauthorised access, threat, network attack.

Введение. В настоящее время при эксплуатации автоматизированных систем (АС) на первый план выходят вопросы, связанные с повышением надёжности их функционирования как существующих, так и перспективных (разрабатываемых) АС. В качестве одного из основных негативных факторов, влияющего на функционирование этих систем можно назвать факт, связанный с несанкционированным доступом (НСД) злоумышленника к информационному ресурсу АС, который в целом непосредственно влияет на уровень защищённости [1]. Поэтому вопросы, связанные с научными исследованиями в области защиты информационного ресурса АС являются весьма актуальными.

Анализ нормативных документов Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России (ФСТЭК) показал [2-10], что вопросы, связанные сполучением количественных характеристик времени реализации угроз в АС проработаны в недостаточном объеме. Данные характеристики в частности необходимы:

- при разработке АС в защищённом исполнении;
- при сертификации систем защиты информации (СЗИ) от НСД (нормативные документы при сертификации СЗИ);
- при формировании требований средствам и системам информационной безопасности (ИБ) в АС.

Постановка задачи. Для исследований реализаций угроз НСД, с целью получения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) в АС, необходимо разработать соответствующую методику. Для этого необходимо:

1. Провести классификацию угроз НСД в АС;
2. Выбрать типовые, наиболее распространённые атаки к информационному ресурсу АС, которые способствуют реализации угроз НСД;
3. Разработать вербальные (описательные) модели реализации сетевых атак на информационный ресурс АС, для создания формальной модели функционирования дестабилизирующих воздействий в виде ориентированного графа;
4. Используя программную среду CPNTools необходимо запрограммировать каждую графовую модель реализации сетевых атак в АС и провести имитационное моделирование.
5. По результатам имитационного моделирования в программной среде имитационного моделирования CPNTools представить результирующие таблицы каждой из сетевых атак.
6. Привести в качестве практического примера использование полученных результатов в виде ВВХ сетевых атак к информационному ресурсу АС, которые станут основой для формирования требований к СЗИ от НСД при использовании генетического алгоритма (ГА) [8]. Используя возможности пакета прикладных программ Matlab 2013, который содержит в своем составе библиотеку со встроенными ГА.

Метод исследования. Для исследования необходимо провести классификацию угроз НСД к информационному ресурсу АС, связанные непосредственно с человеческим фактором, к которым можно отнести и сетевые атаки. Анализ [9] позволил представить классификационную схему угроз НСД к информационному ресурсу АС в виде, показанном на рис. 1.



Рис.1 Классификационная схема угроз НСД к информационному ресурсу АС
Fig. 1 Classification scheme of threats to the information resource AS

Непреднамеренные угрозы представляют собой ошибки, обусловленные человеческим фактором, а также к ним можно отнести и влияние окружающей среды. Преднамеренные угрозы непосредственно реализуются злоумышленниками и нацелены на совершение противоправных (незаконных) действий к информационному ресурсу АС, целью которых является нарушение таких свойств информации, как конфиденциальность, целостность и доступность, а также нарушение надежности функционирования АС в целом.

Преднамеренные угрозы довольно полно представлены в банке данных главного законодателя страны в области ИБ ФСТЭК России по адресу bdu.fstec.ru [11].

Следует отметить, что существующий банк данных постоянно пополняется; сотрудники ФСТЭК исследуют как альтернативные базы, так и ресурсы крупных компаний производителей. Можно сказать, что данный перечень угроз представляет собой более полную картину относительно имеющихся классификаций, и охватывает все актуальные аспекты в области ИБ АС. В исследуемом банке данных на данный момент имеется 207 угроз НСД. Анализ имеющейся информации по угрозам в банке данных показал, что более одной трети от общего количества угроз, а именно 74, занимают угрозы, связанные с сетевым воздействием на информационные ресурсы АС, что требует наиболее тщательного исследования. Данный вид угроз ИБ в АС направлен на следующие объекты воздействия: сетевой трафик; системное программное обеспечение; прикладное программное обеспечение; сетевое программное обеспечение; виртуальная машина; информационная система; микропрограммное обеспечение; объекты файловой системы; сетевой узел; аппаратное обеспечение; рабочая станция.

Сетевые угрозы реализуются злоумышленниками в виде сетевых атак на информационные ресурсы АС. Данным деструктивным воздействиям подвержены различные организации, эксплуатирующие АС, такие как коммерческие, государственные, военные и другие структуры. Поэтому проблема защиты информационного ресурса АС принимает федеральный уровень.

Злоумышленники используют все более изощренные методы воздействия на информационные ресурсы, тем самым подвергая предприятия, эксплуатирующие АС, например, к финансовым потерям. Поэтому в соответствии в [2] необходимо на начальных стадиях разработки АС предусмотреть возможную реализацию сетевых атак.

К основным ВВХ сетевых атак можно отнести среднее время нахождения в одном из состояний графовой модели, формально описывающую их реализацию в АС.

С целью получения количественных значений ВВХ сетевых атак в АС необходимо использовать программную среду имитационного моделирования «CPNTools», которая представляет собой мощный инструмент для анализа и моделирования сетей различного уровня сложности, к которым можно отнести цветные сетей Петри и временные сетей Петри [12-14].

Деструктивные воздействия могут реализовываться разными способами, основными этапами которых являются сбор информации, реализация атаки и ее завершение, заключающиеся в уничтожении следов.

Обсуждение результатов. Рассмотрим типовые, наиболее распространенные сетевые атаки.

«Сниффинг пакетов». Данный вид атаки, относится к пассивным и часто используется при подготовке к активным сетевым атакам, которые возможны в том случае, если в сети установлены концентраторы, при использовании которых пакеты внутри сети рассылаются широковещательным способом, а компьютер, при получении пакета, принимает решение о его принадлежности.

В случае если злоумышленнику удастся получить доступ к машине, находящейся в такой сети, то ему станет доступна абсолютно вся передаваемая информация. Ему будет достаточно перевести сетевую карту в «неразборчивый режим», в котором компьютер принимает все входящие пакеты, вне зависимости принадлежат они ему или нет.

Данный вид атак может быть реализован при помощи специального программного обеспечения – пакетного сниффера, который захватывает все сетевые пакеты, на которые направлена атака. В дальнейшем полученные сниффером данные могут быть использованы для НСД к информационному ресурсу АС. На рис. 2 приведена графовая модель, показывающая основные

этапы реализации сетевой атаки «сниффинг пакетов» на информационный ресурс АС [15-16].

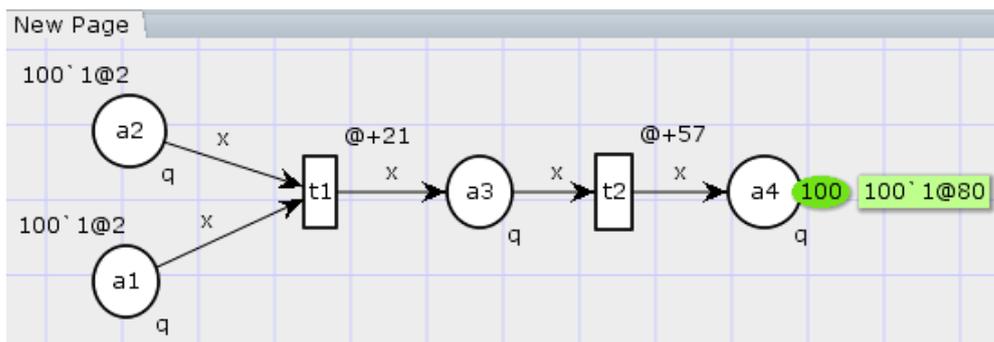


Рис.2. Графовая модель сетевой атаки «сниффинг пакетов»
Fig.2. Graph model of network attack «packet sniffing»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.1.

Соотношение машинного времени к реальному времени во всех графовых моделях будет представлено, как 1 ед. = 0,001 с.

Результирующие таблицы, полученные при помощи программной среды CPNTools, имеют следующие поля: Name – имя позиции, Count – счетчик проходов по графу, начиная с 0, Sum – суммарное количество попадания маркера в конкретную позицию, Avg – среднее значение, но в контексте данной имитационной задачи, так как маркер в сети один, будет являться вероятностью попадания маркера в позицию, Min – минимальное количество маркеров в позиции, Max – максимальное количество маркеров в позиции, TimeAvg – среднее время пребывания маркера в позиции.

Таблица 1. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «сниффинг пакетов»

Table 1. Results of simulation simulation in the CPNTools network environment «packet sniffing»

Timedstatistics					
Name	Count	Avg	Min	Max	TimeAvg
Marking_size_New_Page'a1_1	102	8.695652	0	100	2
Marking_size_New_Page'a2_1	102	8.695652	0	100	2
Marking_size_New_Page'a3_1	202	91.304348	0	100	21
Marking_size_New_Page'a4_1	102	0.000000	0	100	57

Атака «сканирование сети» выполняется в разведывательных целях.

С ее помощью злоумышленнику становится известна информация о структуре сети и сервисах, имеющихся в данной сети. Для ее реализации необходимо просканировать сеть при помощи специального программного обеспечения, предназначенного для сбора информации. Первоочередным необходимо установить параметры сканирования и произвести последовательный опрос всех хостов в указанном диапазоне IP-адресов в многопоточном режиме при помощи ICMP-эхо-запросов. При рассылке недопустимых ICMP или TCP пакетов, злоумышленник сможет определить тип операционной системы и программное обеспечение, установленное на целевых компьютерах. В результате чего будет получен доступ к информации о размещенных в сканируемой сети сервисах и хостах [14].

На рис. 3 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «сканирование сети» на информационный ресурс АС [14,17-18].

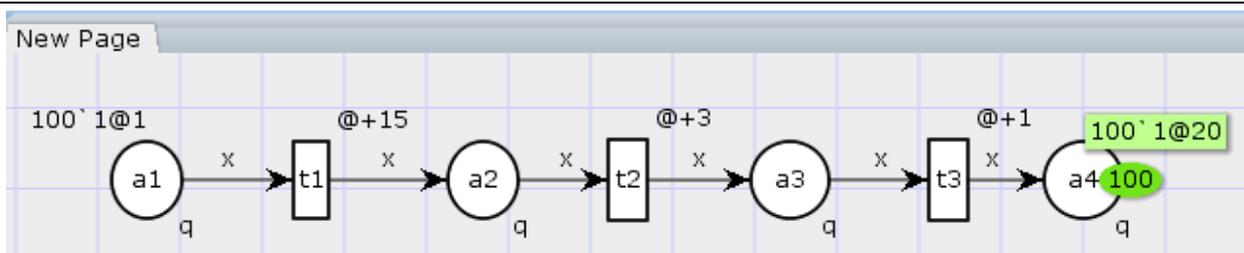


Рис.3. Графовая модель сетевой атаки «сканирование сети»

Fig.3. The graph model of network attack «network scanning»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.2.

Таблица 2. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «сканирование сети»

Table 2. Results of simulation simulation in the CPNTools network attack environment «network scanning»

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a2_1	202	45.833333	0	100	16
Marking_size_New_Page'a3_1	202	45.833333	0	100	3
Marking_size_New_Page'a4_1	202	54.166667	0	100	1

Сетевая атака «отказ в обслуживании», известна, как SYN- или TCP-flood, и DoS атаки. Основной задачей такой атаки является отказ в обслуживании.

Злоумышленник начинает одновременно посылать огромное количество SYN-пакетов с разных IP-адресов на целевой хост. Атакуемая цель при получении такого пакета формирует ответ и одновременно резервирует место в буфере для еще одного пакета, задача которого завершить соединение.

В результате, через некоторый промежуток времени, буфер переполняется, а реальные пользователи получают отказ при попытке подключиться к такому хосту, что, в конечном счете, может привести к нарушению одного из свойств информации (доступности).

На рис. 4 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «отказ в обслуживании» на информационный ресурс AC [14,17-18].

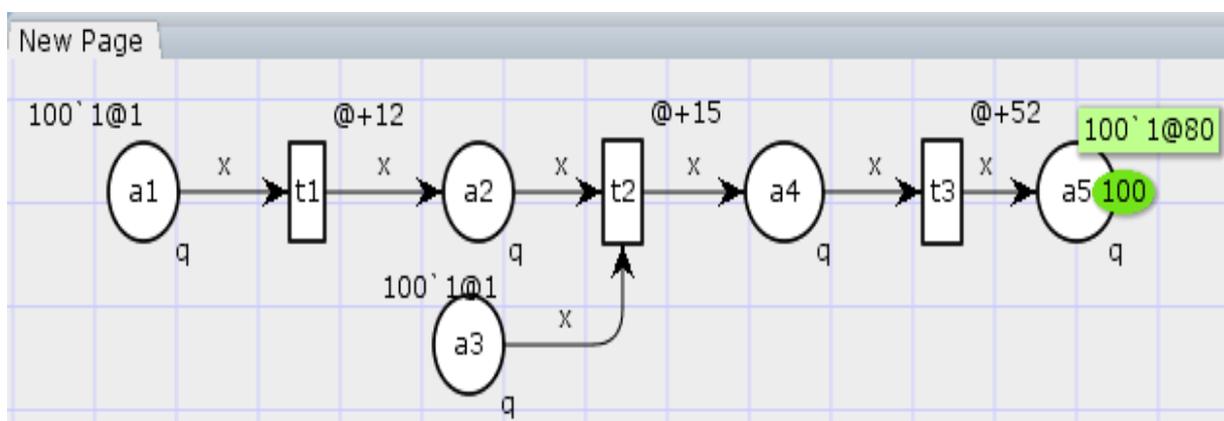


Рис.4. Графовая модель сетевой атаки «отказ в обслуживании»

Fig.4. The graph model of network attack «denial of service»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.3.

Таблица 3. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «отказ в обслуживании»
Table 3. Results of simulation simulation in the CPNTools software environment of the network denial-of-service attack

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	102	3.571429	0	100	1
Marking_size_New_Page'a2_1	202	42.857143	0	100	12
Marking_size_New_Page'a3_1	102	46.428571	0	100	1
Marking_size_New_Page'a4_1	202	53.571429	0	100	15
Marking_size_New_Page'a5_1	102	0.000000	0	100	52

«ARP-spoofing». Для осуществления данного типа атаки, злоумышленник должен получить доступ к компьютеру, подключенному к сети, а также к специальному программному обеспечению. Проводится необходимая настройка программного обеспечения для сканирования сети с целью выявления соответствия MAC-адресов с IP-адресами хостов. Затем происходит перехват трафика между целевыми хостами с последующей подменой таблиц MAC-адресов и ожидание подключения к удаленному хосту для получения имени пользователя и пароля. На рис.5 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «ARP-spoofing» на информационный ресурс AC [14,19].

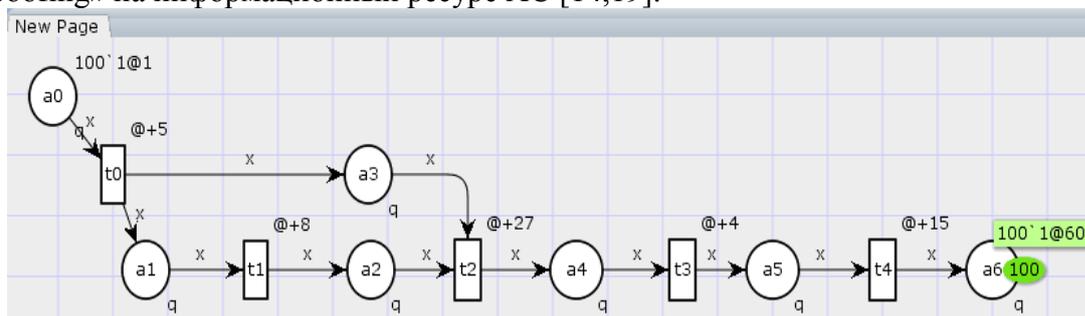


Рис.5. Графовая модель сетевой атаки «ARP-spoofing»

Fig.5. The graph model of the network attack «ARP-spoofing»

Результаты имитационного моделирования данной атаки представлены в табл.4.

Таблица 4. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «ARP-spoofing»
Table 4. Results of simulation in the software environment CPNTools network attack «ARP-spoofing»

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	11.111111	0	100	6
Marking_size_New_Page'a2_1	202	17.777778	0	100	8
Marking_size_New_Page'a3_1	202	28.888889	0	100	6
Marking_size_New_Page'a4_1	202	60.000000	0	100	27
Marking_size_New_Page'a5_1	202	8.888889	0	100	4
Marking_size_New_Page'a6_1	102	0.000000	0	100	15

Сетевая атака «подмена доверенного объекта сети» (IP-spoofing).

Для реализации данной атаки злоумышленнику необходимо сформировать пакеты с ложным обратным адресом. Он отправляет такой пакет атакуемому хосту, таким образом переключая на свой компьютер соединение, установленное с другим компьютером, сохраняя при этом право доступа того пользователя, соединение с которым было разорвано.

Знание конкретной реализации набора протоколов TCP/IP позволяет предсказать значение поля-счетчика, предназначенного для идентификации сообщения. Так, с помощью посылки нескольких десятков пакетов с последующим их анализом, можно определить алгоритм, используемый для установки значения счетчиков. На рис. 6 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «IP-spoofing» на информационный ресурс АС [14,19].

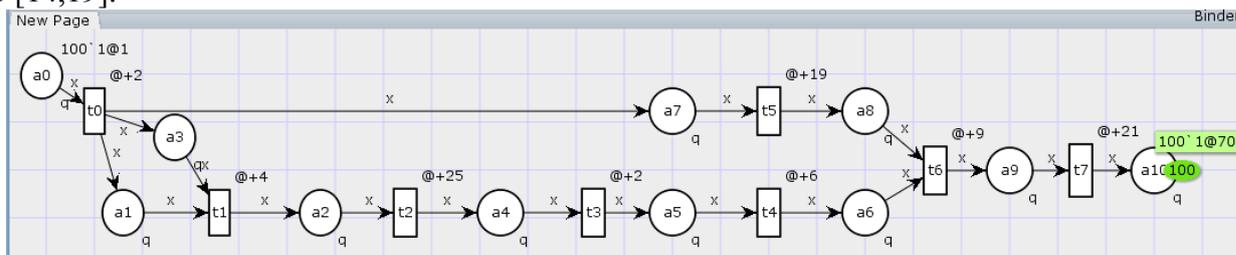


Рис.6. Графовая модель сетевой атаки «IP-spoofing»
Fig.6. The graph model of the network attack "IP-spoofing"

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.5.

Таблица 5. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «IP-spoofing»

Table 5. Results of simulation simulation in the CPNTools software environment «IP-spoofing»

Timedstatistics					
Name	Count	Avg	Min	Max	TimeAvg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	4.081633	0	100	3
Marking_size_New_Page'a2_1	202	8.163265	0	100	4
Marking_size_New_Page'a3_1	202	4.081633	0	100	3
Marking_size_New_Page'a4_1	202	51.020408	0	100	25
Marking_size_New_Page'a5_1	202	4.081633	0	100	2
Marking_size_New_Page'a6_1	202	12.500000	0	100	6
Marking_size_New_Page'a7_1	202	4.081633	0	100	3
Marking_size_New_Page'a8_1	202	77.083333	0	100	19
Marking_size_New_Page'a9_1	202	18.750000	0	100	9
Marking_size_New_Page'a10_1	102	0.000000	0	100	21

Сетевая атака «перехват TCP-сессии» (IP-hijacking). Реализация данного типа атаки возможна, если у злоумышленника имеется доступ к машине, находящейся на пути сетевого потока, а также при обладании достаточными правами для генерации и перехвата пакетов.

При передаче пакетов, всегда используются два 32-битных поля-счетчика, значение которых проверяются и сервером, и клиентом. Имеется возможность ввести соединение в состояние, при котором, значения счетчиков, отправляемых сервером, не будут соответствовать значениям, которые ожидает клиент и наоборот. В таком случае становится связующим звеном

между сервером и клиентом. Такое положение дает ему возможность обхода СЗИ от НСД с одноразовыми паролями.

На рис.7 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «IP-hijacking» на информационный ресурс АС [14,19].

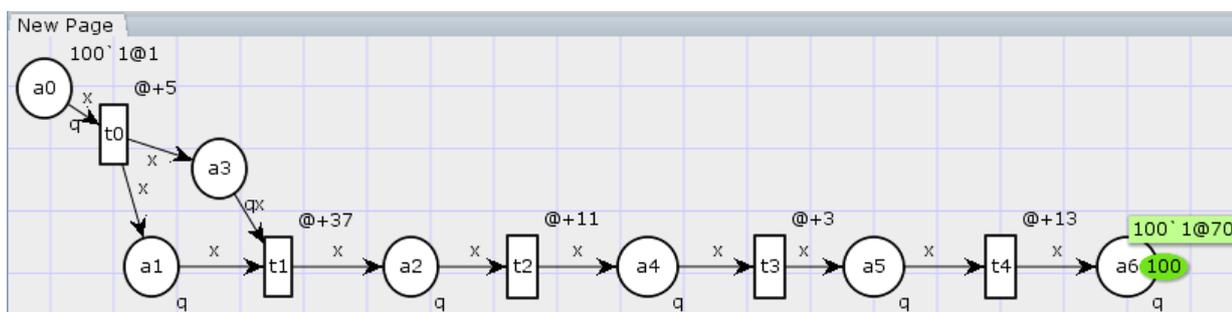


Рис.7. Графовая модель сетевой атаки «IP-hijacking»

Fig.7. Graph model of network attack «IP-hijacking»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.6.

Таблица 6. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «IP-hijacking»

Table 6. Results of simulation simulation in the CPNTools network environment «IP-hijacking» software environment

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	8.928571	0	100	6
Marking_size_New_Page'a2_1	202	66.071429	0	100	37
Marking_size_New_Page'a3_1	202	8.928571	0	100	6
Marking_size_New_Page'a4_1	202	19.642857	0	100	11
Marking_size_New_Page'a5_1	202	5.357143	0	100	3
Marking_size_New_Page'a6_1	102	0.000000	0	100	13

Сетевая атака «Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута».

Для реализации данной атаки следует подготовить ICMPRedirectHost сообщение, с указанием конечного IP-адреса и IP-адреса ложного маршрутизатора. Затем это сообщение отправляется атакуемому от имени маршрутизатора при помощи указания в поле адреса отправителя IP-адрес маршрутизатора. Имеются два варианта проведения данной удаленной атаки.

В первом случае злоумышленник находится в той же сети, что и атакуемый. Так, атакующий имеет возможность изменить маршрут передачи пакетов, что позволит получить доступ к передаваемой информации. Далее, полученная информация анализируется злоумышленником, а пакеты передаются дальше.

Во втором случае злоумышленник и атакуемый находятся в разных сетях. При такой разновидности атаки, злоумышленнику не удастся получить доступ к передаваемой информации, но у него получится нарушить работоспособность атакуемого хоста, так как связь между данным хостом и указанным в ICMP-сообщении сервером будет нарушена.

На рис.8 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута» на информационный ресурс АС [14,19].

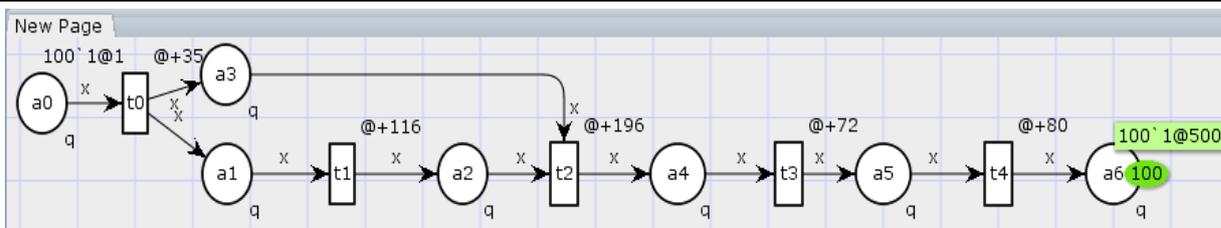


Рис.8. Графовая модель сетевой атаки «Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута»

Fig.8. The graph model of the network attack «The introduction of a false object into the network by imposing a false route»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.7.

Таблица 7. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута»
Table 7. Results of simulation simulation in the CPNTools software environment of the network attack «Introduction of a false object into the network by imposing a false route»

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	8.333333	0	100	36
Marking_size_New_Page'a2_1	202	27.619048	0	100	116
Marking_size_New_Page'a3_1	202	35.952381	0	100	36
Marking_size_New_Page'a4_1	202	46.666667	0	100	196
Marking_size_New_Page'a5_1	202	17.142857	0	100	72
Marking_size_New_Page'a6_1	102	0.000000	0	100	80

Сетевая атака «Межсегментное внедрение ложного DNS-сервера».

При реализации этой атаки злоумышленник не имеет возможности получать запрос атакуемого хоста к подлинному DNS-серверу. При реализации данной атаки необходимо определить номер порта, с которого посылается запрос, с последующим подбором идентификатора запроса.

На рис. 9 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута» на информационный ресурс АС [14].

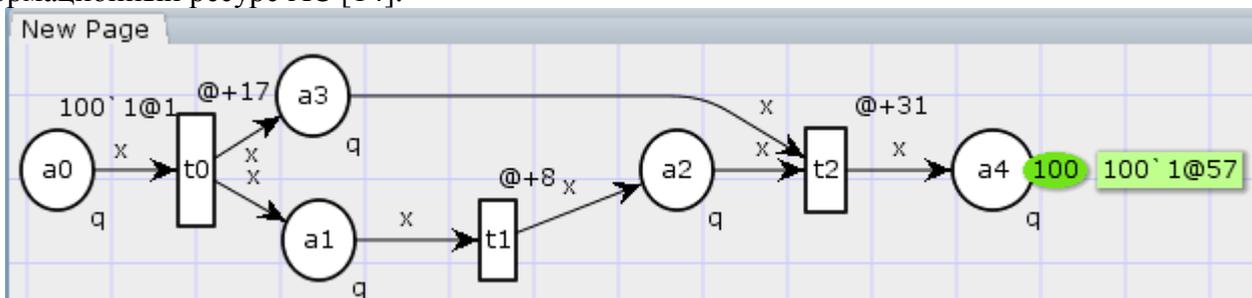


Рис.9. Графовая модель сетевой атаки «Межсегментное внедрение ложного DNS-сервера»
Fig.9. The graph model of the network attack «Intersegment implementation of a false DNS server»

При использовании программной среды CPNTools проведено имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.8.

Таблица 8. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «Межсегментное внедрение ложного DNS-сервера»
Table 8. Results of simulation simulation in the CPNTools software environment of the network attack «Intersegment implementation of a false DNS server»

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	65.384615	0	100	18
Marking_size_New_Page'a2_1	202	30.769231	0	100	8
Marking_size_New_Page'a3_1	202	96.153846	0	100	18
Marking_size_New_Page'a4_1	102	0.000000	0	100	31

Сетевая атака «Внедрение ложного DNS-сервера».

При осуществлении данной атаки, злоумышленником перехватывается запрос атакуемого хоста к подлинному DNS-серверу. Так может быть решена задача по определению номера порта, с которого был отправлен запрос. Остается только определить идентификатор запроса, путем отправки нескольких ответов с разными идентификаторами после чего сетевая атака может быть реализована. На рис. 10 приведена графовая модель, показывающая основные этапы реализации сетевой атаки «Внедрение ложного DNS-сервера» на информационный ресурс АС [14].

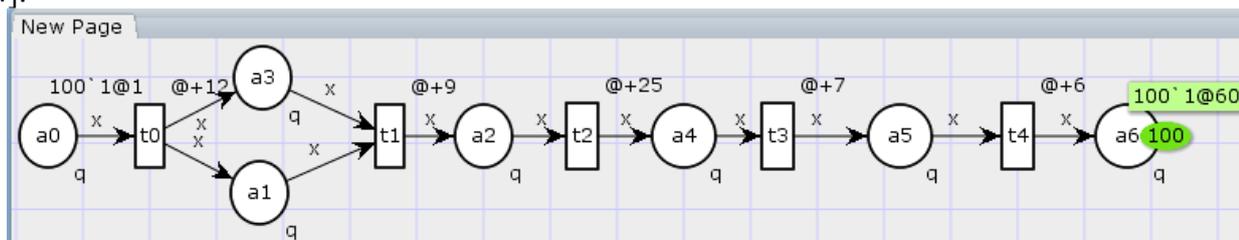


Рис.10. Графовая модель сетевой атаки «Внедрение ложного DNS-сервера»
Fig.10. The graph model of the network attack «Deployment of a false DNS server»

При использовании программной среды CPNTools проведем имитационное моделирование данной атаки, результаты которого представлены в табл.9.

Таблица 9. Результаты имитационного моделирования в программной среде CPNTools сетевой атаки «Внедрение ложного DNS-сервера»
Table 9. Results of simulation simulation in the CPNTools software environment of the network attack «Deployment of a false DNS server»

Timedstatistics					
Name	Count	Avrg	Min	Max	TimeAvrg
Marking_size_New_Page'a1_1	202	22.222222	0	100	13
Marking_size_New_Page'a2_1	202	16.666667	0	100	9
Marking_size_New_Page'a3_1	202	22.222222	0	100	13
Marking_size_New_Page'a4_1	202	46.296296	0	100	25
Marking_size_New_Page'a5_1	202	12.962963	0	100	7
Marking_size_New_Page'a6_1	102	0.000000	0	100	6

В качестве примера использования данной методики при решении прикладной задачи для формирования количественных требований к СЗИ от НСД воспользуемся возможностью пакета прикладных программ Matlab-2013 (где имеются встроенные генетические алгоритмы).

Исходными данными для генетического алгоритма являются ВВХ сетевых атак, представленные в результирующих таблицах CPNTools.

При эволюционном моделировании использовались следующие параметры ГА:

- 1) значение популяции – 100 %;
- 2) рулеточный отбор новой популяции;
- 3) мутационная допустимость – 0,5 %;
- 4) допустимость кроссинговера – (80 – 95) %.

Численный эксперимент ГА осуществлялся по формированию требований к СЗИ от НСД и был остановлен в связи с окончанием роста функции приспособленности (функции оптимизации) [8].

Результаты формирования требований к СЗИ от НСД при использовании эволюционных методов моделирования (генетического алгоритма, встроенного в пакет прикладных программ Matlab 2013) представлены в табл.10. В ней приведены результаты нормирования количественных требований к СЗИ от НСД в АС (показателей v_i^j и λ_i^j результирующей марковской модели) [8].

Таблица 10. Результаты формирования требований к СЗИ от НСД при использовании эволюционных методов моделирования (генетического алгоритма, встроенного в пакет прикладных программ Matlab 2013)

Table 10. The results of the formation of requirements for GIS from NSD using the evolutionary modeling methods (the genetic algorithm built into the Matlab 2013 application package)

№ п.п.	Наименование атаки	Вид параметров модели защиты	Параметр времени реализации v_i^j	Интенсивность реализации λ_i^j
Сбор информации о топологии и принципах функционирования информационной системы (Probes)				
1	Сканирование сети	$v_1^1 \lambda_1^1$	0.02	2e-6
2	Сниффинг пакетов в сети без коммутаторов	$v_1^2 \lambda_1^2$	0.08	1,3e-5
Непосредственное проникновение в информационную систему (RemotetoLocalUserAttacks)				
3	Внедрение в сеть ложного объекта на основе недостатков алгоритмов удаленного поиска (ARP-spoofing)	$v_2^1 \lambda_2^1$	0.06	9,1e-3
4	Внедрение в сеть ложного объекта путем навязывания ложного маршрута	$v_2^2 \lambda_2^2$	0.5	5,2e-3
5	Подмена доверенного объекта сети (IP-spoofing)	$v_2^3 \lambda_2^3$	0.07	7,4e-4
6	Перехват TCP-сессии (IP-hijacking)	$v_2^4 \lambda_2^4$	0.07	5,2e-7
7	Внедрение ложногоDNS-сервера	$v_2^5 \lambda_2^5$	0.06	1,22e-5
8	Межсегментное внедрение ложного DNS-сервера	$v_2^6 \lambda_2^6$	0.057	2,41e-6
Установление контроля над информационной системой (UserstoRootAttacks)				
9	«Отказ в обслуживании» (SYN-flood)	$v_3^1 \lambda_3^1$	0.08	1,5e-3

Вывод. В настоящее время получение количественных значений ВВХ, связанных с сетевыми атаками, являются довольно сложной проблемой. Это вызвано тем, что в открытой печати по конкретным результатам реализации угроз отсутствует реальная статистика, которая необходима при решении прикладных задач в области информационной безопасности. Результаты и статистические данные, полученные с помощью программной среды имитационного моделирования CPNTools позволяют решать широкий спектр выше упомянутых задач.

В данной статье разработана методика исследования ВВХ реализации сетевых атак в программной среде имитационного моделирования CPNTools, ценность которой состоит в получении количественных значений ВВХ сетевых атак к информационному ресурсу АС. Они позволяют решать широкий спектр прикладных задач, связанных с защитой информации в АС, к которым можно отнести:

- 1) Проектирование СЗИ от НСД в АС на основе оценки их эффективности функционирования;
- 2) Разработка перспективных и доработка существующих АС, функционирующих в защищенном исполнении;
- 3) Сертификация объектов информатизации;
- 4) Разработка методики вычислительного эксперимента с целью исследования ВВХ СЗИ от НСД в АС при их создании и модификации.
- 5) Формирование требований к СЗИ от НСД в АС.

Библиографический список:

1. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения. [Электронный ресурс]. URL:<http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/386-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g3>.
2. ГОСТ Р 51583-2014. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. [Электронный ресурс]. – URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200108858>.
3. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. [Электронный ресурс]. – URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>.
4. ГОСТ 34.601-90. Автоматизированные системы. Стадии создания. [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.insapov.ru/gost-34-601-90.html>.
5. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. – М.: Воениздат, 1992.
6. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации.[Электронный ресурс]. – URL:<http://fstec.ru/component/attachments/download/299>.
7. Приказ МВД России от 14.03.2012 №169. Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года. [Электронный ресурс]. – URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>.
8. Методы и средства эволюционного моделирования при обосновании требований к программным системам защиты информации: монография / Змеев А.А., Мачтаков С.Г., Мещерякова Т.В., Никулина Е.Ю., Рогозин Е.А., Стукалов В.В., Хвостов В.А.; под ред. Е.А. проф. Рогозина. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2014. 74 с.
9. Рогозин Е.А., Попов А.Д., Шагиров Т.В. Проектирование систем защита информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах органов внутренних дел//Вестник Воронежского института МВД России. 2016. № 2. С. 174-183.
10. Дровникова И. Г., Мещерякова Т. В., Попов А. Д., Рогозин Е. А., Ситник С.М. Математическая модель оценки эффективности систем защиты информации с использованием преобразования Лапласа и численного метода Гивенса // Труды СПИИРАН. 2017. № 3 (52). С. 234258. DOI 10.15622/sp.52.11
11. Банк данных угроз ФСТЭК РФ. [Электронный ресурс]. – URL: <http://bdu.fstec.ru/threat>.
12. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Simulating Telecommunication Systems with CPN Tools: Students'book. – Odessa: ONAT, 2006. 60 p.
13. Kurt Jensen, Lars M. Kristensen. Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. 384 p.
14. Wil van der Aalst; Christian Stahl. Modeling Business Processes - A Petri Net-Oriented Approach // Massachusetts Institute of Technology. 2011. 400 p.
15. Радько Н.М., Язов Ю.К., Корнеева Н.Н. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа : учеб. пособие – Воронеж : ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 263 с.
16. Sheng Ding, Na Xia, Peipei Wang, Shaojie Li, Yuanxiao Ou, "Optimization Algorithm Based on SPSA in Multi-channel Multi-radio Wireless Monitoring Network", Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discov-

ery (CyberC) 2015. International Conference on, pp. 517-524, 2015.

17. Masoud Hasanifard, Behrouz Tork Ladani. "DoS and port scan attack detection in high speed networks", Information Security and Cryptology (ISCISC), 2014 11th International ISC Conference on, pp. 61-66, 2014.
18. Muniyandi A.P., et al., " Network Anomaly Detection by Cascading KMeans Clustering and C4.5 Decision Tree algorithm, " Procedia Engineering, vol. 30, pp. 174-182, 2012.
19. Pengfei Zhang, Sai Ganesh Nagarajan, Ido Nevat, "Secure Location of Things (SLOT): Mitigating Localization Spoofing Attacks in the Internet of Things" IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, Issue: 6, pp 2199-2206, 2017.

References:

1. FSTEK RF. Rukovodyashchii dokument. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Terminy i opredeleniya. [Elektronnyiresurs]. URL1: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/386-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g3>. [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and Definitions. [Electronic resource] URL1: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/386-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g3>. (In Russ.)]
2. GOST R 51583-2014. Poryadok sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchennom ispolnenii [Elektronnyiresurs]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858>. [GOST R 51583-2014. The order of creation of the automated systems in the protected execution [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858>. (In Russ.)]
3. FSTEK RF. Rukovodyashchii dokument. Sredstva vychislitel'noi tekhniki. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zashchishchennosti ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyiresurs]. URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>. [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Means of computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information [Electronic resource]. URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g>. (In Russ.)]
4. GOST 34.601-90. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniya. [Elektronnyiresurs]. URL:<http://www.insapov.ru/gost-34-601-90.html>. [GOST 34.601-90. Automated systems. Stages of creation. [Electronic resource]. URL:<http://www.insapov.ru/gost-34-601-90.html>. (In Russ.)]
5. FSTEK RF. Rukovodyashchii dokument. Avtomatizirovannye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii. M.: Voenizdat, 1992. [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for information security. Moscow: Voenizdat, 1992. (in Russ.)]
6. FSTEK RF. Rukovodyashchii dokument. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noi tekhniki i avtomatizirovannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyiresurs]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/299>. [FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. The concept of protecting computer facilities and automated systems from unauthorized access to information [Electronic resource]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/299>. (In Russ.)]
7. Prikaz MVD Rossiit 14.03.2012 №169. Ob utverzhenii Kontseptsii obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti organov vnutrennikh del Rossiiskoi Federatsii do 2020 goda. [Elektronnyiresurs]. URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. [Order of the Ministry of Internal Affairs of Russia from 14.03.2012 №169. About the statement of the Concept of maintenance of information security of law-enforcement bodies of the Russian Federation till 2020. [Electronic resource]. URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. (in Russ.)]
8. Zmeev A.A., Machtakov S.G., Meshcheryakova T.V., Nikulina E.Yu., Rogozin E.A., Stukalov V.V., Khvostov V.A. Metody i sredstva evolyutsionnogo modelirovaniya pri obosnovanii trebovaniy k programmnykh sistem zashchity informatsii. Monografiya (pod red. E.A. Rogozina). Voronezh: Voronezhskii institut MVD Rossii; 2014. 74 s. [Zmeev A.A., Machtakov S.G., Meshcheryakova T.V., Nikulina E. Yu., Rogozin E.A., Stukalov V.V., Khvostov V.A. Methods and means of evolutionary modeling in substantiating the requirements for software information security systems. Monograph (edited by E.A. Rogozin). Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation; 2014. 74 p. (in Russ.)]
9. Rogozin E.A., Popov A.D., Shagirov T.V. Proektirovanie sistem zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo

- dostupa v avtomatizirovannykh sistemakh organov vnutrennikh del. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2016; 2:174-183. [Rogozin E.A., Popov A.D., Shagirov T.V. Designing of information security systems against unauthorized access in automated systems of internal affairs bodies. Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia. 2016; 2:174-183. (In Russ.)]
10. Drovnikova I.G., Meshcheryakova T.V., Popov A.D, Rogozin E.A., Sitnik S.M. Matematicheskaya model' otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii s ispol'zovaniem preobrazovaniya Laplasy i chislennogo metoda Givensa. Trudy SPIIRAN. 2017; 3(52):234-258. DOI 10.15622/sp.52. [Drovnikova I.G., Meshcheryakova T.V., Popov A.D, Rogozin E.A., Sitnik S.M. A mathematical model for evaluating the effectiveness of information security systems using the Laplace transform and the Givens numerical method. Proceedings of SPIIRAN. 2017; 3(52):234-258. DOI 10.15622/sp.52. (In Russ.)]
 11. Bank dannykhugroz FSTEC RF. [Elektronnyiresurs]. URL: <http://bdu.fstec.ru/threat>. [FSTEC RF Database of Threats [Electronic resource]. URL: <http://bdu.fstec.ru/threat>. (In Russ.)]
 12. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Simulating Telecommunication Systems with CPN Tools: Students'book. Odessa: ONAT; 2006. 60 p.
 13. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2009. 384 p.
 14. Van der Aalst W., Stahl C. Modeling Business Processes - A Petri Net-Oriented Approach. MassachusettsInstituteofTechnology; 2011. 400 p.
 15. Rad'ko N.M., YazovYu.K., Korneeva N.N. Proniknoveniya v operatsionnyuyu sredu komp'yutera: model i zloumyshlennogo udalennogo dostupa: ucheb.posobie. Voronezh: FGBOU VPO «Voronezhskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet»; 2013. 263 s. [Rad'ko N.M., YazovYu.K., Korneeva N.N. Penetrations into the operating environment of the computer: malicious remote access models: tutorial. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2013. 263 p. (In Russ.)]
 16. Ding S., Xia N., Wang P., Li S., Ou Y. Optimization Algorithm Based on SPSA in Multi-channel Multi-radio Wireless Monitoring Network. Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC) International Conference. 2015. P. 517-524.
 17. Hasanifard M., Ladani B.T. DoS and port scan attack detection in high speed networks. Information Security and Cryptology (ISCISC) 11th International ISC Conference. 2014. P. 61-66.
 18. Muniyandi A.P. et al. Network Anomaly Detection by Cascading KMeans Clustering and C4.5 Decision Tree algorithm. Procedia Engineering. 2012;30:174-182.
 19. Zhang P., Nagarajan S.G., Nevat I. Secure Location of Things (SLOT): Mitigating Localization Spoofing Attacks in the Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal. 2017;4(6):2199-2206.

Сведения об авторах:

Дровникова Ирина Григорьевна – доктор технических наук, доцент, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел.

Змеев Анатолий Анатольевич – соискатель.

Попов Антон Дмитриевич – адъюнкт.

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

Information about the authors:

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

Anatoly A.Zmееv – Doctoral candidate.

Anton D. Popov – Adjunct.

Evgenii A. Rogozin – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems .

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 15.09.2017.

Received 15.09.2017.

Принята в печать 20.11.2017.

Accepted for publication 20.11.2017.

Для цитирования: Лосев А.С. Бутстреп методы построения доверительных интервалов оценки параметров модели зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):114-121. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-114-121

For citation: Losev A.S. Bootstrapping methods for constructing confidence intervals for the estimation of model parameters of the zonal disintegration of rocks around underground excavations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(4):114-121. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-114-121

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 622:510.67

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-114-121

БУТСТРЕП МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

Лосев А.С.

Институт прикладной математики

Дальневосточного отделения Российской академии наук,

690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, Россия,

e-mail: A.S.Losev@yandex.ru

Резюме: *Цель.* Исследование геомеханических явлений и процессов в массивах горных пород, проявляющихся при добыче полезных ископаемых, актуализирует поиск методов решения проблемы зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок. В условиях предельно малого объема выборки, в силу объективных обстоятельств, отсутствия большого числа месторождений, вопрос качества полученного результата очень актуален. **Метод.** В качестве решения проблемы, предлагается уточнить полученные результаты методами численного ресамплинга, к которым относятся рандомизация, бутстреп и методы Монте-Карло. В силу специфики методов, особое внимание уделено числу бутстреп реализаций, которые обратно пропорциональны размерности бутстреп выборки. **Результат.** Решена задача зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок, для которой бутстреп методами получены уточненные оценки значимости аналитической зависимости параметра периодичности функции дефектности от положения зон разрушения. В качестве основного показателя в работе выбран коэффициент детерминации, который позволяет определить наиболее подходящий вид исследуемой аналитической зависимости. Отклонение коэффициента детерминации в нелинейной модели стабильно не превышает 0,5% при любой объеме бутстреп выборки, в то время как в случае линейной модели отклонение меньше 1% только при $n \geq 122$. **Вывод.** Полученные с помощью бутстреп методов, интервальные оценки коэффициентов детерминации, имеют существенное преимущество по сравнению с традиционными подходами. Их качество напрямую зависит от числа бутстреп реализаций и объема бутстреп выборки. Последние особенно значимо в условиях рассмотрения предельно маленьких выборок данных, так как появляется возможность уменьшения размерности доверительных интервалов до заданного уровня при первоначальном уровне значимости результата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 14-11-00079.

Ключевые слова: бутстреп методы, алгоритм, зональное разрушение массива, интервальные оценки параметров

TECHNICAL SCIENCES
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**BOOTSTRAPPING METHODS FOR CONSTRUCTING CONFIDENCE INTERVALS
FOR THE ESTIMATION OF MODEL PARAMETERS OF THE ZONAL DISINTEGRATION
OF ROCKS AROUND UNDERGROUND EXCAVATIONS**

Alexsandr S. Losev

*Institute of Applied Mathematics of the Far-Eastern
Branch of the Russian Academy of Sciences,
7 Radio Str., Vladivostok 690041, Russia,
e-mail: A.S.Losev@yandex.ru*

Abstract. Objectives The study of geomechanical phenomena and processes in rock massifs, manifested during the extraction of minerals, results in the need for research methods for solving the problem of zonal disintegration of rocks around deep underground excavations. In conditions of extremely small sample sizes, due to external circumstances, and the absence of a large number of deposits, the question of the quality of obtained results is very relevant. **Methods** As a solution to the problem, it is proposed to refine the results obtained by using numerical resampling methods, which include randomisation, bootstrap and Monte Carlo methods. Due to the specifics of the methods, special attention is paid to the number of bootstrapping implementations, which are inversely proportional to the size of the bootstrap sample. **Results** A solution to the problem of zonal disintegration of rocks around deep underground excavations is derived in which refined estimates of the significance of the analytic dependency of the defect function periodicity parameter on the position of the fracture zones are obtained using bootstrapping methods. The determination coefficient is chosen as the primary indicator in the work, allowing the most suitable form of the studied analytic dependency to be determined. The deviation of the determination coefficient in the nonlinear model reliably does not exceed 0.5% for any bootstrap sample size, while in the case of the linear model the deviation is less than 1% only for $n \geq 122$. **Conclusion** The interval estimates of the determination coefficients obtained by bootstrapping methods have a significant advantage in comparison with traditional approaches. Their quality is directly dependant on the number of bootstrap implementations and the volume of the bootstrapped sample. The latter is especially important in the context of considering extremely small data samples, since it becomes possible to reduce the dimension of confidence intervals to a given level at the initial significance level of the result.

Acknowledgment The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 14-11-00079.

Keywords: bootstrapping methods, algorithm, zonal massif destruction, interval parameter estimates

Введение. Проведение современных статистических исследований очень часто сопровождается различными предположениями, например, о подчинении выборки или её остатков известным, а иногда удобным, законам распределения.

Данные предположения в большинстве случаев, достаточно обоснованы, так как исследуемые явления в наблюдаемых процессах (социологические, экономические и т.д.) широко известны и имеют огромный объем генеральной совокупности. Однако при рассмотрении более сложных или новых явлений, экспериментальные данные, которые весьма ограничены, допущения такого рода не всегда корректны. Например, исследования геомеханических явлений и процессов в массивах горных пород, проявляющихся при добыче полезных ископаемых [1-7].

Особое место среди них занимает задача зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок [8-13]. В частности, в работах [14-15], на примере, задачи зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок, методами статистического анализа, проводится оценка значимости различных видов аналитической зависимо-

сти, положения зон разрушения от параметра периодичности функции дефектности и предела прочности породы. В условиях предельно малого объема выборки, в силу объективных обстоятельств, отсутствия большого числа месторождений, вопрос качества полученного результата очень актуален.

В качестве решения проблемы, предлагается уточнить полученные результаты методами численного ресамплинга, к которому относятся рандомизация, бутстреп и методы Монте-Карло [16]. Их основная идея состоит в многократной обработке случайно составленных выборок по экспериментальным данным, рассмотрении их под различными углами и сопоставлении полученных результатов.

Достоинствами ресамплинг методов, является возможность отказа от не всегда обоснованного предположения, о подчинении обрабатываемых данных нормальному закону распределения; обращение к непосредственному статистическому анализу, отражая изменения распределения выборочных характеристик, в зависимости от неограниченного роста числа данных; получение более точных результатов, в силу уменьшения их оценки смещения.

Постановка задачи. Обратимся к задаче о распределении поля напряжений вокруг выработки круглого сечения, которая рассматривается как плоская и стационарная, в условиях нежимаемости и гидростатичности нагружения на бесконечности:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0.$$

Бигармоническое уравнение для функции дефектности определено как:

$$\Delta^2 R - \gamma^2 R = 0,$$

и граничные условия:

$$R|_{r=r_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial R}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} R(r) = 0,$$

где σ_{rr} – нормальное радиальное напряжение, $\sigma_{\varphi\varphi}$ – нормальное тангенциальное напряжение, Δ – оператор Лапласа, γ – параметр периодичности модели.

Решение для расстояния от центра выработки до точки массива, определено в виде:

$$R(r) = aJ_0(\sqrt{\gamma r}) + bN_0(\sqrt{\gamma r}) + cK_0(\sqrt{\gamma r}),$$

где J_0 , N_0 , K_0 – функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого порядка [17].

В работе [18], по данной задаче, установлено, что зависимость параметра периодичности модели – γ , от положения середины первой зоны разрушения, измеряемой в относительных к радиусу выработок единицах – r , выражается в аналитическая зависимость линейного вида:

$$\gamma^* = -10r + 23. \quad (1)$$

В работе [15], получена статистически обоснованная альтернативная модель, данной зависимости, нелинейного вида:

$$\gamma^* = 50,381 \exp(-1,3669r). \quad (2)$$

Отличительной особенностью этих моделей, является предельно маленькая выборка натуральных данных.

Поэтому, несмотря на их статистическую обоснованность и высокие коэффициенты детерминации R (91,05% – линейный, 98,81% – нелинейный), вопрос уточнения полученных результатов остается актуальным.

Методы исследования. Проведем уточнение статистических оценок полученных моделей, с помощью алгоритма построения бутстреп интервалов, описанного в работе [19], на мере коэффициента детерминации.

Исходные данные по месторождениям представим в виде множества пар $Z = \{z_i | z_i = (r_i, \gamma_i)\}, i = 1, \dots, 4$. Тогда алгоритм построения бутстреп интервала коэффициента

детерминации, соответственно, примет вид:

Шаг 1. Генератором случайных чисел построим бутстреповскую выборку, объемом n элементов, вытягивая на каждом шаге элементы из множества Z с повторением, случайным образом, и формируя из них выборку вида:

$$\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*\}_1 \text{ где } z_j^* \in Z, j = 1, \dots, n.$$

Шаг 2. Рассчитаем для полученной выборки бутстреповскую оценку коэффициента детерминации \tilde{R}_1^* .

Шаг 3. Повторим предыдущие шаги B -раз, сформировав в результате набор коэффициента детерминации $\tilde{R}_1^*, \tilde{R}_2^*, \dots, \tilde{R}_B^*$.

Шаг 4. Отсортируем набор коэффициента детерминации $\tilde{R}_1^*, \tilde{R}_2^*, \dots, \tilde{R}_B^*$ в порядке возрастания.

Шаг 5. Определим доверительный интервал бутстреп распределения по формуле

$$\tilde{R}_{B \cdot \frac{\alpha}{2}}^* \leq \tilde{R}^*(n, \alpha) \leq \tilde{R}_{B \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}^*.$$

В силу специфики метода, особое внимание необходимо уделить числу бутстреп реализаций, которые обратно пропорционально размерности бутстреп выборки [20].

По результатам предварительных бутстреп реализаций на различных объемах бутстреп выборок (рис 1.), установлено, что в нашем случае их число должно быть не менее 10000.

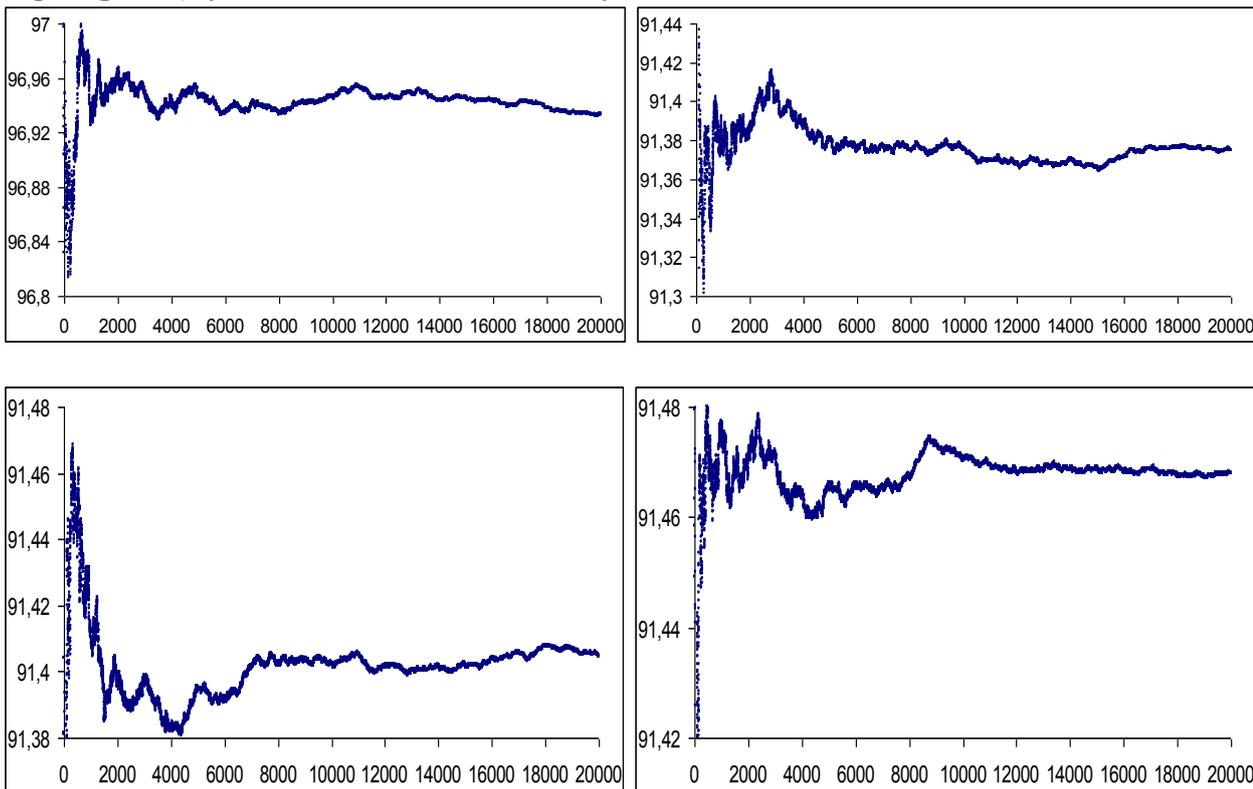


Рис. 1. Результат бутстреп реализаций по оценке \tilde{R} линейной модели при $B = 1..2 \cdot 10^4$ и различным объеме бутстреп выборки $n = 4; 20; 40; 200$ (слева на право)

Fig.1. The result of the bootstrapping of the realizations for estimating the linear model at

$B = 1..2 \cdot 10^4$ and different bootstrap volumes of the sample $n = 4; 20; 40; 200$ (from left to right)

Обсуждение результатов. Используя алгоритм построения бутстреп интервалов, построим бутстреп интервалы коэффициентов детерминации рассмотренных моделей с числом бутстреп реализаций $B = 10^5$ и уровнем значимости $\alpha = 0,1$.

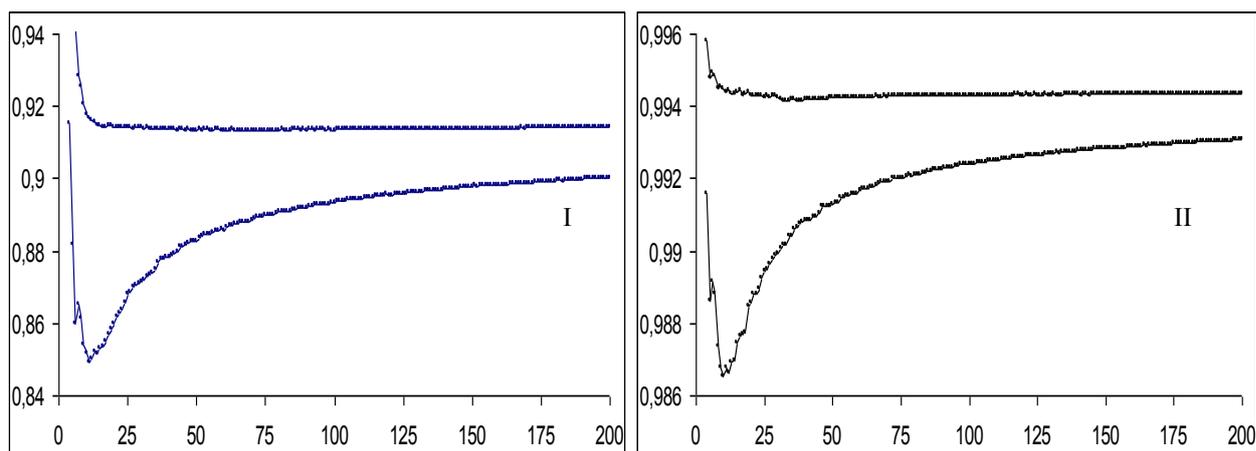


Рис. 2. Бутстреп интервалы коэффициента детерминации при $\alpha=0,1$ (I – линейная модель, II– нелинейная модель)
Fig. 2. Bootstrap intervals of the coefficient of determination for $\alpha= 0,1$ (I - linear model, II-nonlinear model)

Доверительные интервалы, полученные по исходной выборке, традиционным методом (3), в разы превосходят по своей протяженности бутстреп интервалы (таб. 1). В линейной модели, в случае максимально рассмотренной бутстреп выборки, доверительный интервал в 63,4 раза длиннее бутстреп интервала, в нелинейной – 409 раза.

$$\left(\sqrt{R} - t_{\alpha} \sqrt{\frac{1-R}{n-2}} \right)^2 \leq R \leq \left(\sqrt{R} + t_{\alpha} \sqrt{\frac{1-R}{n-2}} \right)^2, \quad (3)$$

где t_{α} – табличное значение t -критерием Стьюдента при заданном уровне значимости [21].

Таблица 1. Сравнительная таблица доверительных и бутстреп интервалов
Table 1. Comparison table of confidence and bootstrap intervals

Модель	Доверительный интервал	Бутстреп интервал		Отношение длин интервалов
		n	Интервал	
Линейная	[0,113; 1]	$n=50$	[0,883; 0,914]	28,6
		$n=125$	[0,896; 0,914]	49,3
		$n=200$	[0,900; 0,914]	63,4
Нелинейная	[0,591; 1]	$n=50$	[0,991; 0,994]	136,3
		$n=125$	[0,993; 0,994]	409
		$n=200$	[0,993; 0,994]	409

Дальнейшее рассмотрение бутстреп полуинтервала в виде процента от его середины (рис. 3), позволило установить, что отклонение коэффициента детерминации в нелинейной модели стабильно не превышает 0,5% при любой объеме бутстреп выборки, в то время как в случае линейной модели отклонение меньше 1% только при $n \geq 122$.

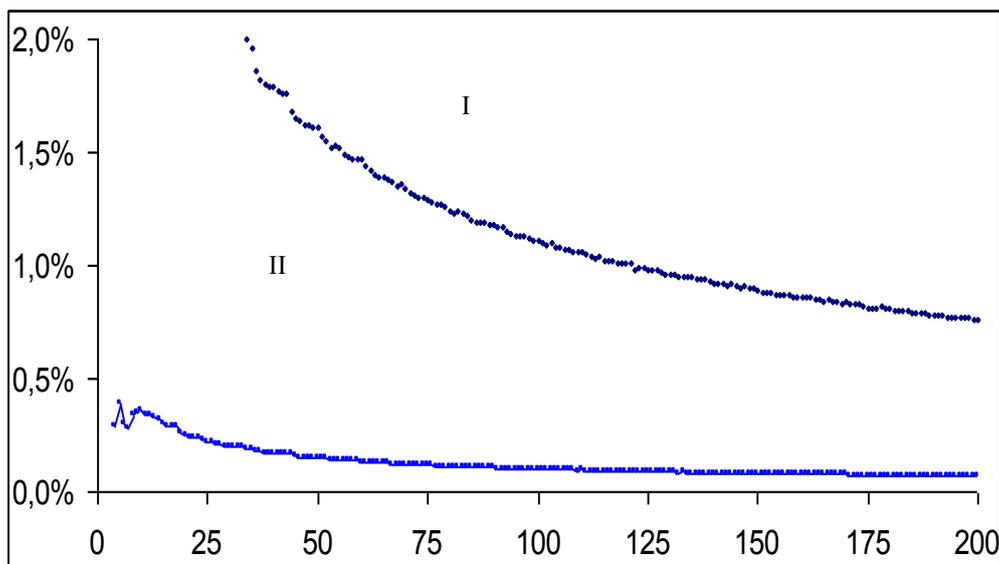


Рис. 3. Зависимость отклонения оценки коэффициента детерминации от границ бутстреп интервала от размерности бутстреп выборки (I – линейная модель, II– нелинейная модель)

Fig. 3. Dependence of the deviation of the estimation of the determination coefficient from the bootstrap interval boundaries on the bootstrap sample size (I - linear model, II - nonlinear model)

Вывод. Полученные с помощью бутстреп методов интервальные оценки коэффициентов детерминации, имеют существенное преимущество по сравнению с традиционными подходами. Их качество напрямую зависит от числа бутстреп реализаций и объема бутстреп выборки. Последние особенно значимы в условиях рассмотрения предельно маленьких выборок данных, так как появляется возможность уменьшения размерности доверительных интервалов до заданного уровня при первоначальном уровне значимости результата.

В традиционных статистических методах, данный эффект достигается посредством увеличения исходной выборки, что требует сбора дополнительных данных, который не всегда возможен или финансовых затрат, как в нашем случае.

С другой стороны, уменьшение размерности доверительного интервала возможно в результате понижения статистической значимости, что в общем случае не всегда позволяет получить необходимые нижнюю и верхнюю оценки пределов, но приводит к существенному понижению надежности результата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 14-11-00079.

Библиографический список:

1. Chen X.G.Zhang Q.Y. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress. *Rock and Soil Mechanics*. 2011;32(1):84–90.
2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state // *Journal of Mining Science*. – 2011. – № 47(1). – P. 37–46. doi:10.1134/S1062739147010059
3. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2011. – № 3(1). – P. 1–9. doi:10.3724/SP.J.1235.2011.00001
4. Tan Y.L., Ning J.G., Li H.T. In situ explorations on zonal disintegration of roof strata in deep coal mines // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2012. Vol. 49. – № 1. – P.113–124.
5. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2013. – № 64. – P. 246–257. doi:10.1016/j.ijrmmms.2013.08.010

6. Wang X., Pan Y., Zhang Z. A Spatial Strain Localization Mechanism of Zonal Disintegration through Numerical Simulation // *Journal of Mining Science*. – 2013. – Vol. 49. – № 3. – P. 357–367
7. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel // *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2015. Vol. 28. № 6. P.722-734
8. Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М.: ИПКОН РАН, 1996. – 166 с.
9. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // *Физ. мезомех.* 2004. Т. 7. № 4. С. 25-34.
10. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. – Владивосток : Дальнаука, 2007. – 232 с.
11. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок/ [В.Н. Опарин и др.]; отв. Ред. М.А. Гузев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 278 с.
12. Ксендзенко Л.С., Макаров В.В., Опанасюк Н.А., Голосов А.М. Закономерности деформирования и разрушения сильно сжатых горных пород и массивов: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т. 2014. 192 с.
13. Chen J.G., Zhou T.T., Zhang Y.X. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber // *Rock and Soil Mechanics*. 2011. № 32(9). P. 2629-2634.
14. Лосев А.С. Зависимость зоны разрушения массива вокруг горной выработки от предела прочности породы // *Горные науки и технологии*. 2017. № 2 с. 43-49.
15. Лосев А.С. Статистическая оценка параметра периодичности модели зональной дезинтеграции горных пород // *Бюллетень науки и практики. Электрон. журн.* 2017. № 7(20) с. 78-82.
16. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей: Пер. с англ./ Предисловие Ю. П. Адлера, Ю. А. Кошевника. – М.: Финансы и статистика, 1988.
17. Гузев М.А., Парошин А.А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42 № 1. с. 147–156.
18. Ксендзенко Л.С. Разработка метода определения параметров зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг подземных выработок // *Вестник Дальневосточного государственного технического университета*. 2011. № 3/4(8/9) с. 144–166.
19. Ануфриев Д.В. Бутстреп-методы построения доверительных интервалов для задач оценивания точностных характеристик системы ЛА-КСЦПНО // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2005. № 89. с. 93-96.
20. Глухов В.В., Ануфриев Д.В. Бутстреп-процедуры определения точностных характеристик// *Научный вестник МГТУ ГА*. 2005. № 89. с. 30-35.
21. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. Финансы и статистика, 1985. 487 с.

References:

1. Chen X.G.Zhang Q.Y. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress. *Rock and Soil Mechanics*. 2011;32(1):84–90.
2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state. *Journal of Mining Science*. 2011; 47(1):37–46. doi:10.1134/S1062739147010059
3. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2011;3(1):1–9. doi:10.3724/SP.J.1235.2011.00001
4. Tan Y.L., Ning J.G., Li H.T. In situ explorations on zonal disintegration of roof strata in deep coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012;49(1):113–124.
5. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013;64:246–257. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.010
6. Wang X., Pan Y., Zhang Z. A Spatial Strain Localization Mechanism of Zonal Disintegration through Numerical Simulation. *Journal of Mining Science*. 2013;49(3):357–367.
7. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2015;28(6):722-734.
8. Odintsev V.N. Otryvnoe razrushenie massiva skal'nykh gornyx porod. M.: IPKON RAN; 1996. 166 s. [Odintsev V.N. Detachable destruction of rock massif. Moscow: IPKON RAS; 1996. 166 p. (in Russ.)]
9. Makarov P.V. Ob ierarkhicheskoi prirode deformatsii i razrusheniya tverdykh tel i sred. *Fiz. mezomekh*. 2004;7(4):25-34. [Makarov P.V. On the hierarchical nature of deformation and destruction of solids and media. *Physical mesomechanics*. 2004;7(4):25-34. (In Russ.)]
10. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatykh gornyx porod vokrug vyrabotok. Vladivostok: Dal'nauka; 2007. 232 s. [Guzev M.A., Makarov V.V. Deformation and destruction of strongly compressed rocks around the excavations. Vladivostok: Dal'nauka; 2007. 232 p. (In Russ.)]

11. Oparin V.N. i dr. Zonal'naya dezintegratsiya gornyx porod i ustoichivost' podzemnykh vyrabotok (otv. Red. M.A. Guzev). Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t gornogo dela. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN; 2008. 278 s. [Oparin V.N. et al. Zonal disintegration of rocks and stability of underground excavations (Ed. M.A. Guzev). RAS, Siberian Institute of Mining. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS; 2008. 278 p. (In Russ.)]
12. Ksendzenko L.S., Makarov V.V., Opanasyuk N.A., Golosov A.M. Zakonomernosti deformirovaniya i razrusheniya sil'no szhatykh gornyx porod i massivov: monografiya. Inzhenernaya shkola DVFU. Vladivostok: Dal'nevost. feder. un-t; 2014. 192 s. [Ksendzenko L.S., Makarov V.V., Opanasyuk N.A., Golosov A.M. Regularities of deformation and destruction of highly compressed rocks and massifs. Monograph. Engineering School of FEFU. Vladivostok: Far East. feder. un-ty; 2014. 192 p. (In Russ.)]
13. Chen J.G., Zhou T.T., Zhang Y.X. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber. *Rock and Soil Mechanics*. 2011;32(9):2629-2634.
14. Losev A.S. Zavisimost' zony razrusheniya massiva vokrug gornoj vyrabotki ot predela prochnosti porody. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2017;2:43-49. [Losev A.S. Dependence of the zone of destruction of the massif around the mine workings from the ultimate strength of the rock. *Mining Science and Technology*. 2017;2:43-49. (In Russ.)]
15. Losev A.S. Statisticheskaya otsenka parametra periodichnosti modeli zonal'noi dezintegratsii gornyx porod. *Byulleten' nauki i praktiki. Elektron. zhurn*. 2017;7(20):78-82. [Losev A.S. Statistical estimation of the periodicity parameter of the model of the rock zonal disintegration. *Bulletin of science and practice. Electronic journal*. 2017;7(20):78-82. (In Russ.)]
16. Efron B. Netraditsionnye metody mnogomernogo statisticheskogo analiza. M.: Finansy i statistika; 1988. [Efron B. Non-traditional methods of multivariate statistical analysis. Moscow: Finance and Statistics; 1988. (In Russ.)]
17. Guzev M.A., Paroshin A.A. Neevklidova model' zonal'noi dezintegratsii gornyx porod vokrug podzemnoi vyrabotki. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2001;42(1):147-156. [Guzev M.A., Paroshin A.A. Neevklidova model' zonal'noi dezintegratsii gornyx porod vokrug podzemnoi vyrabotki. *Non-Euclidean model of zonal disintegration of rocks around the underground excavation. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001;42(1):147-156. (In Russ.)]
18. Ksendzenko L.S. Razrabotka metoda opredeleniya parametrov zonal'noi struktury razrusheniya sil'no szhatogo massiva vokrug podzemnykh vyrabotok. *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011;3/4(8/9):144-166. [Ksendzenko L.S. Development of a method for determining the parameters of the zonal structure of the destruction of a highly compressed massif around the underground excavations. *Bulletin of the Far Eastern State Technical University*. 2011;3/4(8/9):144-166. (In Russ.)]
19. Anufriev D.V. Butstrep-metody postroeniya doveritel'nykh intervalov dlya zadach otsenivaniya tochnostnykh kharakteristik sistemy LA-KSTsPNO. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. 2005;89:93-96. [Anufriev D.V. Bootstrapping methods for constructing confidence intervals for the problems of estimating the accuracy characteristics of the LA-KSNPNO system. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2005;89:93-96. (In Russ.)]
20. Glukhov V.V., Anufriev D.V. Butstrep-protsedury opredeleniya tochnostnykh kharakteristik. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. 2005;89:30-35. [Glukhov V.V., Anufriev D.V. Bootstrapping procedures for determining the accuracy characteristics. *Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2005;89:30-35. (In Russ.)]
21. Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostei. Finansy i statistika*; 1985. 487 s. [Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Applied statistics. Investigation of dependencies. Finance and statistics*; 1985. 487 p. (In Russ.)]

Сведения об авторе.

Лосев Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, научная группа вероятностных методов и системного анализа.

Information about the author.

Alexsandr S. Losev—Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Scientific Group of Probabilistic Methods and Systems Analysis.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.09.2017.

Принята в печать 20.10.2017

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.

Received 12.09.2017.

Accepted for publication 20.10.2017.

Для цитирования: Силенок Ю.В., Яковлев В.Л. Методика оценивания эффективности информационного обеспечения поддержки принятия решений при управлении сложными динамическими объектами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):122-131. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-122-131

For citation: Silenok Yu.V., Yakovlev V.L. Methodology of evaluating the efficiency of information support for decision-making in the management of complex dynamic objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):122-131. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-122-131

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.415.2:004.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-122-131

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Силенок Ю.В.¹, Яковлев В.Л.²

¹⁻²Костромской государственной университет,

¹⁻²156005, г. Кострома, ул. Дзержинского, 17, Россия,

¹e-mail: yuri.silenok@exactprosystems.com, ²e-mail: yakovlevvadim62@gmail.com

Резюме. Цель. Процесс управления сложными динамическими объектами и системами неизбежно связан с проблемой эффективности информационного обеспечения качества поддержки принятия управленческих решений. Создание и применение информационной системы (ИС) вызывают необходимость оценки ее эффективности. **Метод.** В статье представлена методика оценивания эффективности информационных систем при решении задач управления сложными динамическими объектами. Уточняется содержание критериев качества функционирования информационных систем. **Результаты.** Обоснованы показатели эффективности и качества информационной системы, ориентированной на анализ данных в задачах обработки информации. Показано, что необходимым и достаточным условием оценки эффективности информационной системы является размерность ее показателя. Представлен сравнительный анализ вариантов решения поставленной задачи на основе их прямого ранжирования с учетом значимости скалярного интегрального показателя качества. Показан переход к векторному показателю, элементами которого являются частные собственные показатели качества системы, каждый из которых может иметь самостоятельное значение для последующего уровня иерархии. **Вывод.** Необходимость учета частных показателей приводит к специфическим методам анализа и синтеза систем, основанным на многокритериальном подходе на основе концепции пространства состояний. В статье уточняется содержание критериев качества для информационных систем. Разработана и представлена методика оценивания эффективности информационных систем при решении задач управления сложными динамическими объектами на основе многокритериальной оптимизации. Сформирован и обоснован обобщенный показатель качества информационной системы. На основе концепции пространства состояний, возможен переход от скалярного интегрального критерия качества информационных систем, как правило, несобственного, к вектору значений собственных показателей.

Ключевые слова: эффективность информационной системы, концепции пространства состояний, критерии, показатель, качество, методика, оценка, управление, система, принятие решения

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

METHODOLOGY OF EVALUATING THE EFFICIENCY OF INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN THE MANAGEMENT OF COMPLEX DYNAMIC OBJECTS

Yuri V. Silenok¹, Vadim L. Yakovlev²

¹⁻²Kostroma State University,

¹⁻²17 Dzerzhinskogo Str., Kostroma 156005, Russia,

¹e-mail: yuri.silenok@exactprosystems.com, ²e-mail: yakovlevvadim62@gmail.com

Abstract. Objectives The process of managing complex dynamic objects and systems is inevitably connected with the problem of the effectiveness of providing qualitative support information for making managerial decisions. The creation and application of an information system (IS) makes it results in a need to evaluate its effectiveness. **Methods** The article presents a methodology for evaluating the effectiveness of information systems in solving problems related to the management of complex dynamic objects. The content of the functional information system quality criteria is specified. **Results** Efficiency and quality indicators of an information system oriented towardsthe analysis of data related to information processing problems are substantiated. It is suggested that the necessary and sufficient condition for evaluating the effectiveness of an information system is the dimensionality of its indicator. A comparative analysis of variants of the solution is presented on the basis of their direct ranking, taking into account the significance of the scalar integral quality indicator. The transition to a vector indicator, whose elements are partially derived from the system's own quality indicators, each of which can have an independent value for the subsequent level of the hierarchy, is indicated. **Conclusion** The need to take into account the partial indicators leads to specific methods for analysing and synthesising systems on the basis of a multi-criteria approach based on the state space concept. The content of the quality criteria for the information systems is specified in the article. A developed methodology for evaluating the effectiveness of information systems in solving problems relating to the management of complex dynamic objects, based on multi-criteria optimisation, is presented. The developed generalised information system quality indicator is justified. On the basis of the state space concept, it is possible to move away from the generally unsuitable scalar integral quality criterion of information systems to the vector of eigenvalues.

Keywords: information system efficiency, state space concepts, criteria, indicator, quality, methodology, evaluation, management, system, decision-making

Введение. Выбор критериальной функции, предназначенной для количественной и/или качественной оценки информационной системы (ИС), достаточно субъективен. Предпочтительным универсальным показателем качества какой-либо системы является эффективность ее функционирования [1-5].

Эффективность является одним из фундаментальных свойств любой системы и непосредственно оценивается по результатам ее функционирования [6-7]. Проблема оценки эффективности ИС неоднозначна и многопланова.

Постановка задачи. В этой связи возникла задача формирования единой методологической основы, увязывающей оценку качества ИС с общей теорией квалиметрии [8-10]. При этом разработанные методики должны учитывать специфику оцениваемых систем обработки и хранения информации и, обеспечивать получение требуемых оценок качества конкретных ИС в конструктивной и наглядной форме [11-19].

Необходимым и достаточным условием оценки эффективности ИС является размерность ее показателя. Одномерность (скалярность) интегрального показателя эффективности является

существенной. При этом сравнительный анализ вариантов решения поставленной задачи осуществляется путем их прямого ранжирования на основе значимости скалярного интегрального показателя качества.

При переходе к векторному показателю, элементами которого являются частные собственные показатели качества системы, задача сравнения не только усложняется, но и становится не вполне корректной. Тем не менее, векторные показатели эффективности очень распространены на практике, поскольку позволяют осуществить естественную декомпозицию общей проблемы повышения качества функционирования ИС на ряд частных подзадач, каждая из которых может иметь самостоятельное значение для последующего уровня иерархии.

Методы исследования. Необходимость учета частных показателей приводит к специфическим методам анализа и синтеза систем, основанным на многокритериальном подходе [20-21].

В соответствии с вышеизложенным будем различать общую задачу оценки эффективности ИС, основанную на несобственном интегральном скалярном показателе результативности ее функционирования, и частную задачу, относящуюся к определению значений вектора собственных показателей ее качества $Q = [q_1, q_2 \dots q_n]^T$.

Интегральная оценка эффективности информационных систем.

Общая задача оценки эффективности ИС I сводится к определению интегрального скалярного показателя, позволяющего однозначно оценить ее вклад в результативность иерархически вышестоящей системы G(I), в интересах которой она создавалась.

При этом положительный эффект метасистемы G определяется скалярной величиной \mathcal{E}_G , зависящей от качественных характеристик входящей в ее состав ИС I(Q):

$$\mathcal{E}_G(I) = \mathcal{E}_G[I(Q)] \quad (1)$$

Очевидно, что реальная эффективность функционирования метасистемы G зависит от множества разнообразных факторов, таких как: показатели самой системы, качество ее управления, особенностей применения и т. п.

Таким образом, оценка эффективности, изучаемой ИС, осуществляется исходя из результативности функционирования (применения) метасистемы.

Оценка результативности метасистемы, в свою очередь, определяются на основе субъективных критериев, имеющих экзогенный (уже по отношению к G) характер.

В этой связи, интегральная оценка эффективности ИС $\mathcal{E}(I)$ будет определяться кортежем заданных критериев, позволяющих определить необходимые и достаточные условия результативности метасистемы G.

Необходимым условием эффективности любой системы является ее пригодность.

В скалярном случае пригодность ИС определяется вероятностью того, что достигнутый метасистемой положительный эффект (результат) будет превышать некоторый, априорно заданный порог $(\mathcal{E}_G)_0$.

Таким образом, критерий пригодности ИС можно представить в виде:

$$P\{\mathcal{E}_G(I) > (\mathcal{E}_G)_0\} \geq P_0 \quad (2)$$

где P_0 – критическое значение, выбираемое исходя из требований, решаемой метасистемой G задачи.

В случаях, когда функция распределения $F\{\mathcal{E}_G(I)\}$ неизвестна, в качестве показателя

оценки пригодности используют среднее значения результативности, полученное в серии из N испытаний (равные условия проведения):

$$\bar{\mathcal{E}}_G(I) > \mathcal{E}_{G_0} \quad (3)$$

где:

$$\bar{\mathcal{E}}_G(I) = \left\{ \sum_{i=1}^N [\mathcal{E}_G(I)]_i \right\} / N$$

При наличии одной единственной реализации, в условиях полной статистической неопределенности, критерий пригодности описывается детерминистским соотношением:

$$\mathcal{E}_G(I) > \mathcal{E}_{G_0} \quad (4)$$

По аналогии с необходимыми (2)-(4) можно сформулировать и достаточные критерии эффективности.

В частности, эффективность ИС по критерию превосходства будет определяться вероятностью того, что достигнутый метасистемой положительный эффект $\mathcal{E}_G(I)$ будет превышать соответствующий эффект, при использовании ИС-прототипа I_0 с вероятностью, не ниже заданной P_0 .

В этом случае критерий превосходства ИС можно представить в виде:

$$P\{\mathcal{E}_G(I) > \mathcal{E}_G(I_0)\} \geq P_0 \quad (5)$$

При отсутствии априорных знаний о распределении $F\{\mathcal{E}_G\}$, критерий превосходства можно выразить через средние значения

$$\bar{\mathcal{E}}_G(I) > \bar{\mathcal{E}}_G(I^0) \quad (6)$$

или в детерминированной форме, через одну конкретную реализацию

$$\mathcal{E}_G(I) > \mathcal{E}_G(I^0) \quad (7)$$

Аналогичные соотношения могут быть получены для критерия оптимальности.

При этом необходимо заранее определить множество, на котором осуществляется оптимизация.

В частности, если осуществляется синтез или поиск оптимальной ИС на некотором множестве допустимых систем $\{I\}_0$, критерии оптимальности, в зависимости от уровня априорной статистической неопределенности, могут быть, по аналогии с (2) ... (7) представлены в виде:

$$P\{\mathcal{E}_G(I^*) > \mathcal{E}_G(I)\} \geq P_0 \text{ для } \forall I \in \{I_0\} \quad (8)$$

При отсутствии априорных знаний о распределении $F\{E_G\}$, критерий оптимальности выражается через средние значения

$$P\{\bar{\mathcal{E}}_G(I^*) > \bar{\mathcal{E}}_G(I)\} \geq P_0 \text{ для } \forall I \in \{I_0\} \quad (9)$$

или в детерминированной форме, через одну конкретную реализацию:

$$P\{\mathcal{E}_G(I^*) > \mathcal{E}_G(I)\} \geq P_0 \text{ для } \forall I \in \{I\}_0 \quad (10)$$

Сформированные критерии отражают результативность ИС с точки зрения метасистемы.

Заметим, однако, что далеко не во всех случаях, возможно априорно определить влияние собственных показателей системы на ее интегральный показатель качества.

В данном случае рациональным является переход к векторной оценке качества информационных систем.

Векторная оценка эффективности информационных систем.

Векторная оценка эффективности ИС $I(Q)$ определяется зависимостью интегральной результативности иерархически вышестоящей системы E_G от совокупности частных технических показателей ИС $Q = [q_1, q_2 \dots q_n]^T$.

В числе частных технических показателей могут быть:

- допустимый объем хранения полезной информации;
- реальный объем оперативной и внешней памяти, занимаемый ИС;
- время доступа (время получения пользователем единицы объема востребованных данных из системы хранения информации (СХИ));
- степень безопасности ИС в отношении несанкционированного доступа (НСД);
- степень надежности сохранения информации в СХИ;
- открытость, гибкость системы и т.д.

Как правило, требования к системе задаются в виде области допустимых значений $\{Q_0\}$, полученной в результате априорного, экспериментального или имитационного моделирования процесса функционирования метасистемы $G[I(Q)]$.

Наличие априорных требований к ИС позволяет сформировать простейший критерий пригодности системы в виде:

$$Q \in \{Q_0\} \quad (11)$$

Он является критерием необходимости. Его выполнение позволяет однозначно указать на нецелесообразность разработки (применения) ИС.

Обсуждение результатов. Для обоснования целесообразности реализации ИС на практике одновременно с (11) используют критерии достаточности: превосходства и/или оптимальности.

Критерий превосходства позволяет оценить ИС на основе сопоставления ее параметров с параметрами системы-прототипа Q_0 :

$$Q > Q^0 \text{ для } \forall Q \in \{Q_0\}, \quad (12)$$

где множество допустимых значений параметров ИС $\{Q_0\}$ формируется на основе реализации условия необходимости (11).

Величина $\Delta \mathcal{E}_G = \mathcal{E}_G(Q) - \mathcal{E}_G(Q_0)$ отражает выигрыш, достигнутый от применения ИС I вместо системы-прототипа I^0 .

Применение критерия (12) требует обеспечения ряда условий:

1. Эффективность ИС является монотонно-неубывающей функцией от параметров Q , т.е. если $Q1 \geq Q2$, то $\mathcal{E}_G(Q1) \geq \mathcal{E}_G(Q2)$;

2. Понятие «больше» или «меньше» при сравнении векторов определено с точностью до метрики, построенной на них. Введение метрик представляет собой субъективный экзогенный процесс и требует дополнительного обоснования;

3. Критерий превосходства (12) правомерен лишь для независимых параметров q_1, q_2, \dots, q_m ; в случае, когда последние являются зависимыми величинами.

Увеличение какого-то параметра q_i может привести к уменьшению другого q_j , что, для нелинейных операторов $\mathcal{E}_G(Q)$ может вызвать серьезные трудности в построении ИС.

Очевидно, что критерий (12) не гарантирует, что исследуемая ИС будет обладать наибольшей эффективностью (качеством). Поэтому более строгое решение имеет место при выполнении критерия оптимальности.

При выполнении вышеприведенных условий (1-3) параметрический (векторный) критерий оптимальности можно представить в виде:

$$Q = Q^* = \text{extr} \{Q_0\}, \text{ для } \forall Q \in \{Q_0\} \quad (13)$$

где $\{Q_0\}$ – совокупность показателей качества, отвечающая множеству допустимых ИС.

Более строгое определение требует рассматривать эффективность метасистемы, как функцию вектора Q :

$$\mathcal{E}_G(Q^*) > \mathcal{E}_G(Q) \text{ для } \forall Q \in \{Q_0\}$$

Соотношения (11, ...,13) допускают запись и в скалярной форме [22]:

$$\bigcap_{j=1}^m (q_j \in \{q_0\}) = D \quad (14)$$

$$\left\{ \bigcap_{j=1}^m (q_j \in \{q_0\}) \right\} \cap \left\{ \bigcap_{j=1}^m (q_j \geq \{q_j^o\}) \right\} = D \quad (15)$$

$$\left\{ \bigcap_{j=1}^m (q_j \in \{q_0\}) \right\} \cap \left\{ \bigcap_{j=1}^m (q_j = \{q_j^*\}) \right\} = D \quad (16)$$

где: $\{q_0\}$ – область допустимых значений показателя,

\cap - символ Булева пересечения событий (конъюнкции высказываний),

D – символ достоверного события (истинное высказывание),

q_j^* – оптимальное значение показателя j -го свойства.

Если для всей совокупности сравниваемых параметров $\{q_j, j=1, \dots, m\}$ $q_l = q_j$, то качество l -го и j -го объектов признается одинаковым.

Если же, хотя бы одно из условий $q_j \dots q_l, l=1, \dots, n$ не выполняется, то это означает, что заданная совокупность показателей свойств не позволяет выявить ИС, превосходящую по качеству остальные.

В ряде прикладных задач оценивания эффективности ИС крайне плодотворной оказывается представление качественного состояния системы в виде точки m -мерного фазового пространства, как показано на (рис. 1).

При этом изменение эффективности ИС будет соответствовать перемещению фазовой точки в данном пространстве Q_m [23].

Попадание вектора в область $\{Q_0\}$ будет соответствовать выполнению критерия пригодности (14), превышение значений вектора $q_j \in \{Q_0\}, j=1, \dots, m$ – критерию превосходства (15) и нахождение глобального максимума $q_j^*, j=1, \dots, m$ – критерию оптимальности (16).

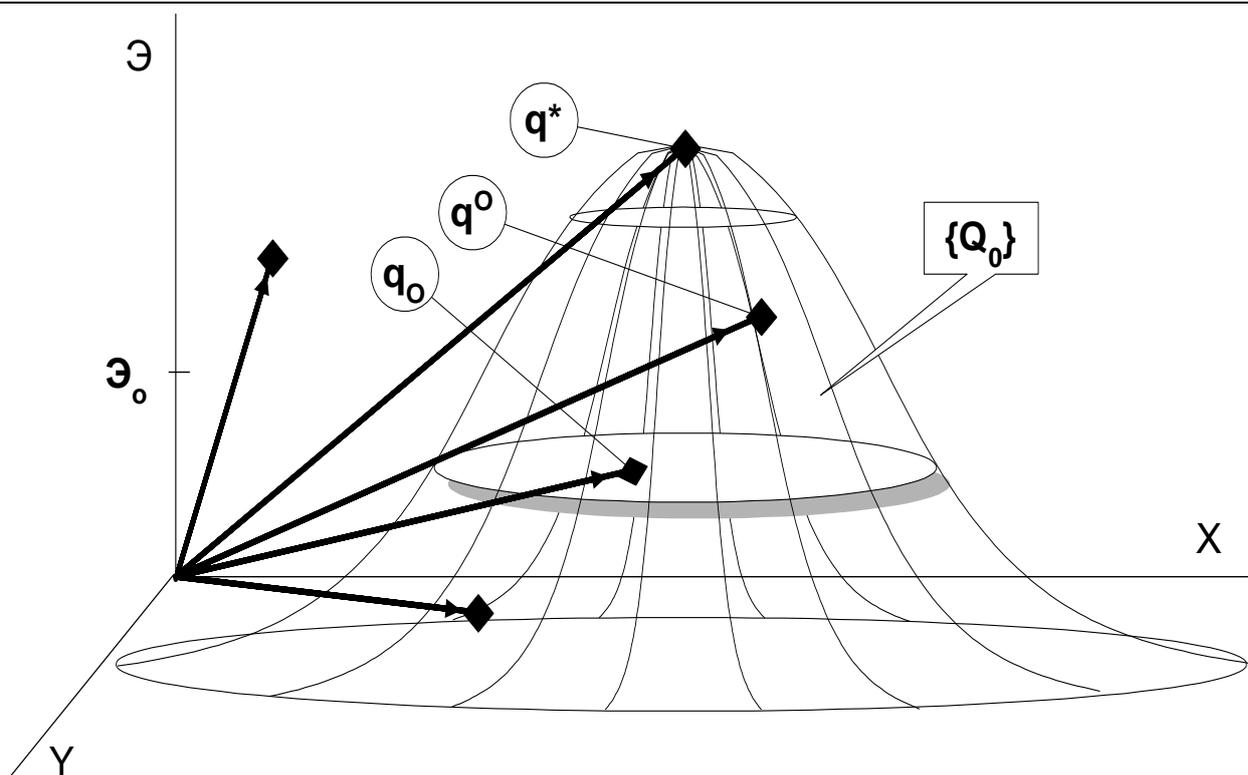


Рис.1. Графическая интерпретация критериев эффективности информационной системы

Fig.1. Graphical interpretation of the effectiveness criteria of the information system

Необходимо отметить, что приведенные выше показатели относятся к детерминированной ситуации.

В случае, когда имеется возможность получить избыточный объем наблюдений показателей качества, целесообразно перейти к вероятностно-статистической постановке задачи, обеспечивающей более реалистическую оценку эффективности ИС.

В частности, при наличии вероятностного распределения вектора Q , критерии пригодности, превосходства и оптимальности можно представить в виде, соответственно:

$$P(Q \in \{Q_0\}) > P_0 \quad (17)$$

$$P(Q > Q^o) > P_0 \quad (18)$$

$$P(Q = Q^*) = \text{extr} \quad (19)$$

При этом соотношение (17) выступает в качестве необходимого условия-ограничения для (1) и (19).

Аналогичные соотношения можно получить для случая, когда распределение $F(Q)$ неизвестно, а информационная избыточность используется для усреднения значений показателей качества ИС:

$$Q \in \{Q_0\} \quad (20)$$

$$Q > Q^0 \quad (21)$$

$$Q = Q^* = extr \quad (22)$$

Вывод. Вероятностные критерии (17, ..., 19) позволяют наиболее полно и объективно оценить эффективность функционирования системы.

Однако их реализация на практике связана со значительными трудностями, обусловленными отсутствием информации о законе распределения параметров F .

Практическое воплощение представленного подхода к оценке качества ИС в каждом конкретном случае требует его существенной адаптации.

Таким образом, на основе концепции пространства состояний, возможен переход от скалярного интегрального критерия качества ИС, как правило, несобственного, к вектору значений собственных показателей.

Библиографический список:

1. Юсупов Р.М, Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий. - Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 2(51). ISSN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн) www.proceedings.spiiras.nw.ru
2. ГОСТ 24.702-85. Единая система стандартов АСУ. Эффективность АС. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 6 с.
3. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств: основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 38 с.
4. ГОСТ 40.9001-88. Системы качества. Модель системы качества при проектировании или разработке. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 119 с.
5. Международный стандарт ISO 9001:1994. Системы качества. Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании. М.: Изд-во стандартов, 1996. 94 с.
6. Инмон У., Фридман Л. Методология экспертной оценки проектных решений для систем с базами данных. – М.: Финансы и статистика. 1986. – 227 с.
7. Анхимюк В.Л., Олейко О.Ф., Михеев Н.Н. «Теория автоматического управления». М.: Дизайн ПРО, 2002.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. «Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003.
9. Вендров А. М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. М.: Финансы и статистика 2003.
10. Гаврилин Ю. Ф. и др. Информационные технологии управления: Учеб. пособие/Юж. -Урал. гос. ун-т, Фак. коммерции; Ю. Ф. Гаврилин, А. И. Демченко, В. М. Каточков. -Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003.
11. Bernson A. Data Warehousing: Architecture and Technology – Los Angeles: McGraw-Hill Co, 1997. – 512 p.
12. Семенов С. С. Оценка качества и технического уровня сложных систем. /Практика применения методов экспертных оценок. М.: Ленанд. 2015. 352 с.
13. Мартин Дж. Планирование развития автоматизированных систем. /Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика. 1984. – 196 с.
14. Частиков А.П. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS / А.П. Частиков, Т.А. Гаврилова, Д.Л. Белов. – СПб. БХВ-Петербург, 2003. – 396 с.
15. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект: Стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е изд. М.: Издат. дом «Вильямс», 2005.
16. Девятков В. В. Системы искусственного интеллекта: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И. Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ, 2001.
17. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / С. Рассел, П. Норвиг. М.: Издат. дом «Вильямс», 2007.
18. Недбай А. А. Основы квалиметрии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон.учеб. пособие / А. А. Недбай, Н. В. Мерззликина. – Электрон.дан. (2 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Квалиметрия : УМКД № 104-2007 / рук.творч. коллектива А. А. Недбай).

19. Квалиметрия и управление качеством. Ч.1. Квалиметрия: учеб.пособие / А.Н.Чекмарев. – Самара: Изд-во Самара, гос. аэрокосм, ун-та, 2010. – 172 с.
20. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: Учеб.пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 584 с.
21. Коцюба И.Ю., Чунаев А.В. и др. Методы оценки и измерения характеристик информационных систем. Учебное пособие. – СПб: университет ИТМО, 2015. – 264 с.
22. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем /Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб.пособие. – М.: Логос, 2003. – 734 с.
23. Дударенко Н.А., Нуйя О.С., Сержантова М.В., Слита О.В., Ушаков А.В. Математические основы теории систем: лекционный курс и практикум. Учебное пособие для высших учебных заведений / Под ред. А. В. Ушакова – изд. 2–е, расширенное и дополненное. – СПб.: НИУ ИТМО , 2014. 292 с.

References:

1. Yusupov R.M., Musaev A.A. Osobennosti otsenivaniya effektivnosti informatsionnykh sistem i tekhnologii. Trudy SPIIRAN. 2017; 2(51). [Yusupov R.M., Musaev A.A. Features of the evaluation of the effectiveness of information systems and technologies. Proceedings of SPIIRAN. 2017; 2(51). (In Russ.)]
2. GOST 24.702-85. Edinaya sistema standartov ASU. Effektivnost' AS. Osnovnye polozheniya. M.: Izd-vostandartov; 1986. 6 s. [GOST 24.702-85. Unified system of standards for automated control systems. Effectiveness of the AS. Basic provisions. Moscow: Izd-vostandartov; 1986. 6 p. (In Russ.)]
3. GOST 28195-89. Otsenka kachestva programmnykh sredstv: osnovnye polozheniya. M.: Izd-vostandartov; 1989. 38 s. [GOST 28195-89. Evaluation of the quality of software: basic provisions. Moscow: Izd-vostandartov; 1989. 38 p. (In Russ.)]
4. GOST 40.9001-88. Sistemy kachestva. Model' sistemy kachestva pri proektirovanii ili razrabotke. M.: Izd-vostandartov; 1989. 119 s. [GOST 40.9001-88. Quality systems. Model of the quality system in the design or development. Moscow: Izd-vostandartov; 1989. 119 p. (In Russ.)]
5. Mezhdunarodnyi standart ISO 9001:1994. Sistemy kachestva. Model' obespecheniya kachestva pri proektirovanii, razrabotke, proizvodstve, montazhe i obsluzhivanii. M.: Izd-vostandartov, 1996; 94 s. [International standard ISO 9001: 1994. Quality systems. Model of quality assurance in the design, development, production, installation and maintenance. Moscow: Izd-vostandartov, 1996; 94 s. (In Russ.)]
6. Inmon U., Fridman L. Metodologiya ekspertnoi otsenki proektnykh reshenii dlya sistem s bazami dannykh. M.: Finansy i statistika; 1986. 227 c. [Inmon U., Fridman L. Methodology of expert evaluation of design solutions for systems with databases. Moscow: Finance and Statistics; 1986. 227 c. (In Russ.)]
7. Ankhimiyuk V.L., Oleiko O.F., Mikheev N.N. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. M.: Dizain PRO; 2002. [Ankhimiyuk V.L., Oleiko O.F., Mikheev N.N. Theory of automatic control. M.: Dizain PRO; 2002. (In Russ.)]
8. Besekerskii V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya. SPb.: Professiya; 2003. [Besekerskii V.A., Popov E.P. The theory of automatic control systems. SPb.: Professiya; 2003. (In Russ.)]
9. Vendrov A.M. CASE-tekhnologii. Sovremennye metody i sredstva proektirovaniya informatsionnykh sistem. M.: Finansy i statistika; 2003. [Vendrov A.M. CASE-technology. Modern methods and means of designing information systems. Moscow: Finance and Statistics; 2003. (In Russ.)]
10. Gavrilin Yu.F., Demchenko A.I., Katochkov V.M. Informatsionnye tekhnologii upravleniya: Ucheb. Posobie. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU; 2003. [Gavrilin Yu.F., Demchenko A.I., Katochkov V.M. Information technology management: tutorial. Chelyabinsk: Publishing house of YuUrGU; 2003. (In Russ.)]
11. Bernson A. Data Warehousing: Architecture and Technology. Los Angeles: McGraw-Hill So; 1997. 512 p.
12. Semenov S.S. Otsenka kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh sistem. Praktika primeneniya metodov ekspertnykh otsenok. M.: Lenand; 2015. 352 s. [Semenov S.S. Assessment of the quality and technical level of complex systems. The practice of applying expert assessment methods. Moscow: Lenand; 2015. 352 p. (In Russ.)]
13. Martin Dzh. Planirovanie razvitiya avtomatizirovannykh sistem. M.: Finansy i statistika; 1984. 196 s. [Martin Dzh. Planning for the development of automated systems. Moscow: Finance and Statistics; 1984. 196 p. (In Russ.)]
14. Chastikov A.P., Gavrilova T.A., Belov D.L. Razrabotka ekspertnykh sistem. Sreda CLIPS. SPb: BKhV-Peterburg; 2003. 396 s. [Chastikov A.P., Gavrilova T.A., Belov D.L. Development of expert systems. CLIPS environment. SPb: BKhV-Peterburg; 2003. 396 p. (In Russ.)]
15. Lyuger D.F. Iskusstvennyi intellekt: Strategii i metody resheniya slozhnykh problem. M.: Izdat. dom «Vil'yams»; 2005. [Lyuger D.F. Artificial Intelligence: Strategies and methods for solving complex problems. Moscow: Publishing house «Williams»; 2005. (In Russ.)]
16. Devyatkov V.V. Sistemy iskusstvennogo intellekta: Ucheb. posobiedlyavuzov (Pod red. I.B. Fedorova). M.: Izd-vo MGTU; 2001. [Devyatkov V.V. Systems of artificial intelligence: tutorial for high schools (Edited by I.B. Fedorov). Moscow: Izd-vo MSTU; 2001. (In Russ.)]
17. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyi iintellekt: sovremennyyi podkhod. M.: Izdat. dom «Vil'yams»; 2007. [Rassel S., Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. Moscow: Publishing house «Williams»; 2007. (In Russ.)]
18. Nedbai A.A., Merzlikina N.V. Osnovy kvalimetrii. Versiya 1.0 [Elektronnyiresurs]: elektron. ucheb. posobie. Elektron. dan. (2 Mb). Krasnoyarsk : IPK SFU; 2008. (Kvalimetriya: UMKD № 104-2007 / ruk. tvorch. kollektiva A.A. Nedbai). [Nedbai A.A., Merzlikina N.V. Fundamentals of qualimetry. Version 1.0 [Electronic resource]:

- electronic tutorial. Electronic Data (2 MB). Krasnoyarsk: IPK SFU; 2008. (Qualification: Educational and Cultural Institute № 104-2007 / head of the creative team A.A. Nedbai). (In Russ.)]
19. Chekmarev A.N. Kvalimetriya i upravleniekachestvom. Ch.1. Kvalimetriya: ucheb. posobie. Samara: Izd-vo Samar. gos. Aerokosm. un-ta; 2010. 172 s. [Chekmarev A.N. Qualimetry and quality management. Part 1. Qualimetry: tutorial. Samara: Izd-vo Samar. gos. Aerokosm. un-ta; 2010. 172 p. (In Russ.)]
 20. Greshilov A.A. Matematicheskie metody prinyatiya reshenii: Ucheb. Posobie dly avuzov. M.: Izd-vo MGTU im. Baumana; 2006. 584 s. [Greshilov A.A. Mathematical methods of decision making: tutorial for universities. Moscow: Izd-vo MSTU; 2006. 584 p. (In Russ.)]
 21. Kotsyuba I. Yu., Chunaev A.V. i dr. Metodyotsenki i izmereniya kharakteristik informatsionnykh sistem. Uchebnoe posobie. SPb: universitet ITMO; 2015. 264 s. [Kotsyuba I. Yu., Chunaev A.V. et al. Methods for assessing and measuring the characteristics of information systems. Tutorial. St. Petersburg: ITMO University; 2015. 264 p. (In Russ.)]
 22. Aleksandrovskaya L.N., Kruglov V.I., Kuznetsov A.G. i dr. Teoreticheskie osnovy ispytaniya i eksperimental'naya otrabotka slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Ucheb. posobie. M.: Logos; 2003. 734 s. [Aleksandrovskaya L.N., Kruglov V.I., Kuznetsov A.G. i dr. Theoretical bases of tests and experimental testing of complex technical systems. Tutorial. Moscow: Logos; 2003. 734 p. (In Russ.)]
 23. Dudarenko N.A., Nuiya O.S., Serzhantova M.V., Slita O.V., Ushakov A.V. Matematicheskie osnovy teorii sistem: lektsionnykursi praktikum. Uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedenii (Podred. A.V. Ushakova). SPb.: NIU ITMO; 2014. 292 s. [Dudarenko N.A., Nuiya O.S., Serzhantova M.V., Slita O.V., Ushakov A.V. Mathematical foundations of the theory of systems: lecture course and practical work. Textbook for higher educational institutions (Edited by A.V. Ushakov). SPb.: NIU ITMO; 2014. 292 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Силенок Юрий Викторович - ассистент кафедры информационных систем и технологий.

Яковлев Вадим Лаврович - старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий.

Information about the authors:

Yuri V. Silenok – Assistant, Department of Information Systems and Technologies.

Vadim L. Yakovlev - Senior Lecturer, Department Information Systems and Technologies.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.09.2017.

Принята в печать 10.10.2017

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.09.2017.

Accepted for publication 10.10.2017

Для цитирования: Агаханова К.М. Разделение вытяжных гравитационных систем вентиляции на зоны в жилых домах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):132-140. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-132-140

For citation: Agakhanova K.M. Zoning of exhaust gravitational ventilation systems in residential buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):132-140. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-132-140

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.922

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-132-140

РАЗДЕЛЕНИЕ ВЫТЯЖНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ЗОНЫ В ЖИЛЫХ ДОМАХ

Агаханова К.М.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Россия,
e-mail: kaminat29@mail.ru

Резюме: *Цель.* Статья посвящена анализу систем приточно-вытяжной вентиляции в жилых домах массового строительства с целью обоснования необходимости в разделении гравитационных вытяжных систем вентиляции на зоны на примере девятнадцатиэтажного жилого дома. *Метод.* Необходимость в зонировании системы вентиляции определяется путем традиционного аэродинамического расчета, который в данной статье выполняется при помощи универсальных программ, составленных в вычислительных системах, таких как Excel и Mathcad. *Результат.* Выполняется аэродинамический расчет естественной системы вентиляции выбранного объекта для нескольких вариантов: реально спроектированной в данном здании схемы естественной вентиляции (разделение вытяжной гравитационной системы вентиляции на два сборных вертикальных канала с подключенными к нему индивидуальными спутниками); традиционной схемы естественной вентиляции (идентичная схема, но с одним сборным вертикальным каналом). Анализ полученных результатов не дает однозначного ответа о необходимости зонирования вытяжных систем. Для точного определения необходимости зонирования системы вентиляции были проведены аэродинамические расчеты в 40 и 60-ти этажных домах такой же планировки. При аэродинамическом расчете определялись потери давления на участках системы как сумма потерь давления на трение и в местных сопротивлениях. Полученные значения должны были соответствовать требуемой невязке. Сложность заключалась в определении коэффициентов местных сопротивлений (КМС) тройников в связи с большим разнообразием расчетных формул и табличных значений. *Вывод.* Анализ полученных результатов аэродинамического расчета выбранных систем естественной вентиляции определяет необходимость в разделении вытяжных систем на зоны по вертикали здания.

Ключевые слова: приточно-вытяжная вентиляция, жилые дома, зонирование системы, аэродинамический расчет

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

ZONING OF EXHAUST GRAVITATIONAL VENTILATION SYSTEMS
IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Kaminat M. Agakhanova

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow 129337, Russia,
e-mail: kaminat29@mail

Abstract. Objectives The article is devoted to an analysis of the systems of supply and exhaust ventilation in mass-constructed residential buildings with the purpose of justifying the need for separation of gravitational exhaust ventilation systems into zones on the example of a nineteen-storey residential building. **Methods** The need for zoning of the ventilation system is determined by the traditional aerodynamic calculation, which in this article is carried out using universal programmes compiled in computational systems such as Excel and Mathcad. **Results** An aerodynamic calculation of the natural ventilation system of the selected object is carried out for several options: the ventilation scheme actually designed in this building (separation of the exhaust gravitational ventilation system into two prefabricated vertical channels with individual satellites connected to it) and the traditional scheme of natural ventilation (identical scheme, but with a single prefabricated vertical channel). Analysis of the results does not give an unambiguous answer concerning the need for zoning of exhaust systems. For an accurate determination of the necessity of zoning the ventilation system, aerodynamic calculations were carried out for 40 and 60-storey buildings having the same layout. In the aerodynamic calculation, pressure losses of the system sections were determined as the sum of pressure losses due to friction and in local resistances. The obtained values had to correspond to the required discrepancy. The difficulty is in the determination of the coefficients of local resistances (CLR) of triple junctions due to the wide variety of calculation formulas and tabulated values. **Conclusion** The analysis of the results of the aerodynamic calculation of the selected natural ventilation systems determines the need for zoning the exhaust systems along the building's vertical aspect.

Keywords: supply and exhaust ventilation, residential buildings, system zoning, aerodynamic calculation

Введение. В жилых домах наблюдается сложный характер воздухообмена, который определяется как гравитационным давлением в самом здании, внутренней планировкой здания, воздухопроницаемостью его наружных и внутренних ограждений и т. д., так и работой систем вентиляции.

Недооценка или неправильный расчет общего воздухообмена в зданиях приводят к существенному ухудшению состояния воздушной среды и микроклимата в отдельных помещениях, особенно в жилых домах. Воздухообмен в жилых зданиях с системой естественной вентиляции в большей степени зависит от принятых планировочных решений, воздухопроницаемости ограждений, схем вентиляции и климатических условий местности.

В последнее время наблюдается увеличение этажности жилых домов, что существенно оказывает влияние на работу системы вентиляции. В данной статье основное внимание уделено разработке схем системы вентиляции и их работе в многоэтажных жилых домах.

Постановка задачи. Целью исследования является определение необходимости зонирования гравитационных вытяжных систем вентиляции в жилых многоэтажных зданиях с целью обеспечения требуемого воздухообмена в них.

Методика исследования. Для обоснования принятого проектировщиками решения о зонировании системы выполняется аэродинамический расчет реально спроектированной системы вентиляции в жилом доме и системы с одним сборным каналом с подключенными к нему ответвлениями со 2 по 17 этажи; два последних этажа вентилируются индивидуальными вы-

тяжными каналами, оборудованные бытовыми вентиляторами. Расчет выполняется в вычислительных системах, а именно в Excel и Mathcad.

Обсуждение результатов. Проектирование систем вентиляции в жилых домах выполняется в соответствии с нормативными документами [1–6], которые идентичны зарубежным рекомендациям [16–20]. Системы могут быть [2] как с естественным [9–13], так и с механическим [5,8] притоком и удалением воздуха.

Чаще всего в жилых домах применяют системы с естественным притоком и удалением воздуха. В жилые комнаты подается приточный воздух через устройства приточных клапанов в окнах, либо в наружных стенах или через фрамуги окон, форточки. Удаление воздуха из соответствующих помещений (кухонь, сан.узлов, кладовок) [6] осуществляется с помощью вертикальных сборных каналов, к которым подключаются ответвления–спутники длиной не менее 2 м. Последние два этажа вентилируются индивидуальными вытяжными каналами, которые оборудованы бытовыми вентиляторами [1].

Воздух из систем может удаляться несколькими способами в зависимости от наличия или отсутствия теплого чердака [1,6]. Возможно два варианта выброса воздуха: с выводом каждого стояка выше уровня кровли; с тёплым чердаком.

В первом случае шахты заканчиваются зонтом или дефлектором. Во втором случае предусматривается одна вытяжная шахта на все стояки, высота которой должна быть более 4,5 м над перекрытием последнего этажа. Каждый стояк имеет оголовок – диффузор для уменьшения потерь давления; делается поддон с отводом в канализацию дождевой воды.

В качестве примера была выбрана 19-ти этажная секция жилого дома (рис.1). Жилые этажи запроектированы со 2-го по 19-й этаж. Над последним этажом находится технический чердак. На жилых этажах расположены три квартиры: одна 3-х комнатная и две 2-х комнатные. В секции запроектирован лифтовой холл с пассажирскими лифтами и выходом на незадымляемую лестницу. Три квартиры и лестнично-лифтовой холл выходят в коридор, расположенный на каждом этаже.

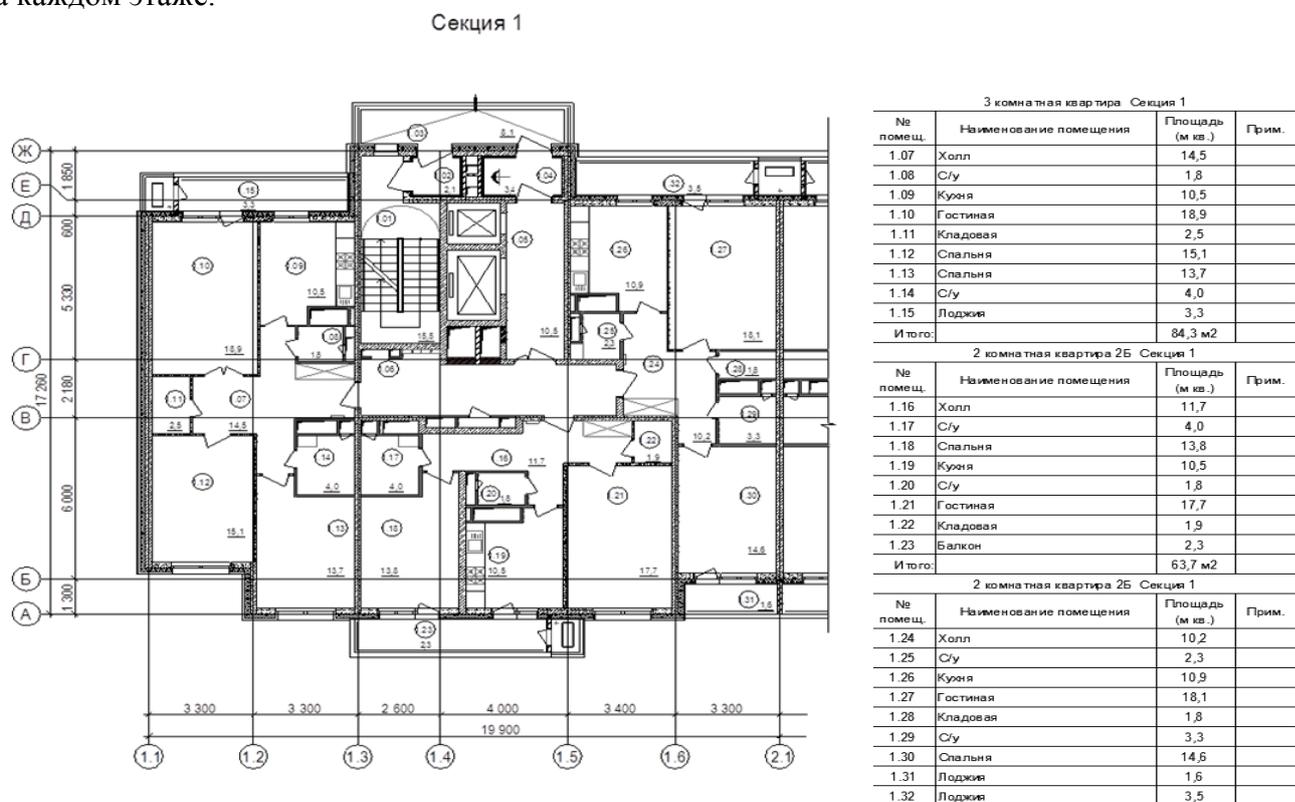


Рис. 1. План с экспликацией типового этажа секции девятнадцатизэтажного жилого дома
Fig. 1. A plan with an explication of the floor of a section of a nineteen-story house

В жилых помещениях предусматривается естественная система приточно-вытяжной вен-

тиляции, которая описана выше. Величина воздухообмена принята в соответствии с [1,5]. Удаление воздуха предусматривается их кухонь, ванных и с/у в объеме:

1. Кухня, расчётный объём вытяжки – 60 м³/ч;
2. Ванная – 50 м³/ч;
3. Туалет – 25 м³/ч.

Отличием является обслуживание помещений одного назначения по следующей зональной схеме:

1. 2 – 11 эт.;
2. 12 – 18 эт.;
3. 19 эт.

Зонирование систем таким образом можно обосновать путем расчета, в процессе которого становится ясно, работает ли вентиляционный канал на определенном этаже или нет. Обслуживание лишь последнего этажа, а не последних двух, аргументируется проектировщиками как нехватка места в вентиляционной шахте.

Есть примеры таких систем в литературе. Например, в [7,13] высотные дома делятся не на две, а даже на большее количество зон.

Аэродинамический расчет начинается с расчета индивидуальных каналов, обслуживающих последние этажи. Затем приступаем к расчету сборных каналов.

Расчет ведется при условии внешней среды $t = +5$ °С.

Определяем расчетное давление в главном расчетном направлении (направление от решетки последнего этажа до устья вытяжной шахты) [9]:

$$\Delta p = gh(\rho_{нар} - \rho_{вн}), \text{ Па} \quad (1)$$

где: g – ускорение силы тяжести, м/с²; h – длина направления, м; $\rho_{нар}, \rho_{вн}$ – плотность наружного и внутреннего воздуха, кг/м³.

После чего, вычисляем потери давления на преодоление сил трения участков сети и потерь в местных сопротивлениях, как главного расчетного ответвления, так и других направлений (рис. 2):

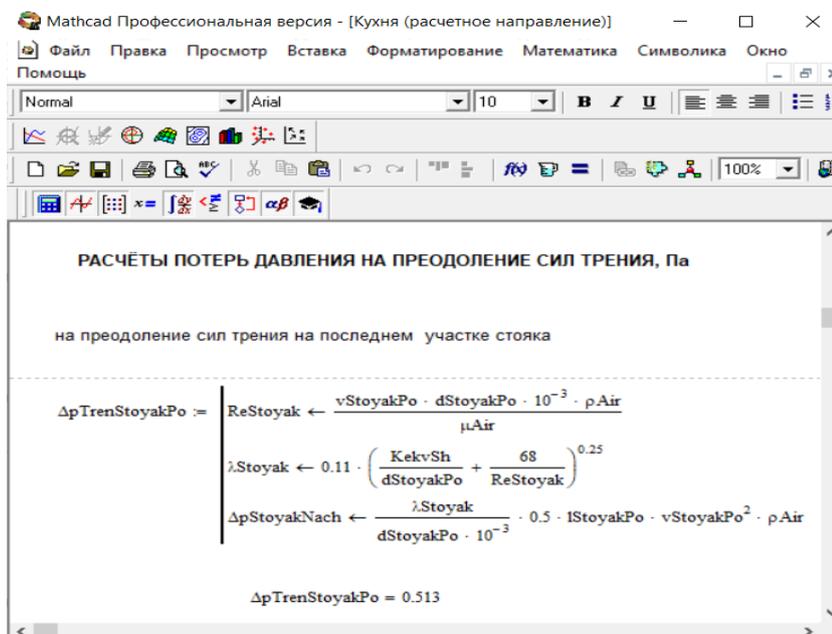


Рис. 2. Фрагмент программы: расчет сопротивления давления на преодоления сил трения в главном расчетном направлении

Fig. 2. Fragment of the program: calculation of the pressure resistance to overcome frictional forces in the main design direction

– на преодоление сил трения [14]:

$$\Delta p = \frac{\lambda}{d} l \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Па} \quad (2)$$

где: λ - коэффициент трения; d - диаметр воздуховода, м; l - длина воздуховода, м; v - скорость воздуха, м/с.

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_{\text{э}}}{d_v} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} \quad (3)$$

где: $k_{\text{э}}$ - эквивалентная шероховатость воздуховода, мм; Re - число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (4)$$

где: μ - коэффициент динамической вязкости, Па·м.

– в местных сопротивлениях [9]:

$$\Delta p = \sum \zeta \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Па} \quad (5)$$

где: $\sum \zeta$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений (КМС) участков, к которым относятся отводы, тройники, клапаны, внезапные сужения/расширения и т.д.

Вычисление КМС тройников «на проход» и «на ответвление» выполняется по способу профессора Каменева П.Н. [15].

Основа способа расчета КМС тройников – соотношение скорости воздуха в стволовой части тройника и наивыгоднейшей скорости смешивания v_{33} , при которой наблюдаются минимальные потери энергии в тройнике при смешивании потоков воздуха (рис. 3).

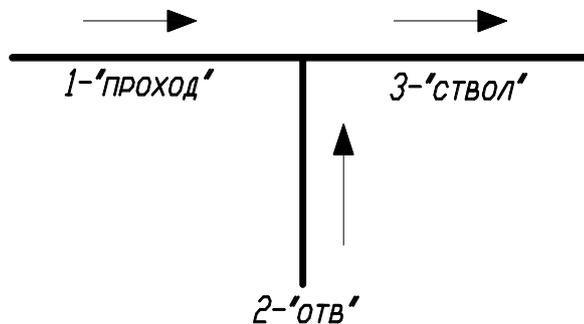


Рис.3. Схема смешивания потоков в тройнике

Fig.3. Diagram of flow mixing in tee

Цифры соответствуют:

- 1 – проходная часть тройника;
- 2 – ответвление;
- 3 – стволовая часть тройника.

При смешивании воздушных потоков в тройниках происходит потеря энергии, величина которых определяется по величине скорости в стволовой части тройника v_3 .

Скорость, при которой потери энергии от смешивания потоков минимальны, принято называть *наивыгоднейшей скоростью смешивания*, обозначается как v_{33} .

Наивыгоднейшая скорость v_{33} вычисляется как:

$$v_{33} = \frac{L_1}{L_3} v_1 \cos \alpha_1 + \frac{L_2}{L_3} v_2 \cos \alpha_2 \quad (6)$$

В нашей системе вентиляции угол между осями «прохода» и «ствола» равен 0, поэтому $\cos \alpha_2 = 0$, а ответвления подсоединяются к сборному стояку под углом 90° , для которого $\cos \alpha_1 = 1$.

В таком случае формула (6) примет вид:

$$v_{33} = \frac{L_1}{L_3} v_1 \quad (7)$$

Но наименьшие потери в тройнике имеют место, если скорость в стволе тройника равна наивыгоднейшей.

Если фактическая скорость в стволовой части тройника (после смешивания) менее наивыгоднейшей скорости смешивания происходит внезапное расширение потока, в обратном случае происходит внезапное сужение потока.

Рассчитываем КМС для трех различных случаев.

А) скорость в «стволе» v_3 равна наивыгоднейшей скорости смешивания потоков:

$$v_3 = v_{33}$$

- «проход»

$$\zeta_1 = \left[\left(\frac{v_1}{v_{33}} \right)^2 - 1 \right] \quad (8)$$

- «ответвление»

$$\zeta_2 = \left[\left(\frac{v_2}{v_{33}} \right)^2 - 1 \right] \quad (9)$$

б) сужение потока - $v_3 > v_{33}$

- «проход»

$$\zeta_1 = \left(\frac{v_1}{v_{33}} \right)^2 - \left(\frac{v_{33}}{v_3} \right) + 0,525 \left(1 - \frac{v_{33}}{v_3} \right) \quad (10)$$

- «ответвление»

$$\zeta_2 = \left(\frac{v_2}{v_{33}} \right)^2 - \left(\frac{v_{33}}{v_3} \right) + 0,525 \left(1 - \frac{v_{33}}{v_3} \right) \quad (11)$$

в) расширение потока $v_3 < v_{33}$

- «проход»

$$\zeta_1 = \left(\frac{v_1}{v_3} \right)^2 - \left(\frac{v_{33}}{v_3} \right)^2 + \left(\frac{v_{33}}{v_3} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

- «ответвление»

$$\zeta_2 = \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^2 - \left(\frac{v_{33}}{v_3} \right)^2 + \left(\frac{v_{33}}{v_3} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

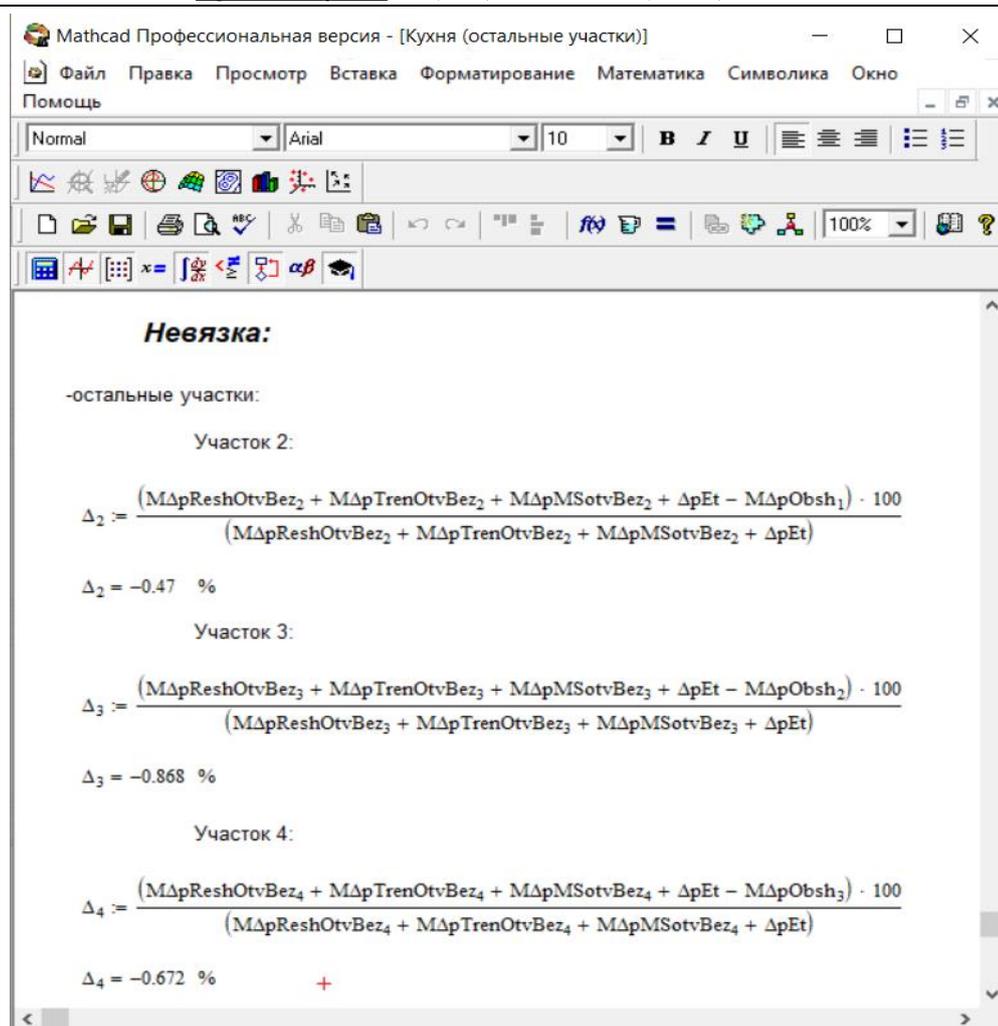


Рис. 4. Фрагмент программы: расчет невязки на остальных направлениях
Fig. 4. Fragment of the program: calculation of the discrepancy in other directions

После определения суммы потерь давления в главном расчетном направлении и в прочих направлениях вычисляется невязка на участках: для главного расчетного направления запас давления на неучтенные потери составляет 5-10%; для остальных направлений невязка должна быть не более 10%

Вывод. Полученные при аэродинамическом расчете смонтированной системы вентиляции результаты показали хорошую сходимость невязок на всех участках (рис. 4). Схема системы вентиляции с одним сборным каналом так же показала невязку на всех участках в пределах допустимых значений, но близких к граничным. При такой этажности жилого дома тяжело определить, есть ли необходимость в разделении системы вентиляции на зоны.

Для подтверждения данной теории был проведен аэродинамический расчет систем вентиляции этого же жилого здания, но этажностью в 40 и 60 этажей.

Расчет показал правомерность данного решения. Начиная с 16-го этажа система с трудом поддается увязке, а на последних этажах достичь ее и вовсе не получается. Вдобавок ко всему, скорость на участках стояка увеличивается по высоте и достигает 5 – 6м/с, что недопустимо для естественной системы вентиляции.

Благодаря проведенным расчетам и полученным по ним результатам подтверждена необходимость зонирования системы вентиляции в жилых многоэтажных домах. Система вентиляции с одним сборным коробом не обеспечивает хорошую работу системы вентиляции в многоэтажных жилых домах.

Библиографический список:

1. СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2016. – 58с.
2. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: Минрегион России. 2012. 62с.
3. СП 73.13330.2016. Внутренние санитарно-технические системы зданий. Актуализированная редакция СНиП 3.05.01-85. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2016. 93с.
4. Р НП«АВОК» 5.2-2012. Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах жилых зданий. – М.: НП «АВОК». 2012. 26с.
5. СП 253.1325800.2016. Инженерные системы высотных зданий. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2016. 58с.
6. ТО-06-17640. Пособие по проектированию принципиальных схем систем вентиляции и противодымной вентиляции в жилых, общественных зданиях и стоянках автомобилей: примеры схем и решений. Огнестойкие воздуховоды. Противопожарные клапаны и дымовые клапаны. – М.: ОАО «Моспроект». 2007. – 192с.
7. Ливчак, И. Ф. Особенности вентиляции высотных жилых домов/ И. Ф. Ливчак, Т. А. Мелик-Аракелян// АВОК. – 2003. – №8. – С. 12 – 19.
8. Ливчак И.Ф., Наумов А.Л. Вентиляция многоэтажных жилых зданий. – М.: АВОК – ПРЕСС, 2005. – 136 с.
9. Малахов, М.А. Усовершенствование вентиляции жилых зданий/ М.А. Малахов//АВОК. 2009. №4. С. 16 – 19.
10. Малахов, М.А. Опыт проектирования естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками/ М.А. Малахов, А.Е. Савенков//АВОК. 2008. №6. С. 20 – 31.
11. Малахов, М.А. Системы естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками/М.А. Малахов//АВОК. 2006. №7. С. 8 – 19.
12. Малявина, Е. Г. Вентиляция жилых домов с теплым чердаком/ Е. Г. Малявина, С. В. Бирюков, С. Н. Дианов// АВОК. 2004.-№3. С. 14 – 19.
13. Шилкин, Н.В. Возможность естественной вентиляции для высотных зданий/ Н.В. Шилкин// АВОК. – 2005. – №1. – С.18 – 25.
14. Тертичник Е.И. Вентиляция. – М.: Изд – во АСВ, 2015. 608с.
15. Каменев П. Н. Гидроэлеваторы в строительстве. - М.: Стройиздат, 1970. С.26–34.
16. Standard 62.2-2016. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE). 2016.
17. Handbook of Fundamentals, Chapter 26. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE). 2017.
18. Omrani, S. Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools/ S. Omrani, V. Garcia-Hansen, B. Capra, R. Drogemulle// Building and Environment. – 2017. –P. 182-194.
19. Carrer, P. What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?/P.Carrer, P.Wargocki, A.Fanetti, W. Bischof, E.Fernandes, T.Hartmann, S.Kephalopoulos, S.Palkonen, O.Seppänen// Building and Environment. – 2015. – P. 273-286.
20. JonesaB. A review of ventilation opening area terminology/ B.Jonesa, M.Cook, S.Fitzgerald, C.Iddon// Energy and Buildings. – 2016. – P. 249-258.

References:

1. SP 54.13330.2016. Zdaniya zhilye mnogokvartirnye. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 31-01-2003. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogokhozyaistva Rossiiskoi Federatsii. 2016. 58 s. [SP 54.13330.2016. Residential multi-apartment buildings. Updated version of SNiP 31-01-2003. Moscow: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. 2016. 58 p. (In Russ.)]
2. SP 60.13330.2012. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 41-01-2003. M.: MinregionRossii. 2012. 62 s. [SP 60.13330.2012. Heating, ventilation and air conditioning. Updated version of SNiP 41-01-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation. 2012. 62 p. (In Russ.)]
3. SP 73.13330.2016. Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie sistemy zdanii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.05.01-85. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii. 2016. 93 s. [SP 73.13330.2016. Internal sanitary and technical systems of buildings. Updated version of SNiP 3.05.01-85. Moscow: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. 2016. 93 p. (In Russ.)]
4. R NP«АВОК» 5.2-2012. Tekhnicheskie rekomendatsii po organizatsii vozdukhoobmena v kvartirakh zhilykh zdanii. M.: NP «АВОК». 2012. 26 s. [R NP«АВОК» 5.2-2012. Technical recommendations on the organisation of air exchange in apartments of residential buildings. Moscow: NP «АВОК». 2012. 26 p. (In Russ.)]
5. SP 253.1325800.2016. Inzhenernyye sistemy vysotnykh zdanii. M.: Ministerstvostroitel'stva i zhilishchno-

- kommunal'nogokhozyaistva Rossiiskoi Federatsii. 2016. 58 s. [SP 253.1325800.2016.Engineering systems of high-rise buildings. Moscow: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. 2016. 58 s. (In Russ.)]
6. TO-06-17640. Posobie po proektirovaniyu printsipial'nykh skhem sistem ventilyatsii i protivodymnoi ventilyatsii v zhilykh, obshchestvennykh zdaniyakh i stoyankakh avtomobilei: primery skhem i reshenii. Ognestoikie vozdukhovody. Protivopozharnye klapany i dymovye klapany. M.: OAO «Mosproekt». 2007. 192 s. [TO-06-17640. Manual for the design of schematic diagrams of ventilation and smoke ventilation systems in residential, public buildings and car parks: examples of schemes and solutions. Fireproof ducts. Fire and flue valves. Moscow: OJSC «Mosproekt». 2007. 192 p. (In Russ.)]
 7. Livchak I.F., Melik-Arakelyan T.A. Osobennosti ventilyatsii vysotnykh zhilykh domov. AVOK. 2003;8:12 – 19. [Livchak I.F., Melik-Arakelyan T.A. Features of ventilation of high-rise residential buildings. ABOK. 2003;8:12 – 19. (In Russ.)]
 8. Livchak I.F., Naumov A.L. Ventilyatsiya mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy. M.: AVOK-Press; 2005. 133 s. [Livchak I.F., Naumov A.L. Ventilation of multi-storey residential buildings. M.: ABOK-Press; 2005. 133 p. (In Russ.)]
 9. Malakhov M.A. Usovshenstvovanie ventilyatsii zhilykh zdaniy. AVOK. 2009;4:16 – 19. [Malakhov M.A. Improvement of ventilation of residential buildings. ABOK. 2009;4:16 – 19. (In Russ.)]
 10. Malakhov M.A., Savenkov A.E. Opyt proektirovaniya estestvenno-mekhanicheskoi ventilyatsii v zhilykh zdaniyakh s teplymi cherdakami. AVOK. 2008;6: 20 – 31. [Malakhov M.A., Savenkov A.E. Experience in designing natural-mechanical ventilation in residential buildings with warm attics. ABOK. 2008; 6: 20 – 31. (In Russ.)]
 11. Malakhov M.A. Sistemy estestvenno-mekhanicheskoi ventilyatsii v zhilykh zdaniyakh s teplymi cherdakami. AVOK. 2006;7:8 – 19. [Malakhov M.A. Systems of natural-mechanical ventilation in residential buildings with warm attics. ABOK. 2006;7:8 – 19. (In Russ.)]
 12. Malyavina E.G., Biryukov S.V., Dianov S.N. Ventilyatsiya zhilykh domov s teplym cherdakom. AVOK. 2004;3:14 – 19. [Malyavina E.G., Biryukov S.V., Dianov S.N. Ventilation of residential buildings with a warm attic. ABOK. 2004;3:14 – 19. (In Russ.)]
 13. Shilkin N.V. Vozmozhnost' estestvennoi ventilyatsii dlya vysotnykh zdaniy. AVOK. 2005;1:18 – 25. [Shilkin N.V. The possibility of natural ventilation for high-rise buildings. AVOK. 2005;1:18 – 25. (In Russ.)]
 14. Tertchnik E.I. Ventilyatsiya. M.: Izd – vo ASV; 2015. 608 s. [Tertchnik E.I. Ventilation. Moscow: Publishing House ASV; 2015. 608 p. (In Russ.)]
 15. Kamenev P.N. Hidroelevatory v stroitel'stve. M.: Stroiizdat; 1970. S. 26–34. [Kamenev P.N. Hydroelevators in construction. Moscow: Stroiizdat; 1970. P. 26–34. (In Russ.)]
 16. Standard 62.2-2016. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE). 2016.
 17. Handbook of Fundamentals, Chapter 26. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE). 2017.
 18. Omrani S., Garcia-Hansen V., Capra B., Drogemulle R. Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools. Building and Environment. 2017;116:182-194.
 19. Carrer P., Wargocki P., Fanetti A., Bischof W., Fernandes E., Hartmann T., Kephelopoulos S., Palkonen S., Seppänen O. What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings? Building and Environment. 2015;94:273-286.
 20. Jonesa B., Cook M., Fitzgerald S., Iddon C. A review of ventilation opening area terminology. Energy and Buildings. 2016;118:249-258.

Сведения об авторе:

Агаханова Каминат Мурадовна – ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Information about the author:

Kaminat M. Agakhanova – Assistant, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.09.2017.

Received 01.09.2017.

Принята в печать 02.10.2017.

Accepted for publication 02.10.2017.

Для цитирования: Жильникова Т.Н., Корянова Ю.И., Несветаев Г.В. Влияние продолжительности твердения на деформационно-прочностные показатели бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением при твердении в воде. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):141-150. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-141-150

For citation: Zhil'nikova T.N., Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V. Effect of hardening time on deformation-strength indicators of concrete for injection with a two-stage expansion during hardening in water. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(4):141-150 (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-141-150

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.335/ 691.542

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-141-150

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТВЕРДЕНИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕТОНОВ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ С ДВУХСТАДИЙНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ПРИ ТВЕРДЕНИИ В ВОДЕ

Жильникова Т.Н.¹, Корянова Ю.И.², Несветаев Г.В.³

¹⁻³ Донской государственный технический университет,

¹⁻³ 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д.1, Россия,

¹ e-mail: zhilnikova.tatjana@yandex.ru, ² e-mail: koryanova.yi@mail.ru,

³ e-mail: nesgrin@yandex.ru,

Резюме. Цель. Бетоны для инъектирования с двухстадийным расширением являются разновидностью напрягающих бетонов, получаемых с использованием напрягающего цемента. Целью исследования является изучение влияния продолжительности выдерживания на пористость, прочность и самонапряжение твердеющих в воде бетонов в зависимости от величины расширения в первой стадии. В первой стадии происходит расширение уплотненной бетонной смеси, обеспечивающее полное заполнение опалубочного пространства. Во второй стадии происходит расширение твердеющего бетона вследствие образования повышенного количества этtringита. Этот процесс продолжителен во времени, а величина самонапряжения и прочности зависит от условий твердения. **Метод.** Экспериментальная оценка самонапряжения, прочности и пористости бетонов, длительно твердеющих в воде, воздушно-влажных и воздушно-сухих условиях после различной величины расширения в первой стадии. Самонапряжение цементного камня является результатом наложения двух процессов: упрочнения структуры за счет гидратации силикатов и расширения в результате гидратации алюминатов кальция с последующим образованием этtringита. Величина самонапряжения определяется соотношением этих двух процессов. Самонапряжение цементного камня изменяется аналогично изменению его расширения. Стабилизация расширения сопровождается стабилизацией самонапряжения цементного камня. **Результат.** Выявлена взаимосвязь самонапряжения, прочности и пористости бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением от продолжительности и влажностных условий твердения с учетом условий ограничения деформаций в первой стадии. **Вывод.** При длительном твердении в водной среде наблюдается снижение показателей самонапряжения до 25% при исключении расширения в первой стадии и до 20% при увеличении объема до 5% в первой стадии. Увеличение прочности на сжатие составляет до 28% относительно 28-суточной.

Ключевые слова: напрягающий бетон, бетоны для инъектирования, двухстадийное расширение, водное выдерживание, деформационно-прочностные показатели, продолжительность твердения, напрягающий цемент, деформации расширения, самонапряжение, прочность, пористость

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

EFFECT OF HARDENING TIME ON DEFORMATION-STRENGTH INDICATORS
OF CONCRETE FOR INJECTION WITH A TWO-STAGE EXPANSION DURING
HARDENING IN WATER

Tatjana N. Zhilnikova¹, Yulia I. Koryanova², Grigory V. Nesvetaev³

¹⁻³ Don State Technical University,

¹⁻³ 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

¹ e-mail: zhilnikova.tatjana@yandex.ru, ² e-mail: koryanova.yi@mail.ru,

³ e-mail: nesvetaev@yandex.ru

Abstract. Objectives Concretes for injection with a two-stage expansion are a kind of self-stressing concrete obtained with the use of self-stressing cement. The aim of the work is to study the influence of the duration of aging on the porosity, strength and self-stress of concrete hardening in water, depending on the expansion value at the first stage. At the first stage, the compacted concrete mixture is expanded to ensure complete filling of the formwork space. At the second stage, the hardening concrete expands due to the formation of an increased amount of ettringite. This process is prolonged in time, with the amount of self-stress and strength dependant on the conditions of hardening. **Methods** Experimental evaluation of self-stress, strength and porosity of concretes that are permanently hardened in water, under air-moist and air-dry conditions after different expansion at the first stage. The self-stress of cement stone is the result of superposition of two processes: the hardening of the structure due to hydration of silicates and its expansion as a result of hydration of calcium aluminates with the subsequent formation of ettringite. The magnitude of self-stress is determined by the ratio of these two processes. The self-stress of the cement stone changes in a manner similar to the change in its expansion. The stabilisation of expansion is accompanied by stabilisation of self-stress of cement stone. **Results** The relationship of self-stress, strength and porosity of concrete for injection with a two-stage expansion on the duration and humidity conditions of hardening, taking into account the conditions of deformation limitation at the first stage, is revealed. **Conclusion** During prolonged hardening in an aqueous medium, self-stresses are reduced up to 25% with the exception of expansion at the first stage and up to 20% with an increase in volume up to 5% at the first stage. The increase in compressive strength is up to 28% relative to the 28-day period.

Keywords: self-stressing concrete, injectable concrete, two-stage expansion, water aging, deformation-strength characteristics, hardening time, self-stressing cement, expansion deformations, self-stress, strength, porosity

Введение. Бетоны для инъектирования с двухстадийным расширением являются разновидностью напрягающих бетонов (НБ), получаемых с использованием напрягающего цемента (НЦ). Согласно [1], влияние условий твердения на кинетику связывания гипса и воды, изменение микроструктуры и фазовые превращения в цементном камне НЦ при трех режимах твердения: воздушно-сухом, воздушно-влажном и водном, проявляется в том, что при прочих равных условиях расширение твердеющих цементов увеличивается с увеличением содержания связанной воды и количества образовавшегося этtringита.

Так, образцы водного твердения содержат максимальное количество связанной воды и этtringита в связи с более полной гидратацией и в силу этого характеризуются самым высоким расширением. При этом в поздние сроки гидратации отмечается переход этtringита в низкосульфатную форму, что связано с наличием свободных алюминатов, оставшихся после связывания гипса [1]. При хранении в воздушно-сухой среде отмечается значительно меньшее содержание связанной воды и этtringита и, соответственно, меньшее расширение. Недостаток

воды приводит к замедлению гидратации, особенно после 14 суток и сопровождается уменьшением расширения. Образцы воздушно-влажного твердения занимают по всем указанным показателям промежуточное положение [1].

Постановка задачи. Как известно, процессы роста собственных деформаций НЦ в водной среде и роста прочности цементного камня за счет гидратации цемента являются продолжительными во времени, при этом процесс расширения можно разделить на три этапа: на первом этапе расширение незначительно или совсем не фиксируется; второй этап – период активного развития деформаций происходит от 1 до 3 сут. твердения (для некоторых цементов до 7 сут. твердения); третий этап характеризуется незначительным изменением показателя расширения. В этот период происходит стабилизация деформаций цементного камня и повышение его прочности [2-9].

Расширение НЦ обычно стабилизируется к 7-14 сут. При этом величина расширения и сроки его стабилизации зависят от химико-минералогического состава клинкера, общего содержания и соотношения оксидов Al_2O_3/SO_3 , минералогического состава расширяющей добавки (РД), ее количества в составе НЦ, тонкости помола клинкерной части и РД, условий твердения [2-9].

Максимальное расширение отмечается при твердении в воде. При этом стабилизация расширения обычно наблюдается к 7 сут. твердения, но НЦ с высокой энергетической активностью может расширяться в течение более длительного времени, в т.ч. вплоть до саморазрушения при неограниченном развитии деформаций.

В последующие сроки в зависимости от условий твердения расширение не изменяется, либо несколько уменьшается. При твердении в условиях герметизации, стабилизация обычно наступает к 7 сут., и до 28 суток объем бетона практически остается постоянным. К 6 мес. возможно снижение расширения примерно на треть от 7-суточного значения. При хранении в воздушно-влажностных условиях расширение обычно наблюдается до 7 сут., затем до 28 суток остается относительно постоянным. В дальнейшем развивается усадка [10].

Методы исследования. Самонапряжение цементного камня является результатом наложения двух процессов: упрочнения структуры за счет гидратации силикатов и расширения в результате гидратации алюминатов кальция с последующим образованием этtringита. Величина самонапряжения определяется соотношением этих двух процессов. Самонапряжение цементного камня изменяется аналогично изменению его расширения. Стабилизация расширения сопровождается стабилизацией самонапряжения цементного камня [2-9].

При водном твердении рост самонапряжения наблюдается в основном до 7 сут, а затем оно изменяется незначительно. Воздушно-сухое хранение образцов обычно сопровождается некоторым снижением самонапряжения после достижения максимума в 3-суточном возрасте.

При твердении бетона в воздушно-влажностных условиях и в условиях герметизации образцов возможен рост самонапряжения до 7 сут., в последующие сроки твердения до 28 сут. его величина не изменяется, а к 6 мес. самонапряжение снижается, но в целом структура бетона остается напряженной [10]. Испытание НЦ в условиях ограничения его расширения показали, что в этом случае его прочность находится на уровне прочности исходного портландцемента и даже превосходит ее [10].

На рис. 1 представлены результаты измерения самонапряжения НБ в зависимости от продолжительности твердения в воде и условий ограничения деформаций в первой стадии.

Очевидно, что при одинаковой величине самонапряжения в 28 сут (проектный возраст), дальнейшее развитие самонапряжения при твердении в воде зависит от условий ограничения деформаций в первой стадии.

При отсутствии расширения в первой стадии (1) после проектного возраста происходит снижение величины самонапряжения на 60 и 90 сут. твердения до 20 и 25% соответственно.

При увеличении объема до 5% в первой стадии при длительном твердении в воде снижение самонапряжения начинается только после 60 суток твердения и к 90 суткам составляет 20%.

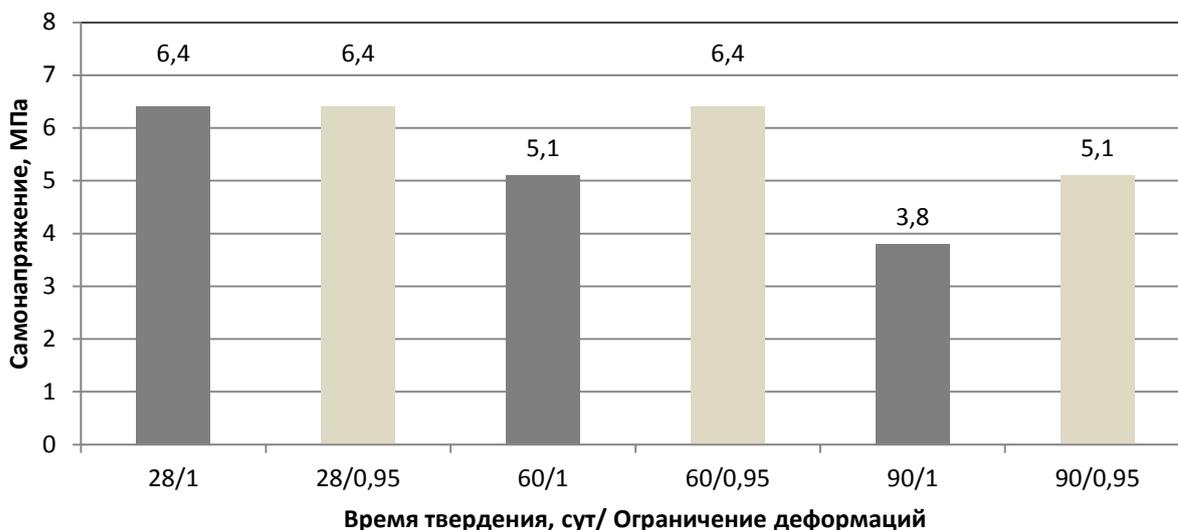


Рис.1. Самонапряжение напрягающих бетонов с двухстадийным расширением:

28, 60, 90 – продолжительность твердения в водной среде, сут.; 1 – отсутствует расширение в первой стадии; 0,95 – увеличение объема в первой стадии до 5%

Fig.1. Self-stressing expansive concrete with two-stage extension:

28, 60, 90 - continuity of hardening in an aqueous medium, day; 1 - there is no expansion in the first stage; 0,95 - increase in volume in the first stage to 5%

Самонапряжение цементного камня или бетона S_p часто представляют в виде зависимости от его прочности R , например, [10]:

$$S_p = \frac{1,26 \cdot R^2}{1000} \quad (1)$$

или, с учетом энергетической активности НЦ, $S_{p,Ц}$ [11]

$$S_p = (0,75 \cdot R - 2,65) \cdot S_{p,Ц} \quad (2)$$

Формула (1) учитывает только предел прочности бетона. Очевидно, что величина самонапряжения бетона будет определяться, как расходом НЦ, так и его энергетической активностью (маркой по самонапряжению).

Используя, например, известную формулу для прочности бетона Баженова Ю.М. – Скрамтаева Б.Г. [12] и формулу Михайлова В.В. для самонапряжения бетона [12], получим зависимость, устанавливающую связь между самонапряжением бетона $S_{p,В}$, маркой цемента по самонапряжению $S_{p,Ц}$, пределом прочности бетона на сжатие R , активностью цемента по ГОСТ 310.4 $R_{Ц}$, коэффициентом, учитывающим качество заполнителей a , и водосодержанием бетонной смеси B :

$$S_{p,В} = \sqrt{\frac{\left(\frac{R}{a \cdot R_{Ц}} - 0,5\right) \cdot B \cdot S_{p,Ц}^2 - 450}{550}} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены данные о самонапряжения НБ в зависимости от продолжительности твердения и условий развития деформаций в первой стадии.

Очевидно, что более достоверное расчетное значение самонапряжения в проектном возрасте на стадии проектирования состава напрягающего бетона можно получить, используя (3), учитывающую максимальное количество факторов, определяющих величину самонапряжения НБ.

Для расчета самонапряжения в стадии эксплуатации с учетом потерь необходимо установить влияние условий эксплуатации (влажность, температура, время) на потери самонапряжения.

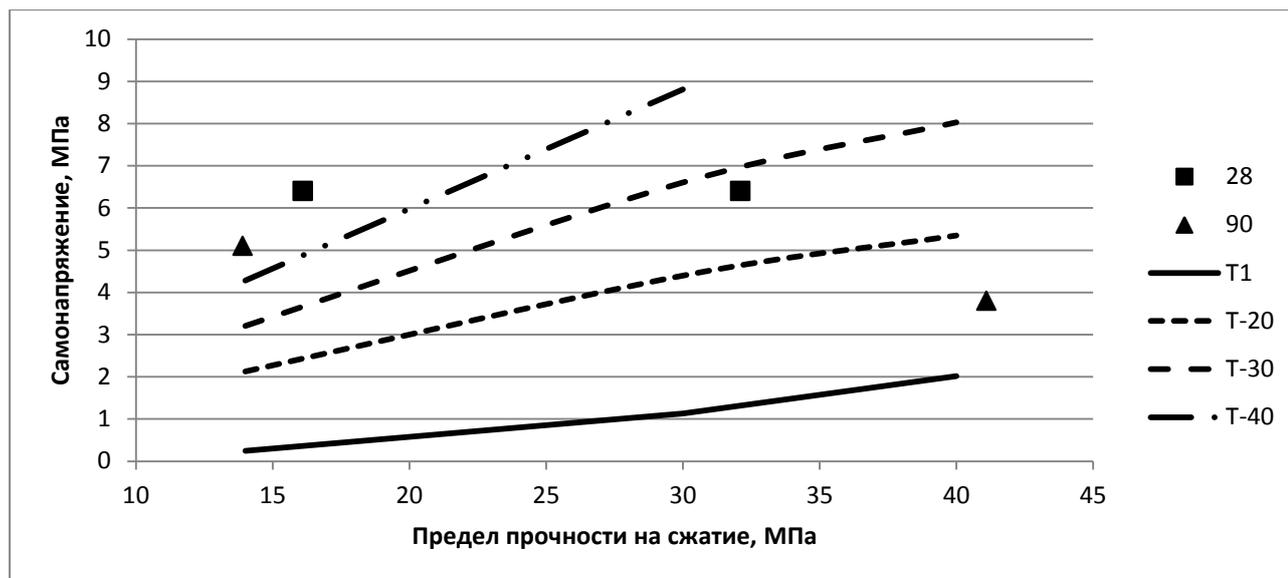


Рис. 2. Самонапряжение напрягающих бетонов с двухстадийным расширением: 28, 90 – продолжительность твердения в водной среде, сут.; T-1 по ф.(1); T-20 – по ф.(3), НЦ-20; T-30 – по ф. (3), НЦ-30

Fig. 2. Self-stressing expansive concrete with two-stage extension: 28, 90 - duration of hardening in the aquatic environment, day; T-1 according to (1); T-20 - according to (3), NC-20; T-30 - on the f. (3), NC-30

В зависимости от условий эксплуатации остаточное самонапряжение обычно составляет от 25 до 50% от проектного [2-9, 13-17].

Обсуждение результатов. Как известно, в формировании прочности цементного камня НЦ можно выделить три характерных периода:

1. Обычно до 3 сут. твердения, характеризующийся ускоренным ростом прочности;
2. От 3 до 7 сут. характеризуется, как правило, замедлением, иногда существенным, роста прочности вследствие интенсивного расширения;
3. Характеризуется нарастанием прочности на фоне стабилизации расширения. Продолжительность третьего периода может составлять несколько недель [2-9, 13-14, 17].

Прочность НЦ в первом периоде, как правило, выше прочности портландцементного камня. К 28 суткам прочность их может выровняться, а при дальнейшем твердении до 1 года прочность НЦ, как правило, становится выше прочности портландцемента [2-9].

Прочность НБ при твердении в воздушно-влажностных условиях в течение первых суток сравнительно высокая. При помещении их в воду в течение первых 3 сут. наблюдается значительное расширение, сопровождающееся замедлением роста прочности и даже небольшим ее снижением. После стабилизации расширения прочность бетона снова начинает расти. Самонапряжение бетона в период снижения прочности растет незначительно.

По мере увеличения прочности на фоне расширения бетона самонапряжение интенсивно возрастает [2-9]. Михайлов В.В. отмечал одним из важных условий обеспечения высокого самонапряжения высокое значение прочности бетона в ранний период [8].

Прочность бетонов, твердевших в воздушно-сухих условиях, обычно существенно ниже, чем у бетонов, находившихся в водных, воздушно-влажностных условиях и при герметизации [10]. Рост прочности бетона в воздушно-сухих условиях обычно стабилизируется к 14 сут., в дальнейшем возможен некоторый спад прочности.

Бетоны, твердеющие в водных, воздушно-влажностных условиях и при герметизации характеризуются непрерывным ростом прочности до 28 сут. При последующем твердении в воздушно-сухих условиях также возможен некоторый рост прочности. Более высокая прочность характерна для воздушно-влажностных условий в сравнении с водными, вследствие меньшего расширения [10].

На рис.3 представлены результаты измерения предела прочности на сжатие (далее – прочность) НБ в зависимости от продолжительности твердения в воде и условий ограничения деформаций в первой стадии.



Рис.3. Предел прочности на сжатие бетона с двухстадийным расширением: 28, 90 – продолжительность твердения в воде, сут.; 1 – отсутствует расширение в первой стадии; 0,95 – увеличение объема в первой стадии до 5%

Fig.3. Concrete compressive strength with two-stage expansion: 28, 90 - duration of hardening in water, day; 1 - there is no expansion in the first stage; 0,95 - increase in volume in the first stage to 5%

Очевидно, что длительное выдерживание в воде при отсутствии расширения в первой стадии благоприятно повлияло на формирование структуры бетона, что проявилось в повышении прочности на 28%. Расширение до 5% в первой стадии, сопровождающееся увеличением полной пористости, привело к некоторому ослаблению структуры, что на фоне продолжающегося процесса расширения после 28 сут, обеспечившего более высокое самонапряжение (рис. 1), вызвало снижение прочности на 14%. Поэтому для НБ с двухстадийным расширением важным моментом является соответствие энергетической эффективности НЦ, отвечающей за расширение во второй стадии, увеличению объема в первой стадии и, в итоге, прочности бетона, которая должна быть достаточной для обеспечения бездефектной структуры при расширении во второй стадии.

На рис. 4 представлены данные об изменении предела прочности на растяжение НБ в зависимости от продолжительности твердения в воде и условий ограничения деформаций в первой стадии.



Рис.4. Предел прочности на растяжение бетона с двухстадийным расширением: 28, 90 – продолжительность твердения в водной среде, сут.;

1 – отсутствует расширение в первой стадии; 0,95 – увеличение объема в первой стадии до 5%
Fig. 4. Tensile strength of concrete with two-stage expansion: 28, 90 - duration of hardening in the aquatic environment, day;

1 - there is no expansion in the first stage; 0,95 - increase in volume in the first stage to 5%

Очевидно, что при твердении НБ при отсутствии расширения в первой стадии с течением времени прочность на растяжение практически не меняется на фоне значительного повышения прочности на сжатие, что свидетельствует о повышении хрупкости бетона вследствие внутрискруктурных напряжений, обусловленных гидратацией НЦ с высокой энергетической активностью. При твердении с возможным увеличением объема в первой стадии до 5% повышение прочности на растяжение составило 41%, что свидетельствует о повышении трещиностойкости НБ. Наглядно это подтверждает соотношение пределов прочности на растяжение и сжатие, представленное на рис. 5.

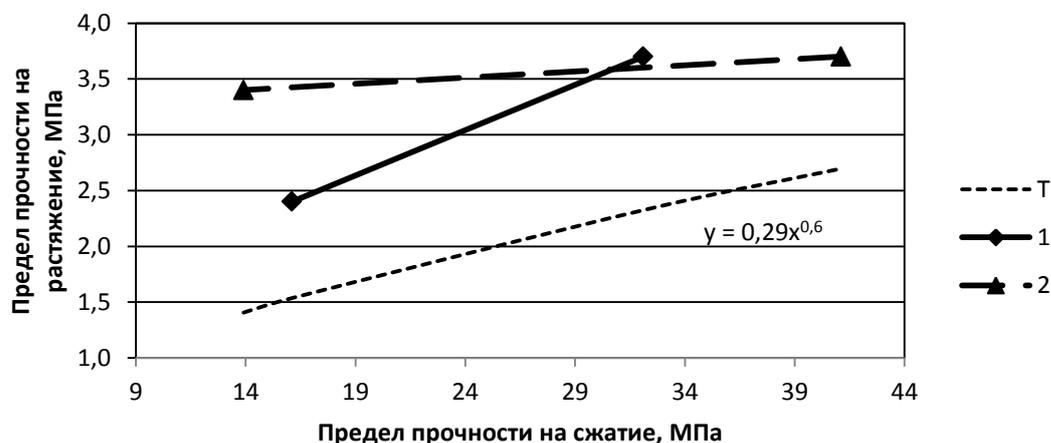


Рис.5. Зависимость предела прочности на растяжение от предела прочности на сжатие:

1 – в 28 суток; 2 – в 90 суток; Т: $R_t = 0,29 \cdot R^0,6$ [11]

Fig. 5. Dependence of the tensile strength on the tensile strength of the compressive strength:

1 - in 28 days; 2 - in 90 days; T: $R_t = 0,29 \cdot R^0,6$ [11]

Очевидно, что при твердении в воде в 28 сут. рост прочности на растяжение с ростом прочности на сжатие происходит более интенсивно в сравнении со среднестатистическими данными [12, 18-20]. К 90 сут. прочность на растяжение мало изменяется при повышении прочности на сжатие более чем в 2 раза, что связано, как отмечалось, с проявлением хрупкости у бетонов без расширения в первой стадии после длительного твердения в воде.

Вероятная причина – развитие высоких внутрискруктурных напряжений при твердении НЦ в этих условиях. Косвенным подтверждением этого можно считать увеличение полной пористости бетона при длительном твердении в воде (рис. 6).

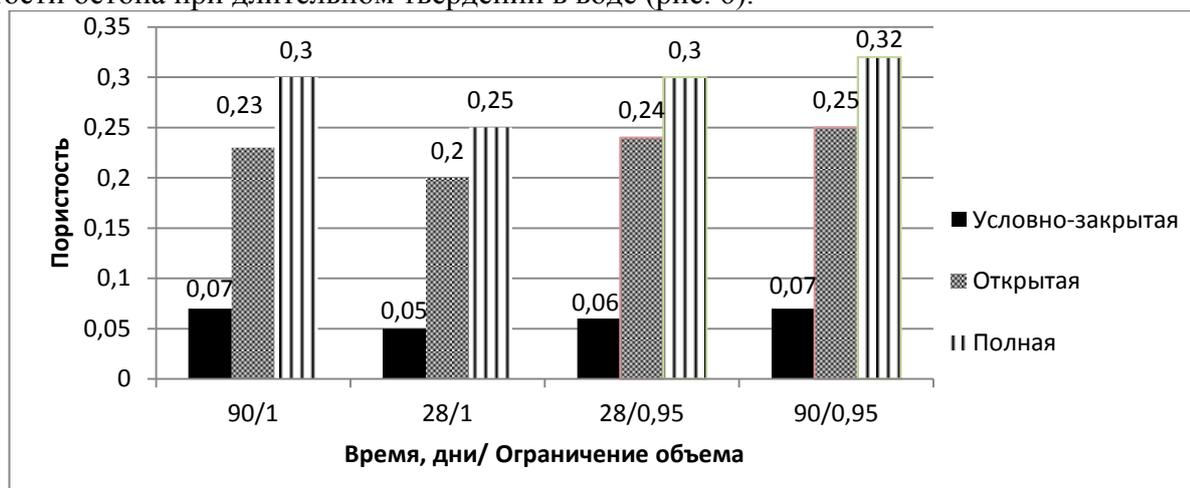


Рис.6. Полная, открытая и условно-закрытая пористость бетона с двухстадийным расширением: 28, 90 – продолжительность твердения в воде, сут.;

1 – отсутствует расширение в первой стадии; 0,95 – увеличение объема в первой стадии до 5%

Fig.6. Complete, open and conditionally closed porosity of concrete with two-stage expansion:

28, 90 - duration of hardening in water, day; 1 - there is no expansion in the first stage; 0,95 - increase in volume in the first stage to 5%

Существенное превышение экспериментальных значений прочности на растяжение над среднестатистическими данными для портландцементных бетонов обусловлено повышенным количеством этtringита в структуре бетона, оказывающего армирующее влияние. Следует особо отметить, что к 90 сут. предел прочности на растяжение практически одинаково независимо от условий развития деформаций в первой стадии.

На рис. 6 представлены данные об изменении полной, открытой и условно-закрытой пористости НБ в зависимости от продолжительности твердения и условий ограничения деформаций в первой стадии. Очевидно, что длительное выдерживание бетонов в воде приводит к увеличению полной пористости до 20% при исключении возможности расширения в первой стадии, что связано с развитием собственных деформаций и внутрискруктурных напряжений при длительном выдерживании в воде НЦ с высокой энергетической активностью.

При возможности увеличении объема в первой стадии до 5% увеличение полной пористости при длительном выдерживании в воде незначительно (до 6,5%). Аналогичная качественная закономерность отмечается и для открытой пористости, и для условно-закрытой пористости.

Вывод. При длительном твердении в воде НБ с двухстадийным расширением к 90 сут. наблюдается снижение показателей самоупругения до 25% при полном исключении деформаций расширения в первой стадии и до 20% при увеличении объема в первой стадии до 5%. При этом отмечается увеличение прочности на сжатие относительно 28-суточной до 28%, а увеличение полной пористости составляет до 20% при полном исключении деформаций расширения в первой стадии. При увеличении объема в первой стадии до 5% увеличение полной пористости незначительно. Изменение открытой и условно-закрытой пористости аналогично полной. Предложена формула для расчета самоупругения бетона на стадии проектирования состава.

Библиографический список:

1. Красильников К.Г., Никитина Л.В., Скоблинская Н.Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. – М.: Стройиздат, 1980. 255 с.
2. Будников П.П., Кравченко И.В. Расширяющиеся цементы// Труды 5-го Международного симпозиума по химии цемента. –Токио: Цементная Ассоциация Японии. 1968. т. 4. с. 319-335
3. Звездов А.И. Бетоны с компенсированной усадкой на напрягающем цементе // Материалы XXII Международной конференции молодых ученых и специалистов в области бетона и железобетона. – Иркутск. 1990. с. 53-55
4. Звездов А.И., Мартиросов Г.М. Бетоны с компенсированной усадкой / Бетон и железобетон. – 1995. №3. с. 2-4
5. Кравченко И.В. Расширяющиеся цементы. – М.: Изд. литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1962. 164 с.
6. Кузнецова Т.В. Структура и свойства расширяющихся и напрягающих цементов// Сборник докладов Всесоюзной конференции в г. Грозном: Ресурсосберегающие технологии железобетонных конструкций на основе напрягающих цементов. – М.: Стройиздат. 1989. с. 8-9
7. Материалы семинара «Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве»/ О-во «Знание» РСФСР. – М. 1992. 117 с.
8. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самоупругенные железобетонные конструкции. М.: Стройиздат. 1974. 312 с.
9. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. М. 1966. 208 с.
10. Кузнецова Т.В. Алуминатные и сульфалюминатные цементы. М.:Стройиздат. 1989. 209 с.
11. Несветаев Г.В., Хомич Л.А. Некоторые свойства напрягающих бетонов с добавкой «Эмбэлит»// Научное обозрение. 2014. № 10. с. 642 – 645.
12. Несветаев Г.В. Бетоны: учебное пособие. – Ростов-на-Дону: Феникс. 2011. 381 с.
13. Несветаев Г.В., Удодов С.А., Бычкова О.А. О влиянии состава модифицированного гипсоглиноземистого расширяющегося цемента на прочность и темп твердения / Наукоеведение. 2015. Т. 7 № 6 (31).с. 122. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN615.pdf>, свободный. Загл. с экрана.
14. Жильникова Т.Н., Корянова Ю.И., Несветаев Г.В. Влияние рецептурно-технологических факторов на прочностные показатели бетонов для инъектирования с двухстадийным расширением /Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 1. с. 150-161
15. 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. Тех-

нические науки. 2016. Т. 43. № 4. с. 153-166

16. Несветаев Г.В., Потапова Ю.И. Составы для инъектирования с двустадийным расширением /Науковедение. 2013. № 3 (16). С. 128. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/28trgsu313.pdf>, свободный. Загл. с экрана.
17. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И. Влияние условий твердения бетона с двухстадийным расширением на деформативно-прочностные показатели /Науковедение. 2015. Т. 7 № 5 (30). С. 148. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf>, свободный. Загл. с экрана.
18. Актуальные проблемы современного материаловедения// Абуханов А.З., Аласханов А.Х., Алчагиров Б.Б., Арсанукаев Х.О., Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Батаев Д.К.С., Бесланеева З.О., Бетрахмадов Р.В., Боташев А.Ю., Висханов С.С., Газиев М.А., Гудиева О.В., Гуфан Ю.М., Даудова А.Л., Домбиев Х.В., Дукаева К.Ю., Дышекова Ф.Ф., Елекоева К.М., Зубхаджиев М.А.В. и др.// Грозный, 2015. ТомКнига 2
19. Бычков М.В., Удодов С.А. Легкий самоуплотняющийся бетон как эффективный конструкционный материал /Науковедение. 2013. № 4 (17). С. 41. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN413.pdf>, свободный. Загл. с экрана.
20. Самоуплотняющиеся бетоны с использованием модификаторов и наполнителей из природного и техногенного сырья // Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Елистраткин М.Ю.// В сборнике: Эффективные строительные композиты Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. с. 455-465.

References:

1. Krasil'nikov K.G., Nikitina L.V., Skoblinskaya N.N. Fiziko-khimiya sobstvennykh deformatsii tsementnogo kamnya. M.: Stroizdatzh 1980. 255 s. [Krasil'nikov K.G., Nikitina L.V., Skoblinskaya N.N. Physical chemistry of own deformations of cement stone. M.: Stroizdatzh 1980. 255 p. (In Russ.)]
2. Budnikov P.P., Kravchenko I.V. Rasshiryayushchiesya tsementy. Trudy 5-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po khimii tsementa. Tokio: Tsementnaya Assotsiatsiya Yaponii. 1968;4:319-335. [Budnikov P.P., Kravchenko I.V. Expanding cements. Proceedings of the 5th International Symposium on Chemistry of Cement. Tokyo: Cement Association of Japan. 1968;4:319-335. (In Russ.)]
3. Zvezdov A.I. Betony s kompensirovannoi usadkoi na napryagayushchem tsemente. Materialy XXII Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov v oblasti betona i zhelezobetona. Irkutsk. 1990. S. 53-55. [Zvezdov A.I. Concretes with compensated shrinkage based on tensile cement. Materials of the XXII International Conference of Young Scientists and Specialists in the Field of Concrete and Reinforced Concrete. Irkutsk. 1990. P. 53-55. (In Russ.)]
4. Zvezdov A.I., Martirosov G.M. Betony s kompensirovannoi usadkoi. Beton i zhelezobeton. 1995;3:2-4. [Zvezdov A.I., Martirosov G.M. Concretes with compensated shrinkage. Beton i zhelezobeton. 1995;3:2-4. (In Russ.)]
5. Kravchenko I.V. Rasshiryayushchiesya tsementy. M.: Izd. literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nyim materialam; 1962. 164 s. [Kravchenko I.V. Expanding cements. M.: Izd. literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nyim materialam; 1962. 164 p. (In Russ.)]
6. Kuznetsova T.V. Struktura i svoistva rasshiryayushchikhsya i napryagayushchikh tsementov. Sbornik докладов Vsesoyuznoi konferentsii v g. Groznom: Resursosberegayushchie tekhnologii zhelezobetonnykh konstruksii na osnove napryagayushchikh tsementov. M.: Stroizdat. 1989. S. 8-9. [Kuznetsova T.V. Structure and properties of expanding and tensile cements. Collection of reports of the All-Union Conference in Grozny: Resource-saving technologies of reinforced concrete structures based on tensile cements. M.: Stroizdat. 1989. P. 8-9. (In Russ.)]
7. Materialy seminara «Opyt i perspektivy primeneniya betonov na napryagayushchem tsemente v stroitel'stve». O-vo «Znanie» RSFSR. M. 1992. 117 s. [Materials of the seminar «Experience and perspectives of using concretes on tensile cement in construction». RSFSR «Knowledge» society. Moscow, 1992. 117 p. (In Russ.)]
8. Mikhailov V.V., Litver S.L. Rasshiryayushchiysya i napryagayushchii tsementy i samonapryazhennyye zhelezobetonnyye konstruksii. M.: Stroizdat; 1974. 312 s. [Mikhailov V.V., Litver S.L. Expanding and straining cements and self-stressed reinforced concrete structures. M.: Stroizdat; 1974. 312 p. (In Russ.)]
9. Polak A.F. Tverdenie monomineral'nykh vyazhushchikh veshchestv. M. 1966. 208 s. [Polak A.F. Hardening of monomineral astringents. M. 1966. 208 p. (In Russ.)]
10. Kuznetsova T.V. Alyuminatnye i sul'foalyuminatnye tsementy. M.: Stroizdat; 1989. 209 s. [Kuznetsova T.V. Aluminate and sulphoaluminous cements. M.: Stroizdat; 1989. 209 p. (In Russ.)]
11. Nesvetaev G.V., Khomich L.A. Nekotorye svoistva napryagayushchikh betonov s dobavkoi «Embelit». Nauchnoe obozrenie. 2014; 10:642 – 645. [Nesvetaev G.V., Khomich L.A. Some properties of tensile concrete with the addition of «Embelit». Scientific review. 2014;10:642 – 645. (In Russ.)]
12. Nesvetaev G.V. Betony: uchebnoe posobie. Rostov-na-Donu: Feniks; 2011. 381 s. [Nesvetaev G.V. Concrete: a study guide. Rostov-on-Don: Phoenix; 2011. 381 p. (In Russ.)]
13. Nesvetaev G.V., Udodov S.A., Bychkova O.A. O vliyaniy sostava modifitsirovannogo gipsoglinozemistogo rasshiryayushchegosya tsementa na prochnost' i temp tverdeniya. Naukovedenie. 2015;7(6):122. Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN615.pdf>. [Nesvetaev G.V., Udodov S.A., Bychkova O.A. About the influence of the composition of the modified gypsum-aluminous expanding cement on the strength and rate of hardening. Naukovedenie. 2015;7(6):122. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN615.pdf>. (In Russ.)]

14. Zhil'nikova T.N., Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V. Vliyanie retsepturno-tehnologicheskikh faktorov na prochnostnye pokazateli betonov dlya in'ektirovaniya s dvukhstadiinym rasshireniem. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017; 44(1):150-161. [Zhil'nikova T.N., Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V. Impact of formula-technological factors on concrete strength indicators for injecting with two-stage expansion. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(1):150-161. (In Russ.)]
15. Zhil'nikova T.N., Koryanova Yu.I., Nesvetaev G.V. Integral'nye pokazateli vliyaniya retsepturno-tehnologicheskikh faktorov na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya betonov dlya in'ektirovaniya s dvukhstadiinym rasshireniem. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016; 43(4):153-166. [Zhil'nikova T.N., Koryanova Yu.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 Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 43(4):153-166. (In Russ.)]
16. Nesvetaev G.V., Potapova Yu.I. Sostavy dlya in'ektirovaniya s dvustadiinym rasshireniem. Naukovedenie. 2013; 3(16):128. Rezhim dostupa: [http:// naukovedenie.ru/PDF/28trgsu313.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/28trgsu313.pdf). [Nesvetaev G.V., Potapova Yu.I. Compositions for injection with two-stage expansion. Naukovedenie. 2013;3(16):128. Available at: [http:// Naukovedenie.ru/PDF/28trgsu313.pdf](http://Naukovedenie.ru/PDF/28trgsu313.pdf). (In Russ.)]
17. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Vliyanie uslovii tverdeniya betona s dvukhstadiinym rasshireniem na deformativno-prochnostnye pokazateli. Naukovedenie. 2015; 7(5):148. Rezhim dostupa: [http:// naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf). [Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I. Effect of concrete hardening conditions with two-stage expansion on deformation-strength parameters. Naukovedenie. 2015; 7(5):148. Available at: [http:// naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/129TVN515.pdf). (In Russ.)]
18. Abukhanov A.Z. i dr. Aktual'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. Grozniy, 2015. [Abukhanov A.Z. i dr. Relevant problems of modern materials science. Grozniy, 2015. (In Russ.)]
19. Bychkov M.V., Udodov S.A. Legkii samouplotnyayushchiysya beton kak effektivnyi konstruktivnyy material. Naukovedenie. 2013; 4(17):41. Rezhim dostupa: [http:// naukovedenie.ru/PDF/42TVN413.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN413.pdf). [Bychkov M.V., Udodov S.A. Light self-compacting concrete as an effective structural material. Naukovedenie. 2013;4(17):41. Available at: [http:// naukovedenie.ru/PDF/42TVN413.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN413.pdf). (In Russ.)]
20. Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Elistratkin M.Yu. Samouplotnyayushchiesya betony s ispol'zovaniem modifikatorov i napolnitelei iz prirodnoy i tekhnogennoy syr'ya. Materialy Nauchno-prakticheskoy konferentsii k 85-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Yuriya Mikhailovicha «Effektivnye stroitel'nye kompozity». Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. 2015. С. 455-465. [Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Elistratkin M.Yu. Self-sealing concrete with the use of modifiers and fillers from natural and technogenic raw materials. Materials of the Scientific and Practical Conference devoted to the 85th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of RAASN, Doctor of Technical Sciences Bazhenov Yuri Mikhailovich «Effective Building Composites». Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2015. С. 455-465. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Жильникова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства.

Корянова Юлия Игоревна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии строительного производства.

Несветаев Григорий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства.

Information about the authors:

Tatjana N. Zhilnikova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department «Technology of construction production».

Yulia I. Koryanova – Cand. Sci. (Technical), Senior lecturer, Department «Technology of construction production».

Grigory V. Nesvetaev – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department «Technology of construction production».

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 30.08. 2017.

Принята в печать 23.10.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.08. 2017.

Accepted for publication 23.10.2017.

Для цитирования: Инжухтов И.С., Мезенцев В.В., Назиров Р.А., Рожков А.Ф., Хованский М.Е. Влияние влажностного состояния древесины на прочностные свойства гвоздевых соединений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):151-160. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-151-160

For citation: Inzhutov I.S., Mezentssev V.V., Nazirov R.A., Rozhkov A.F., Hovanskiy M.E. The influence of the moisture content of wood on the strength properties of nailed connections. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (4):151-160. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-4-151-160

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 694.142.5

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-151-160

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГВОЗДЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Инжухтов И.С.¹, Мезенцев В.В.², Назиров Р.А.³, Рожков А.Ф.⁴, Хованский М.Е.⁵

¹⁻⁵ Сибирский Федеральный университет,

¹⁻⁵ 660000, г. Красноярск, Свободный проспект, 79, Россия,

¹ e-mail: i.s.i.sfu@mail.ru ² e-mail: Vladslav.Mezentssev@yandex.ru,

³ e-mail: nazirovra@gmail.com, ⁴ e-mail: 89994433191@yandex.ru,

⁵ e-mail: maximko222@mail.ru

Резюме. Цель. Влажностное состояние древесины оказывает значительное влияние на прочность соединений элементов деревянных конструкций. Однако исследований в данном направлении проведено крайне мало, поэтому требуется более детальное изучение существующей конкретной зависимости между влажностью древесины и прочностью соединений деревянных элементов. Целью исследования является определение влияния капиллярной (свободной) и связанной (гигроскопической) влажности древесины на прочность гвоздевых соединений, работающих на выдергивание. **Метод.** Проведение экспериментальных исследований. **Результат.** Произведено испытание трех серий образцов, у каждого образца было найдено максимальное усилие выдергивания гвоздя и рассчитано предельное сопротивление выдергиванию по формуле СП. Образцы первой серии испытывались при сухом состоянии древесины. Образцы второй серии перед испытанием были увлажнены. В течение суток они были погружены в воду для достижения в них капиллярной влажности. Образцы третьей серии перед испытанием были увлажнены путем набора гигроскопической влажности. Образцы длительное время находились в эксикаторе над водой без прямого контакта. **Вывод.** В ходе исследования было установлено, что капиллярная и гигроскопическая влажность существенным образом влияют на прочность гвоздевых соединений, причем влияние на максимальное выдергивающее усилие оказывает не тип влажности, а её значение. Образцы первой серии показали наибольшее сопротивление выдергиванию гвоздя. Образцы второй серии имели сопротивление выдергиванию на 48% меньше. У образцов третьей серии прочность гвоздевого соединения была снижена на 31% относительно сухой древесины. Результаты исследования подтверждают необходимость учета влажности при проектировании и эксплуатации гвоздевых соединений.

Ключевые слова: гвоздь, выдергивание, предельное сопротивление выдергиванию гвоздей, древесина

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

THE INFLUENCE OF THE MOISTURE CONTENT OF WOOD ON THE STRENGTH
PROPERTIES OF NAILED CONNECTIONS

Ivan S. Inzhutov¹, Vladislav V. Mezentsev², Rashit A. Nazirov³,
Alexander F. Rozhkov⁴, Maxim E. Khovansky⁵

¹⁻⁵Siberian Federal University,

¹⁻⁵79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia,

¹e-mail: i.s.i.sfu@mail.ru ²e-mail: vladslav.Mezentsev@yandex.ru,

³e-mail: nazirovra@gmail.com, ⁴e-mail: 89994433191@yandex.ru,

⁵e-mail: maximko222@mail.ru

Abstract. Objectives It is known that the moisture content of wood has a significant effect on the joint strength of elements of wooden structures. However, there has been little research in establishing a specific relationship between the moisture content of wood and the nailed joint strength of wooden elements. The aim of the study is to determine the influence of capillary (free) and bound (hygroscopic) wood moisture on the strength of nailed connections during pull-out. **Methods** Conducting experimental studies. **Results** Three series of samples were tested. For each sample the maximum nail pulling force was determined, with the ultimate pulling resistance calculated according to the formula supplied by the appropriate Rules and Regulations. The samples of the first series were tested with wood having low moisture content. The samples of the second series were moistened prior to the test by being immersed in water for 24 hours to gain capillary moisture. The samples of the third series were moistened prior to the test hygroscopic moisture absorption by being placed in a desiccator above water for a long time without direct contact. **Conclusion** In the course of the study, it was found that both capillary and hygroscopic moisture significantly affects the strength of nailed connections, and that the effect on the maximum pulling force is not determined by the type of moisture, but by its value. The samples of the first series indicated the greatest nail pulling resistance. The samples of the second series had nail pulling resistance less by 48%. In the third series, the strength of the nailed connection was reduced by 31% as compared to the dry wood. The results of the study confirm the necessity of taking into account the humidity during the design and operation of nailed connections.

Keywords: nail, pulling, ultimate nail pulling resistance, wood

Введение. Древесина является гигроскопичным материалом, она постоянно обменивается влагой с окружающей средой. При длительном нахождении в неизменяемых условиях окружающей среды, т.е. при определенной температуре и влажности окружающего воздуха, древесина приходит к равновесной влажности.

Для определения равновесной влажности пользуются диаграммой профессора П.С. Сергеевского [1]. Данная диаграмма построена в координатах температура – степень насыщения воздуха (по вертикали относительная влажность воздуха, по горизонтали его температура). Пересечение этих показателей дает наклонную линию, которая показывает влажность древесины в процентах. Диаграмма представлена на рис. 1.

Однако климатические условия часто меняются, древесина редко бывает в состоянии равновесной влажности. К примеру, утром воздушная среда нагревается от солнечных лучей, при этом нагревается и система металл-древесина.

Ввиду разницы в структурах материалов древесины и металла, влекущим за собой большую разницу в их теплофизических характеристиках, прогрев слоев древесины происходит значительно медленнее нагрева металла.

Затем температура окружающей среды достигает максимума и начинается процесс

охлаждения воздуха. При этом вследствие теплообмена будет понижаться и температура металла.

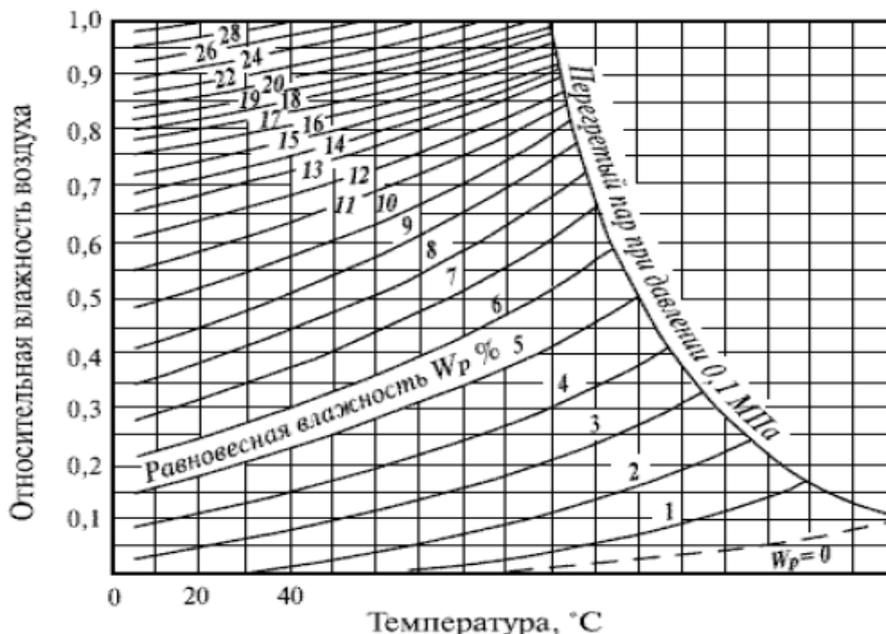


Рис.1. Диаграмма профессора Серговского П.С. [1].
Fig.1. Diagram of Professor P.S Sergovsky

Для древесины этот процесс будет происходить менее интенсивно и неравномерно из-за её анизотропии [5-10]. В определенный момент времени температура воздушной среды вокруг металла станет равна температуре точки росы, поэтому дальнейшее охлаждение будет сопровождаться выпадением влаги в виде росы и инея.

Причиной конденсации является наличие в воздухе достаточного количества водяных паров и происходящий процесс перепада температур. При соприкосновении металла с древесиной происходит их взаимодействие, в результате чего древесина увлажняется [2-3]. Описанный выше процесс имеет циклический характер.

В большинстве трудов по теоретическим и экспериментальным исследованиям деревянных конструкций отмечается негативное влияние повышенной температуры и влажности среды эксплуатации нагельных соединения, как на саму древесину, так и на соединение деревянных элементов [12-20].

При постоянном воздействии влаги происходит гниение, в нагельном соединении начинается разбалтывание и со временем конструкция начинает провисать.

Значительный прогиб конструкции характеризует наступление предельного состояния второй группы, при котором дальнейшая эксплуатация становится опасной.

Влажность древесины влияет на основные механические, физические и технические свойства древесины и древесных материалов.

Так, например, изменение влажности влияет на размеры древесины и древесных материалов, прочность и деформативность.

Древесина, будучи гигроскопическим материалом, поглощает (или отдает) водяные пары из окружающего воздуха стенками клеток, а свободную или капиллярную влагу набирает в межклеточное пространство.

В связи с этим различаются две категории влажности [4]:

1) гигроскопическая (связанная или сорбционная) влажность ниже точки насыщения волокон, которая наблюдается примерно до 28%; в этой области влажность древесины зависит от относительной влажности и температуры окружающего воздуха;

2) капиллярная (свободная) влажность выше точки насыщения волокон; при насыщении стенок клеток полости клеток заполняются водой.

Капиллярная (свободная) влажность наблюдается у только что срубленной древесины и у древесины, которая целиком или частично соприкасается с водой.

Гвозди применяются главным образом в узловых сопряжениях при сплачивании дощатых конструкций и в прокладках сжатых элементов. При забивке гвоздя в дерево последнее оказывает известное сопротивление – волокна древесины перерезаются, частично раздвигаются, и древесина, прилегающая к поверхности гвоздя, уплотняется.

Возможность прочного внедрения постороннего тела в древесину – «гвоздимность древесины» – является одним из весьма важных положительных качеств дерева как строительного материала.

В деревянных конструкциях гвозди работают на сдвиг и на выдергивание.

Соединения с изгибаемыми гвоздями применяются в стыках и узлах дощатых конструкций, препятствуя взаимным смещениям соединяемых элементов. Соединения с изгибаемыми гвоздями работают и рассчитываются аналогично соединениям с изгибаемыми болтами — гвозди работают на изгиб, а окружающая древесина — на смятие с некоторыми особенностями.

Соединения с выдергиваемыми гвоздями относятся к классу соединений с растянутыми связями. Они применяются для крепления досок, подшивок потолков, щитов перекрытий, опалубки, стропильных систем кровельных покрытий.

Несущую способность гвоздя диаметром d на выдергивание T_2 определяют по формуле (1) как произведение сопротивления выдергиванию $R_{в.г.}$ на площадь поверхности трения.

При этом рабочую длину гвоздя l_1 находят по длине заземленной цилиндрической части гвоздя без учета длины (острия), равной $1,5d$ [6].

Формула имеет вид:

$$T_Г = R_{в.г.} \cdot \pi \cdot d \cdot l_1 \quad (1)$$

Следует отметить, что существенную роль на сопротивление выдергиванию гвоздя оказывает направление вбиваемого гвоздя по отношению к волокнам, а также порода древесины.

В статье [11] представлены результаты испытаний на выдергивающую силу гвоздя для пяти различных пород древесины (бук, ольха, каштан, ель и сосна).

Испытания проводились в соответствии со стандартами TS 6094 и ASTM-D 143 и ASTM-D 1761.

Использовался гвоздь размером 2.5 мм в диаметре и 50 мм в длине. В результате самое большое значение выдергивающего усилия было получено в буке, а наименьшее – в сосне и ели.

В [9] были опубликованы результаты зависимости выдергивающего усилия гвоздя от тангенциального, радиального и продольного направления волокон вбиваемого гвоздя.

Было установлено, что необходимо наибольшее усилие для выдергивания гвоздя, вбитого в радиальном направлении волокон древесины, а наименьшее усилие – в продольном направлении.

Влажностное состояние древесины оказывает значительное влияние на прочность соединений элементов деревянных конструкций [2]. Однако проведенных исследований в данном направлении крайне мало, именно поэтому требуется более детальное изучение конкретной зависимости между влажностью древесины и прочностью соединений деревянных элементов.

Постановка задачи. Целью данного исследования является определение влияния капиллярной (свободной) и связанной (гигроскопической) влажности древесины на прочность гвоздевых соединений, работающих на выдергивание.

Методы исследования. Для определения влияния влажностного состояния древесины на выдергивание в гвоздевых соединениях авторами был произведен эксперимент.

Определение влажности древесины проводилось весовым методом в соответствии с ГОСТ 16483.7-71* «Древесина. Методы определения влажности».

Были использованы следующие материалы и приборы:

1. Древесина. Исследования проводились на образцах из сосны 1-го сорта.

Физико-механические и технические свойства древесной породы соответствуют СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Размеры сторон образцов составляли (50 ± 1) мм.

2. Гвозди ГОСТ 4028-63 «Гвозди строительные. Конструкция и размеры» диаметром 2,0 мм, длиной 50 мм.
3. Штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.
4. Сушильный шкаф СНОЛ 3,5.
5. Нагрузочная рама INSTRON 3369.
6. Эксикатор для создания необходимых условий окружающей среды.
7. Весы с погрешностью 0,01 г.

Для определения массы сухой древесины, образцы высушивались в сушильном шкафу СНОЛ 3,5 при температуре $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ до постоянной массы [8].

Содержание влаги в древесине определялось по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100, \quad (2)$$

где W – влажность, %;

m_1 – масса образца перед испытанием, г;

m_2 – масса образца после высушивания, г.

После высушивания в образцы были вбиты гвозди в радиальном направлении, расчетные длины гвоздей представлены в табл.1.

Предварительно гвозди были обработаны спиртовым раствором с целью обезжиривания поверхности.

Образцы с гвоздями помещали в нагрузочную раму INSTRON 3369 со специальной насадкой. Затем гвозди выдергивали при непрерывном перемещении насадки испытательной машины с постоянной скоростью 15 мм/мин [7]. Схема и общий вид испытания представлены на рис. 2 и 3.

Были проведены испытания 3 серий образцов по 3 образца в каждой.

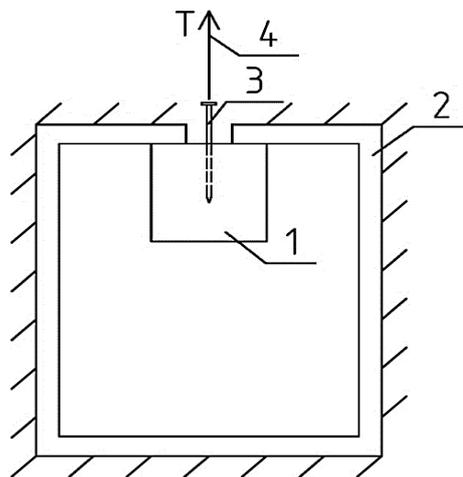


Рис.2.Схема испытания

1 – деревянный образец; 2 – упорная установка; 3 – гвоздь; 4 – нагрузка, создаваемая рамой INSTRON

Fig. 2. Test scheme

1 - wooden sample; 2 - fixed installation; 3 - nail; 4 - the load created by the frame INSTRON

Образцы 1 серии (№1-3) были испытаны в сухом состоянии древесины. После высушивания они были помещены в эксикатор с хлоридом кальция, чтобы при остывании до комнатной температуры, образцы не впитали в себя влагу.

Образцы 2 серии (№4-6) перед испытанием были увлажнены. В течение суток они были погружены в воду. Таким образом, достигалась капиллярная влажность образцов.

Образцы 3 серии (№7-9) перед испытанием были увлажнены путем набора гигроскопической влажности. Образцы длительное время находились в эксикаторе над водой без прямого контакта.

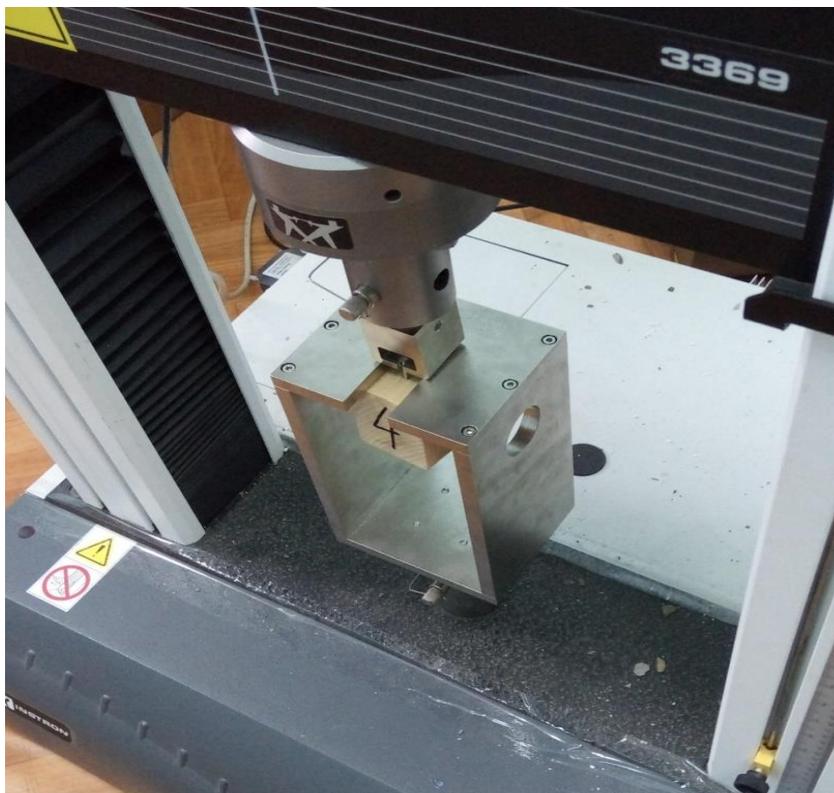


Рис.3.Общий вид испытания образца №4
Fig. 3.General view of the test sample No. 4

После проведения испытания было получено максимальное усилие, необходимое для выдергивания гвоздя из образца.

Зная максимальное усилие T_z и расчетную длину гвоздя l_1 , было найдено предельное сопротивление выдергиванию гвоздя $R_{в.г.}$ по формуле (3):

$$R_{в.г.} = \frac{T_{в.г.}}{\pi \cdot d \cdot l_1} \quad (3)$$

Обсуждение результатов. На рис.4 представлены усредненные графики, показывающие характер работы гвоздя на выдергивания для каждой серии образцов.

Из графиков на рис. 4 характер работы гвоздя на выдергивание выглядит следующим образом: в начале испытания кривая идет почти вертикально вверх и при достижении критической точки внезапно падает.

Это падение объясняется сменой силы трения покоя на силу трения скольжения.

Далее кривая падает, постепенно приближаясь к оси абсцисс.

Площадь под графиком – это энергия, необходимая для полного выдергивания гвоздя из древесины.

Несмотря на то, что максимальное усилие выдергивания у образцов с гигроскопической влажностью выше, чем у образцов с капиллярной влажностью, но энергии, требуемой для полного выдергивания гвоздя расходуется меньше.

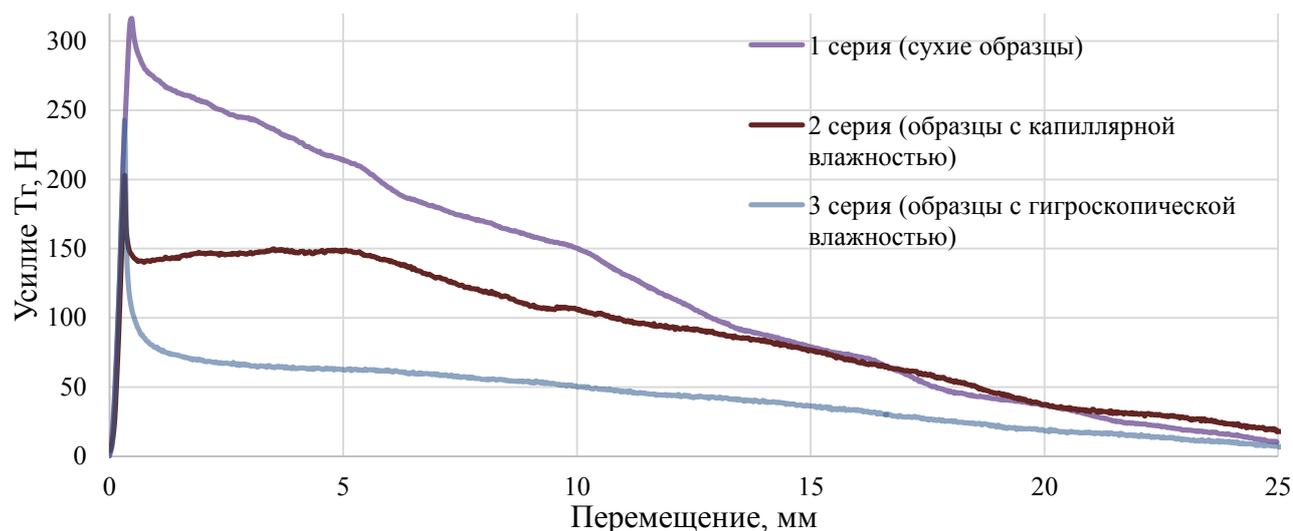


Рис. 4. Усредненные графики выдергивания гвоздя для каждой серии образцов
Fig. 4. Average nail pull out graphs for each series of samples

В табл. 1 приведены результаты и анализ экспериментальных данных.

Таблица 1. Результаты и анализ эксперимента
Table 1. Results and analysis of the experiment

№ серии	№ образца	Влажность древесины во время испыт., %		Расчетная длина забиваемого гвоздя (без учета заострения), мм	Макс. усилие, Н	Предел. сопр., МПа	Сред. предел. сопр., МПа	Коеф. вариации, %
		ед.	среднее					
1	1	сухое состояние	30,5	25,8	312,08	1,93	1,94 ± 0,046	2,37
	2			30	375,95	1,99		
	3			27,1	322,8	1,9		
2	4	28,32	30,5	30,5	202,57	1,06	1,02 ± 0,035	3,4
	5	32,01		29,6	186,25	1		
	6	31,18		30,2	188,87	1		
3	7	20,3	20,5	29	237,67	1,31	1,35 ± 0,035	2,61
	8	20,9		28,5	241,7	1,35		
	9	20,1		29,2	247,63	1,38		

В своде правил (СП) «Деревянные конструкции» для расчета соединений на гвоздях, работающих на выдергивание, используется расчетное сопротивление выдергиванию $R_{в.г}$, которое принимается для воздушно-сухой древесины равное 0,3 МПа, а для сырой, высыхающей в конструкции, – 0,1 МПа.

В ходе испытания были получены средние значения для сухой древесины 1,94 МПа, а для увлажнённой древесины 1,02 МПа.

Значения, используемые в СП 64.13330.2017 значительно меньше, чем значения, полу-

ченные в результате испытаний, так как экспериментальным путем было получено предельное сопротивление, а не расчетное.

В СП временное сопротивление на выдергивание не приводится и отсутствует методика по переходу от временного сопротивления выдергивания к нормативному и расчетному.

Вывод. В ходе исследования было установлено, что капиллярная и гигроскопическая влажность существенным образом влияет на прочность гвоздевых соединений, причем влияние на максимальное выдергивающее усилие оказывает не тип влажности, а её значение.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Образцы при сухом состоянии древесины (образцы серии №1) показали наибольшее сопротивление выдергиванию.

При насыщении образцов древесины водой (образцы серии №2) наблюдается снижение прочности гвоздевых соединений до 48% по сравнению с сухой древесиной.

При относительной влажности окружающей среды, приближающейся к насыщению (образцы серии №3), прочность гвоздевого соединения уменьшается на 31% относительно сухой древесины.

Несмотря на то, что при 30% капиллярной влажности древесины было получено наименьшее предельное сопротивление выдергиванию, энергии для полного выдергивания гвоздя требуется больше по сравнению с 20% гигроскопической влажностью древесины.

Исследование подтверждает необходимость учета влажности при проектировании и эксплуатации гвоздевых соединений.

Библиографический список:

1. Серговский, П.С. Вопросы статики процесса сушки и увлажнения древесины. / П.С. Серговский // Науч. тр. М.: МЛТИ, 1955. № 4. С. 98-123.
2. Бочков, М.В. Процессы тепломассопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных стропильных конструкций при циклических режимах эксплуатации / М.В. Бочков// Дисс. канд. техн. наук. - М.: 2017. - 151 с.
3. Леонтьев Н. Л. Влияние влажности на физико-механические свойства древесины. -М.: Гослесбумиздат, 1962. - 114 с.
4. Миронов В. Г., Цапаев В. А., Авдеев А. В. Влияние влажности древесины на ползучесть соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах // Деревообраб. пром-сть. -2000. -№ 1. - С. 26-28.
5. Ермолаев, В.В. Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Дисс. канд. техн. наук. – Нижний Новгород. – 2009. – 153 с.
6. СП 64.13330.2017 (актуализированная редакция СНиП II-25-80) «Деревянные конструкции» (утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минрегион России) от 27 февраля 2017 г. № 129/пр) // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО НИЦ «Строительство», 28.08.2017.
7. ГОСТ 16483.33-77. Древесина. Методы определения удельного сопротивления выдергиванию гвоздей и шурупов. Введ. 1978.01.01. М.: ИПК издательство стандартов, 1999. 5 с.
8. ГОСТ 16483.7-71*. Древесина. Методы определения влажности. М.: Изд-во стандартов, 1986. 4 с.
9. Akyildiz M.H. Screw-nail withdrawal and bonding strength of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. // Journal of Wood Science – Japan, 2014.
10. Larsen, N. J. "Design of bolted joints", in: Proceedings, CIB-W18 Meeting 1979, Bordeaux, France 1979, Paper 12-7-2.
11. Akyildiz M.H, Malkocoglu A (2001) Nail withdrawal characteristics of some tree species growing in Eastern Blacksea region. Gazi University Kastamonu Educational Journal 9(2): 469–482.
12. Javier Estévez. Timber spatial trusses using hollow bars // InternationalesHolzbau-Forum 11 –Germany, 2011.
13. Peter R. Smith The behaviour of traditional timber roof framing in domestic buildings // Architectural Science Review – Australia, 2011.
14. Milan Šmak, Jan Barnat. Dowelled joints in timber structures. Experiment–design–realization // Wood Research – Slovakia, 2016.
15. D.N. Kaziolas, I. Zygomas, G.E. Stavroulakis & C.C. Baniotopoulos. LCA of timber and steel buildings with fuzzy variables uncertainty quantification // European Journal of Environmental and Civil Engineering – UK, 2016.
16. Saulius Kavaliauskas, Audronis Kazimieras Kvedaras & Kestutis Gurkšnyš. Evaluation of long-term behaviour of

composite timber- concrete structures according to EC // UkioTechnologinisirEkonominisVystymas – Lithuania, 2010.

17. Huifeng Yang, Dongdong Ju, Weiqing Liu, Weidong Lu, Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars // Construction and Building Materials, 2016
18. Ryuya Takanashi, Kei Sawata, Yoshihisa Sasaki, Akio Koizumi. Withdrawal strength of nailed joints with decay degradation of wood and nail corrosion // Journal of Wood Science – Japan, 2016.
19. Barcik S., Gasparik, M., Horejs. P. Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strength of Spruce Wood // Bioresources – USA, 2014.
20. Smith Tobias. Post-tensioned Timber Frames with Supplemental Damping Devices // University of Canterbury – New Zealand, 2014.

References:

1. Sergovskii P.S. Voprosy statiki protsessa sushki i uvlazhneniya drevesiny. Nauch. tr. M.: MLTI. 1955;4:98-123. [Sergovskii P.S. Questions on the statics of the process of drying and moistening wood. Scientific works. Moscow: MLTI. 1955;4:98-123. (in Russ.)]
2. Bochkov M.V. Protsessy teplomassoperenosa v nagel'nykhsoedineniyakh elementov derevyannykh stropil'nykh konstruksii pri tsiklicheskikh rezhimakh ekspluatatsii. Diss. kand. tekhn. nauk. M.: 2017. 151 s. [Bochkov M.V. Processes of heat and mass transfer in dowel connections of elements of wooden rafter structures at cyclic operating modes. Published Candidate of technical sciences thesis. Moscow: 2017. 151 p. (in Russ.)]
3. Leont'ev N. L. Vliyanie vlazhnosti na fiziko-mekhanicheskie svoistva drevesiny. M.: Goslesbumizdat; 1962. 114 s. [Leont'ev N. L. The influence of moisture on the physical and mechanical properties of wood. Moscow: Goslesbumizdat; 1962. 114 p. (in Russ.)]
4. Mironov V.G., Tsepaev V.A., Avdeev A.V. Vliyanie vlazhnosti drevesiny na polzuchest' soedinenii derevyannykh elementov n ametallicheskikh zubchatykh plastinakh. Derevoobrabativaushaya promishlennost'. 2000;1:26-28. [Mironov V.G., Tsepaev V.A., Avdeev A.V. Effect of wood moisture on the creep of joints of wooden elements on metal toothed plates. Woodworkingindustry. 2000;1:26-28. (in Russ.)]
5. Ermolaev V.V. Vliyanie vlazhnosti drevesiny na dlitel'nyuyu prochnost' i polzuchest' soedinenii stroitel'nykh konstruksii na metallicheskikh zubchatykh plastinakh. Diss. kand. tekhn. nauk. Nizhnii Novgorod; 2009. 153 s. [Ermolaev V.V. Effect of wood moisture on the long-term strength and creep of joints of building structures on metal toothed plates. Published Candidate of technical sciences thesis. Nizhnii Novgorod; 2009. 153 p. (in Russ.)]
6. SP 64.13330.2017 (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-25-80) «Derevyanye konstruksii» (utverzhdennye prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii (Minregion Rossii) ot 27 fevralya 2017 g. № 129/pr). TsNIISKim. V.A. Kucherenko, OAONITs «Stroitel'stvo», 28.08.2017. [SP 64.13330.2017 (updated version of SNiP II-25-80) «Wooden constructions» (approved by the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) on February 27, 2017 No. 129/pr). CNIISK named after V.A. Kucherenko, OAONITs «Stroitel'stvo», 28.08.2017. (in Russ.)]
7. GOST 16483.33-77. Drevesina. Metody opredeleniya udel'nogo soprotivleniya vydergivaniiyu gvozdei i shurupov. Vved. 1978.01.01. M.: IPK izdatel'stvostandartov; 1999. 5 s. [GOST 16483.33-77. Wood. Methods for determining the specific resistance to pulling nails and screws. Put in action 1978.01.01. M.: IPK izdatel'stvostandartov; 1999. 5 p. (in Russ.)]
8. GOST 16483.7-71*. Drevesina. Metody opredeleniya vlazhnosti. M.: Izd-vostandartov; 1986. 4 s. [GOST 16483.7-71*. Wood. Methods for determining moisture. M.: Izd-vostandartov; 1986. 4 p. (in Russ.)]
9. Akyildiz M.H. Screw-nail withdrawal and bonding strength of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. Journal of Wood Science. 2014;60(3):201-206.
10. Larsen N.J. Design of bolted joints. Proceedings of the CIB-W18 Meeting. Bordeaux, France. 1979. Paper 12-7-2.
11. Akyildiz M.H., Malkocoglu A. Nail withdrawal characteristics of some tree species growing in Eastern Blacksea region. Gazi University Kastamonu Educational Journal. 2001;9(2):469-482.
12. Estévez J. Timber spatial trusses using hollow bars. InternationalesHolzbau-Forum 11. Germany. 2011.
13. Smith P.R. The behaviour of traditional timber roof framing in domestic buildings. Architectural Science Review. 1973;16(3):152-154.
14. Šmak M., Barnat J. Dowelled joints in timber structures. Experiment–design–realization. Wood Research. 2016;61(4):651-662.
15. Kaziolas D.N., Zygomalas I., Stavroulakis G.E. & Baniotopoulos C.C. LCA of timber and steel buildings with fuzzy variables uncertainty quantification. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2017; 21(9):1128-1150.
16. Kavaliauskas S., Kvedaras A.K. & Gurkšnyš K. Evaluation of longterm behaviour of composite timberconcrete structures according to EC. UkioTechnologinisirEkonominisVystymas. 2005; 11(4):292-296.
17. Huifeng Yang, Dongdong Ju, Weiqing Liu, Weidong Lu. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. Construction and Building Materials. 2016; 109:73-83.

18. Takanashi R., Sawata K., Sasaki Y., Koizumi A. Withdrawal strength of nailed joints with decay degradation of wood and nail corrosion. *Journal of Wood Science*. 2017; 63(2):192-198.
19. Barcik S., Gasparik M., Horejs P. Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strength of Spruce Wood. *BioResources*. 2014;9(4):5963-5975.
20. Smith T. *Post-tensioned Timber Frames with Supplemental Damping Devices*. Christchurch: University of Canterbury; 2014.

Сведения об авторах:

Инжутов Иван Семенович – доктор технических наук, профессор, кафедра строительных конструкций и управляемых систем.

Мезенцев Владислав Вадимович – магистрант.

Назиров Рашид Анварович – доктор технических наук, профессор, кафедра проектирования зданий и экспертизы недвижимости.

Рожков Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и управляемых систем.

Хованский Максим Евгеньевич – магистрант.

Information about the authors:

Ivan S. Inzhutov – Dr. Sci., (Technical) Prof., Department of Building Constructions and Controlled Systems.

Vladislav V. Mezentsev – Master's student.

Rashit A. Nazirov – Dr. Sci., (Technical) Prof., Department of Design of Buildings and Expertise of Real Estate.

Alexander F. Rozhkov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Constructions and Controlled Systems.

Maxim E. Khovansky – Master's student.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 29.08.2017.

Принята в печать 01.10.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.08.2017.

Accepted for publication 01.10.2017.

Для цитирования: Кравчук В.Ю., Рымаров А.Г. Система реверсивной вентиляции для административных зданий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):161-169. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-161-169

For citation: Kravchuk V.Yu., Rymarov A.G. Reversible ventilation system for administrative buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 161-169. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-161-169

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 697.952.4

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-161-169

СИСТЕМА РЕВЕРСИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЙ

Кравчук В. Ю.², Рымаров А. Г.¹

¹⁻²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

¹⁻²129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Россия,

¹ e-mail: rymarov@yandex.ru, ²e-mail: valerik_kravchuk@mail.ru

Резюме: *Цель.* Авторами поставлена цель и сформулированы задачи исследования: рассмотреть возможность применения принципа реверсирования воздушных потоков для системы централизованной вентиляции; разработать конкретную схему воздухообмена реверсивной вентиляции, которая будет учитывать особенности микроклимата административных зданий; выбрать тип заполнения воздухопроницаемого элемента и обосновать этот выбор; определить условия смены направления движения воздуха в системе вентиляции и область ее применения; сформировать перечень оборудования, необходимого для работы такой системы; рассмотреть влияние приточно-вытяжных устройств на тепло-влажностный режим наружных ограждений. **Метод.** Для достижения поставленной цели был проработан опубликованный тематический материал, проведен патентный поиск по российской и европейской базам данных. Были использованы данные математического моделирования фильтрации в пористых средах и результаты экспериментов. Применен метод вентиляции помещений административных зданий с использованием реверсирования движения потоков приточного и вытяжного воздуха по одним и тем же каналам. **Результат.** Представлены схемы реверсивной системы вентиляции, рассмотрены режимы работы реверсивной системы вентиляции. Установлено, что идея реверсирования вентиляционных потоков до сих пор не применялась при разработке централизованных систем вентиляции. На основании указанных опубликованных материалов был сделан вывод о том, что предлагаемая конструкция приточно-вытяжных устройств может применяться на практике. Предложена оригинальная схема воздухообмена для вентиляции административных зданий и конструкция приточно-вытяжных устройств для этой системы; определены условия смены режимов работы системы и область ее применения. **Вывод.** Использование предлагаемой системы вентиляции позволяет обеспечивать нормативный воздухообмен, без использования приточной установки в холодный период года. Такое применение реверсирования потоков воздуха позволяет наиболее полно использовать потенциал естественных сил для обеспечения воздухообмена помещений.

Ключевые слова: реверсивная вентиляция, воздухопроницаемые элементы, воздушный режим, приточно-вытяжные устройства

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

REVERSIBLE VENTILATION SYSTEM FOR ADMINISTRATIVE BUILDINGS

Valery Yu. Kravchuk², Andrey G. Rymarov¹

¹⁻²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),

¹⁻²26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow 129337, Russia,

¹e-mail: rymarov@yandex.ru, ²e-mail: valerik_kravchuk@mail.ru

Abstract. Objectives To consider the possibility of applying the principle of reversing air flows for a centralised ventilation system; to develop a specific scheme for air exchange reversible ventilation, which will take into account the peculiarities of the microclimate of administrative buildings; to select the type of filling of the air-permeable element and justify this choice; to determine the conditions for changing the direction of air movement in the ventilation system and the area of its application; to form a list of equipment necessary for the operation of such a system; to consider the influence of supply and exhaust devices on the heat and humidity regime of claddings. **Methods** To achieve this goal, the published thematic material was reviewed and a patent search carried out using Russian and European databases. Data on mathematical modelling of filtration in porous media and experimental results were used. A method for ventilating rooms in administrative building using the reversal of movement of supply and exhaust air streams along the same channels was applied. **Results** Schemas for reversible ventilation systems are presented and their modes of operation considered. It is established that the idea of reversing ventilation flows has not yet been applied in the development of centralised ventilation systems. Based on these published materials, it was concluded that the proposed design of supply and exhaust devices can be used in practice. An original air exchange scheme for the ventilation of administrative buildings and design of supply and exhaust devices for this system are proposed. The conditions for changing the operating modes of the system and the scope of its application are determined. **Conclusion** The use of the proposed ventilation system allows normative air exchange to be provided without using a supply unit during the cold season. This application of airflow reversal allows the potential of natural forces to be used to the fullest extent to ensure the air exchange of the rooms.

Keywords: reversible ventilation, air permeable elements, air mode, supply and exhaust devices

Введение. Процесс непрерывной урбанизации заметно меняет окружающую среду человека. Исследования, выполненные в работах [1-3], обосновывают значительное повышение потребления искусственного холода в административных и жилых зданиях к концу XXI века, вызванное процессами глобального изменения климата.

Этот прогноз заставляет ученых и инженеров искать все более эффективные конструкции систем вентиляции и кондиционирования, разрабатывать оригинальные схемы циркуляции воздушных масс в здании.

Исследования [4-5] показывают, что естественная и частично механизированная вентиляция имеют значительный потенциал в области энергосбережения.

Среди положительных сторон естественных и гибридных систем вентиляции не только снижение капитальных и эксплуатационных расходов, но и более благоприятный микроклимат, оказывающий непосредственное влияние на организм человека.

Подача приточного воздуха через открытые проемы наружных ограждений позволяет снизить урбанистическую нагрузку на психику посетителей или проживающих.

Такой эффект достигается во многом благодаря сохранению естественной ионизации

наружного воздуха, благодаря чему, немеханизированные системы создают в помещениях микроклимат, максимально приближенный к естественному.

При этом механические системы вентиляции полностью нивелируют положительный эффект ионизированного воздуха при обработке его в секциях приточных установок и при движении его в воздуховодах. Как следствие, процент посетителей, удовлетворенных качеством воздушной среды в помещениях с такой вентиляцией меньше, чем в помещениях с полностью или частично естественной вентиляцией.

Следует отметить, что, несмотря на повсеместное распространение механических систем кондиционирования, проблема обеспечения качественных параметров микроклимата до сих пор не всегда бывает решена.

Данная статья посвящена разработке оригинального способа организации воздухообмена для обеспечения вентиляции административных зданий.

Существует большое разнообразие схем организации воздухообмена при гибридной вентиляции. Приток и вытяжка могут быть централизованными или местными.

Помимо конкретного выбора системы можно по-разному использовать природные силы, такие как гравитационный и ветровой напор и солнечное излучение.

Гравитационный напор можно увеличить за счет добавления высоты шахты или дополнительного нагревания в ней воздуха [6]. Полный штиль, как погодное явление, встречается довольно редко. Скорость ветра зависит от высоты, и места расположения здания.

В городской застройке поведение потоков воздуха бывает не просто предсказать.

Для решения этой задачи сейчас используются методы численного моделирования внешней задачи воздушного режима здания.

Перепад располагаемого давления можно увеличить за счет особой архитектуры здания и формы оголовков вентиляционных шахт.

В этих целях могут использоваться, например, вытяжные отверстия в форме трубки Вентури [7]. Высокие температуры наружного воздуха зачастую наблюдаются при довольно сильном солнечном излучении. Теплота, полученная от солнца, может направляться на нагрев вытяжных каналов системы вентиляции или передаваться на побудитель тяги посредством фотоэлектрической схемы для нормализации работы вентиляции.

Довольно известным решением для гибридной вентиляции является использование двойных фасадов [8]. В этом случае оболочка здания состоит из двух слоев, зазор между которыми работает как солнечный коллектор. Нагретый в этом проеме воздух стремится вверх и создает в помещениях здания разрежение.

Благодаря этому повышается гидравлическая устойчивость систем вентиляции в теплый период. По аналогии с двойными фасадами разработана и схема вентиляции, при которой вытяжной воздуховод прокладывается на наружной стороне здания. Правда, этот способ применим только в очень теплой местности.

В большинстве случаев проектные решения, предусматривающие использование гибридных систем, являются индивидуальными, так как они не применяются в зданиях типовой архитектуры. Происходит это ввиду пока еще недостаточно глубокой проработки темы энерго-сберегающей вентиляции и привязанности проектировщиков к традиционным решениям. Поэтому унификация таких проектов затруднительна.

Постановка задачи. Данное исследование ставит задачей разработку технических приемов, которые смогут применяться повсеместно при проектировании систем гибридной вентиляции в административных зданиях.

Отдельного внимания заслуживает схема воздухообмена, в которой обратная тяга представляет собой еще один способ вентиляции.

С учетом данных положений в задачи исследования входило:

1. Рассмотреть возможность применения принципа реверсирования воздушных потоков для системы централизованной вентиляции.
2. Разработать конкретную схему воздухообмена реверсивной вентиляции, которая будет учитывать особенности микроклимата административных зданий.

3. Выбрать тип заполнения воздухопроницаемого элемента и обосновать этот выбор.
4. Определить условия смены направления движения воздуха в системе вентиляции и область ее применения.
5. Сформировать перечень оборудования, необходимого для работы такой системы.
6. Рассмотреть влияние приточно-вытяжных устройств на тепло-влажностный режим наружных ограждений.

Методы исследования. Идея применения принципа реверсирования воздушных потоков не нова в инженерной практике. Со второй половины 20 века получен ряд патентов на системы реверсивной вентиляции и устройства, реализующие этот метод [9-12].

В работах [13-16] частично излагается принцип работы реверсивной вентиляции с учетом обеспечения параметров микроклимата в помещениях здания. Эти материалы также содержат исследования теплообмена в пористых средах регенеративных теплообменников, применявшихся при реверсивной вентиляции ранее.

До нашего времени, не была выявлена попытка реализовать принцип реверсирования в централизованных системах вентиляции зданий из-за неудачных конструктивных решений и по экономическим показателям, что привело к необходимости изучения систем реверсивной вентиляции в рамках проводимого исследования.

Обсуждение результатов. Реверсивная вентиляция представляет собой систему, в которой воздух изменяет направление движения по воздуховодам, в зависимости от наружных метеорологических условий, что происходит при последовательной смене холодного и теплого периодов года.

Такая система имеет два режима работы:

1. Естественное движение воздуха (приток воздуха с улицы в помещения через приточно-вытяжные устройства, движение воздуха в каналах или воздуховодах и удаление воздуха в верхней части здания: на кровле, в зоне чердака или технического этажа).
2. Обратное движение воздуха (забор притока в верхней части здания, движение воздуха по каналам или воздуховодам в помещения и удаление его через приточно-вытяжное устройство).

Для нормальной работы система должна быть оборудована индивидуальными приточно-вытяжными устройствами, воздуховодами для перемещения воздуха, приточной установкой, набором регулирующих клапанов и метеостанцией, определяющей скорость и направление ветра, а также температуру наружного воздуха.

Схемы работы системы реверсивной вентиляции представлены на рис. 1 и 2.

Естественный режим работы системы реверсивной вентиляции имеет место в холодный период года, когда приточный воздух поступает в помещения здания через приточно-вытяжные устройства, после чего удаляется из помещений через воздуховоды под действием естественных сил.

Приточная установка отключена от системы воздуховодов клапанами и в указанном режиме бездействует. Индивидуальные приточно-вытяжные устройства располагаются под окном в проеме наружной стены за отопительным прибором, поэтому приточный воздух попадает в помещение, обтекая отопительный прибор с минимальными скоростями и нагреваясь. Тепловая мощность отопительного прибора подбирается так, чтобы компенсировать тепловые потери помещения за счет теплопередачи и нагревать приточный воздух до температуры, соответствующей санитарным нормам.

Как известно, начало переходного периода года характеризуется среднесуточной температурой наружного воздуха $+8^{\circ}\text{C}$. В этот период система отопления уже отключена, а обогрев помещений здания предусматривается теплотой, аккумулированной внутренними и наружными ограждениями и внутренними теплопоступлениями.

В таких условиях нагревание приточного воздуха системой отопления невозможно, поэтому режим работы системы вентиляции меняется на обратный.

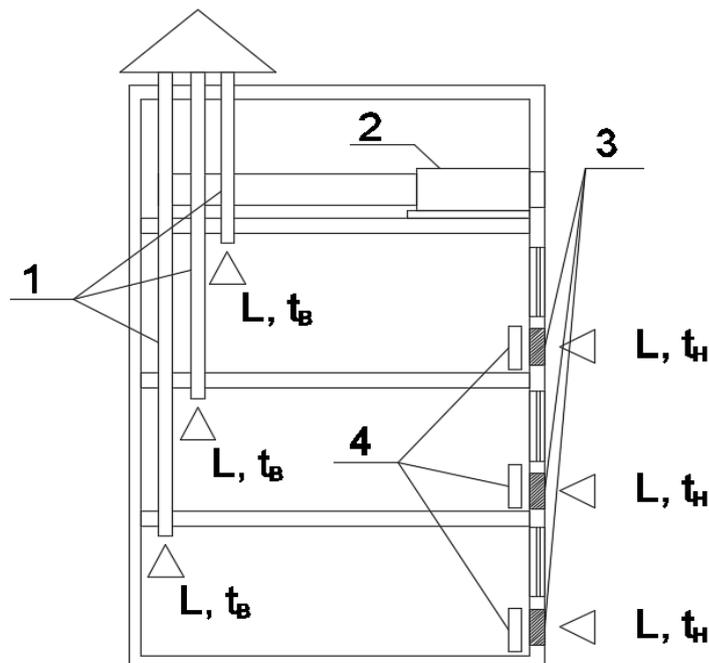


Рис. 1. Схема естественного режима работы системы реверсивной вентиляции
 1-воздуховоды системы вентиляции, 2-приточная установка, 3-индивидуальные приточно-вытяжные устройства, 4-отопительные приборы
Fig. 1. Scheme of the natural operating mode of the reversible ventilation system.
 1-ventilation ducts of the ventilation system, 2-supply installation, 3-individual supply-and-extract devices, 4-heating devices

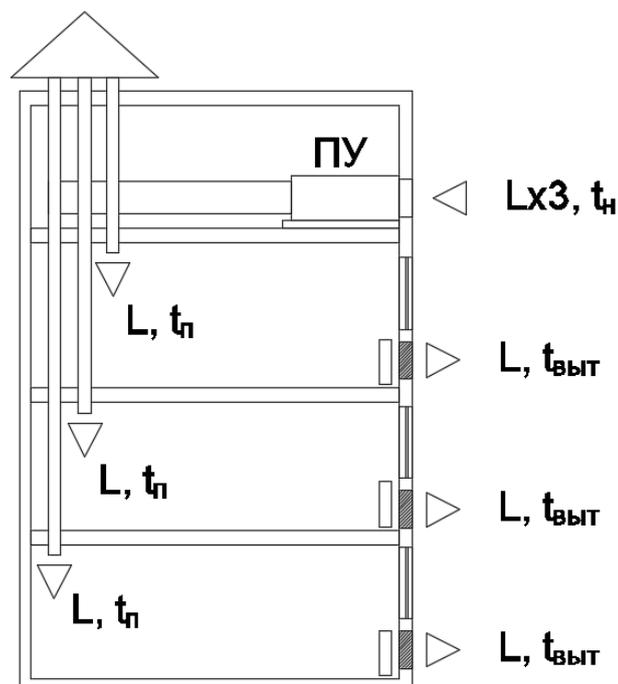


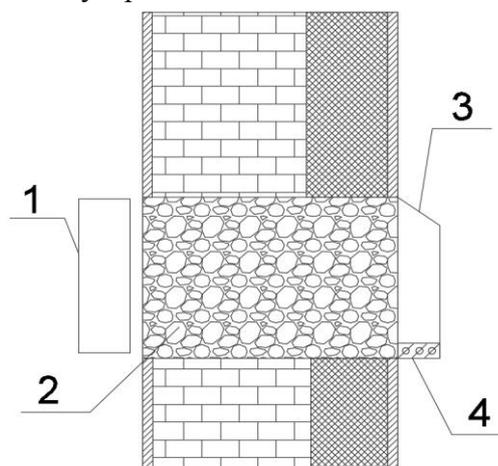
Рис. 2. Схема обратного режима работы системы реверсивной вентиляции
Fig. 2. Diagram of reverse operation of the reversible ventilation system

В этом режиме наружный воздух забирается с улицы приточной установкой, расположенной на техническом этаже помещения, обрабатывается в её секциях и подается по вентиляционным каналам в обратном направлении в помещения.

При этом вытяжная шахта системы вентиляции отключается от сети воздуховодов кла-

панами. После ассимиляции тепловлагоизбытков загрязненный воздух из помещения удаляется через индивидуальные приточно-вытяжные устройства на улицу.

Схема приточно-вытяжного устройства системы вентиляции представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Схема индивидуального приточно-вытяжного устройства
1-отопительный прибор, 2-воздухопроницаемый элемент приточно-вытяжного
устройства, 3-ветроотбойный щиток, 4-регулирующий клапан**

**Fig. 3. The scheme of the individual supply-and-exhaust device. 1-heating device,
2-air-permeable element of the supply and exhaust device, 3-windbreaker, 4-control valve**

В качестве воздухопроницаемого элемента индивидуального приточно-вытяжного устройства предлагается использовать пористый материал, который позволит устройству пропускать расчетный объем воздуха.

Так как количество воздуха, фильтрующегося через пористый материал, зависит от перепада давления между наружным и внутренним воздухом, то для обеспечения постоянства расхода в конструкции приточно-вытяжного устройства предусмотрен регулирующий клапан.

Степень открытия створок клапана принимается исходя из величины перепада давления, формирующегося между наружной стороной приточно-вытяжного устройства и оголовком вентиляционной шахты. Этот перепад определяется аналитически на основании данных о скорости и направлении ветра, температуры наружного воздуха и численных решениях внешней задачи воздушного режима здания или по существующим эмпирическим зависимостям, представленным в СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия».

При отрицательном перепаде давления в холодный период года клапан должен находиться в закрытом состоянии, так как эксфильтрация внутреннего воздуха через пористый материал приведет к его увлажнению и снижению пропускной способности приточно-вытяжного устройства. При относительно длительной эксфильтрации может происходить выпадение капельной влаги в толще воздухопроницаемого материала с ее последующим замораживанием и нарушением пористой структуры проницаемого элемента.

Исследования гидравлического и теплового режима пористых материалов реверсивных теплообменников представлены в публикациях [17, 19-20, 22]. Публикации [18, 21, 23] посвящены исследованию тепловых и гидравлических характеристик регулярных и нерегулярных засыпок, также отчасти являющихся пористыми материалами, которые могут быть применены для заполнения проницаемого элемента индивидуального приточно-вытяжного устройства. На основании этих исследований можно утверждать, что пористые материалы и засыпки применимы для фильтрации вентиляционного воздуха.

Наблюдается также и существующая на протяжении 25 лет тенденция установки приточных клапанов в наружные ограждения с целью повышения воздухообмена в помещениях с системами естественной и механической вентиляции. В отношении применения приточных клапанов мнения исследователей различны. Так, например, в публикациях [24-26] авторы относятся к ним положительно, а в публикациях [27-28] имеет место диаметрально противоположная точка зрения.

Одной из проблем приточных клапанов является малая площадь сечения отверстия для прохождения приточного воздуха, которая формирует струю, попадающую в рабочую зону помещения с недопустимыми по санитарным нормам параметрами.

В рассматриваемом индивидуальном приточно-вытяжном устройстве, заполненном пористым материалом, благодаря большой площади поперечного сечения, создается равномерное поле малых скоростей воздуха (до 0,05 м/с). Это позволяет быстро и безопасно подогреть его отопительным прибором, чем исключается формирование локально переохлажденных зон в обслуживаемом помещении.

Вывод. Реверсивная система вентиляции имеет ограниченную область применения.

В частности она не может быть использована в жилых зданиях, так как в обратном режиме работы приточный воздух будет поступать в относительно грязные помещения санузлов и кухонь и переносить влагу, теплоту и неприятные запахи в помещения.

Такая система также неприменима в помещениях, где существуют вредные выделения, которые могут осаждаться на стенках вентиляционных каналов и, впоследствии, выноситься в помещения при обратном режиме работы.

Использование предлагаемой системы вентиляции позволяет обеспечивать нормативный воздухообмен, без использования приточной установки в холодный период года.

Такое применение реверсирования потоков воздуха позволяет наиболее полно использовать потенциал естественных сил для обеспечения воздухообмена помещений.

Библиографический список:

1. Christenson M. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland /M. Christenson, H. Manz, D.Gyalistras //Energy Conversion and Management. 2005. № 47. - С. 671-686.
2. Frank T. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland/Energy and Buildings./ 2005. № 37. - С. 1175-1185.
3. Kolokotroni M. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies/ M. Kolokotroni, I. Giannitsaris, R. Watkins // Solar Energy. 2006. № 80. - С. 383-392.
4. Artmann N. Cooling of the building structure by night-time ventilation: PhD thesis/ N. Artmann.Aalborg University, Department of Civil Engineering Indoor Environmental Engineering Research Group. Denmark.2008.
5. «Use the interaction of gravitational forces, the sun and wind for effective ventilation»./P. van den Engel, R. Kemperman, H. Doolard./ «REHVA»./ aug. 2012./
6. «Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind». P. Van den Engel, R. Kemperman, H. Doolard, REHVA, aug. 2012., pp. 25-32.
7. Blocken B., Hoof T. Van, Aanan L., Bronsema B. «Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocked effect.», Computers & Fluids., 26., April., 2011
8. Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind. Xiao-li Xu, Zhao Yang. Energy and Buildings. Volume 40, Issue 8, 2008, pp. 1498-1504
9. Hermann J. W. Патент на систему вентиляции [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> - (дата обращения 17.10.2017)
10. Аристов Ю. И., Мухин В. А., Мезенцев И. В. Патент на способ регулирования теплообмена в системе вентиляции офисных и жилых помещений и устройство для реализации этого способа [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> - (дата обращения 17.10.2017)
11. Мальсагов А. Х. Патент на устройство климат-системы для помещений [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://bd.patent.su/2360000-2360999/pat/servlet2e9c.html> - (дата обращения 17.10.2017)
12. Богословский В. Н., Титов В. П., Парфентьева Н.А., Медведева Е. В. Патент на установку для вентиляции помещений [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://patents.su/2-628385-ustanovka-dlya-ventilyacii-pomeshhenij.html> - (дата обращения 17.10.2017)
13. Dong Chen. Periodically reversible supply/exhaust ventilation strategy // Building and Environment. - 2017. -v. 124 (November). pp. 2590-2597.
14. Aristov Yu. I. A New approach to heat and moisture regeneration in the ventilation system of rooms. I. laboratory prototype of the regenerator / Yu. I. Aristov, I. V. Mezentsev, V. A. Mukhin// Journal of engineering physics and thermophysics. 2006. №3 (79). pp.569-576.
15. Aristov Yu. I. A New approach to heat and moisture regeneration in the ventilation system of rooms. II. prototype of the real device / Yu. I. Aristov, I. V. Mezentsev, V. A. Mukhin// Journal of engineering physics and thermophysics. 2006. №3 (79). - С.577-584.
16. Aristov, Yu. I. A New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems / Yu. I. Aristov, I. V. Mezentsev, V. A. Mukhin// Energy and buildings. 2008. №3 (40). С. 204-208.

17. Nakoryakov, V. E. Investigations of nonstationary heat exchange for filtration in pervious media / V. E. Nakoryakov, V. A. Mukhin, N. N. Smirnova // Journal of engineering thermophysics. 1992. №2 (2). С. 103-119.
18. Dekhtyar R. A. Heat transfer in a packed bed at moderate values of the Reynolds number / R. A. Dekhtyar, D. Ph. Sikovsky, A. V. Gorin, V. A. Mukhin // High temperature. 2002. №5 (40). С. 693-700.
19. Gorin A. V. Turbulent heat and mass transfer in complex geometry channels // отчет НИР/НИОКР. 1999.
20. Nizovtsev M. I. Regenerative heat exchanger with a periodic change in the airflow direction for room ventilation / M. I. Nizovtsev, V. Y. Borodulin, V. N. Letushko // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. №6 (22). - С. 785-796.
21. Mezentsev I. V. Теплообмен в зернистых средах при реверсивных режимах фильтрации // Молодой ученый. 2010 № 10. С. 17-20.
22. Mezentsev I. V. Experimental study and mathematical modeling of heat transfer processes in heat accumulating media / I. V. Mezentsev, N. V. Vernikovskaya, Yu. I. Aristov, V. A. Mukhin // Thermophysics and Aeromechanics. 2006. №3 (13). С. 435-442.
23. Титов В.П., Парфентьева Н.А., Медведева Е.В. Пористый регенеративный теплообменник с неподвижной насадкой // Водоснабжение и санитарная техника. 1981. №4. С. 27-28.
24. Ватин Н. И. Системы вентиляции жилых помещений многоквартирных домов: учеб. пособие / Н. И. Ватин, Т. В. Самопляс. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 44 с.
25. Zhilina T. S. Efficiency of natural ventilation in residential buildings / T. S. Zhilina, S. D. Vyatkina, Yu. S. Vyatkina // Фундаментальные исследования. 2017. №7. С. 25-29.
26. Bodrov M. V. Determining the actual performance of natural ventilation systems with a vertical gathering main of multifamily houses / M. V. Bodrov, V. P. Boldin, V. Yu. Kuzin, M. N. Kucherenko // Приволжский научный журнал. - 2015. - №1(33). - С. 54-59.
27. Рымаров А. Г., Кравчук В. Ю. Исследование применения воздушных клапанов в квартире жилого здания в холодный период // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2016. №12 (180). - С. 70-71.
28. Ильин, И. В. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней / И. В. Ильин, И. Ю. Игнаткин, М. Г. Курячий // Эффективное животноводство. - 2011. - №7. - С. 30-31.

References:

1. Christenson M., Manz H., Gyalistras D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. Energy Conversion and Management. 2005;47:671-686.
2. Frank T. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. Energy and Buildings. 2005;37:1175-1185.
3. Kolokotroni M., Giannitsaris I., Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. Solar Energy. 2006;80:383-392.
4. Artmann N. Cooling of the building structure by night-time ventilation: PhD thesis. Aalborg University, Department of Civil Engineering, Indoor Environmental Engineering Research Group. Denmark; 2008.
5. Van den Engel P., Kemperman R., Doolaard H. Use the interaction of gravitational forces, the sun and wind for effective ventilation. REHVA. Aug. 2012.
6. Van den Engel P., Kemperman R., Doolaard H. Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind. REHVA. Aug. 2012. P.25-32.
7. Blocken B., Van Hoof T., Aanen L., Bronsema B. Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocked effect. Computers & Fluids. 2011. April, 26.
8. Xu X.-L., Yang Z. Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind. Energy and Buildings. 2008;40(8):1498-1504.
9. Hermann J.W. Patent na sistem uventilyatsii [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> (Data obrashcheniya 17.10.2017). [Hermann J.W. Patent for the ventilation system [Electronic resource]. Available at: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> (Access date 17.10.2017). (In Russ.)]
10. Aristov Yu. I., Mukhin V. A., Mezentsev I. V. Patent na sposob regulirovaniya teplotobmena v sisteme ventilyatsii ofisnykh i zhilykh pomeshchenii i ustroystvo dlya realizatsii etogo sposoba [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> (data obrashcheniya 17.10.2017). [Aristov Yu. I., Mukhin V. A., Mezentsev I. V. Patent for the method of regulation of heat exchange in the ventilation system of office and residential buildings and the device for implementing this method [Electronic resource]. Available at: <http://bd.patent.su/2277000-2277999/pat/servlet10be.html> (access date 17.10.2017). (In Russ.)]
11. Mal'sagov A. Kh. Patent na ustroystvo klimat-sistemy dlya pomeshchenii [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://bd.patent.su/2360000-2360999/pat/servlet2e9c.html> (data obrashcheniya 17.10.2017). [Mal'sagov A. Kh. Patent for the device of a climate system for rooms [the Electronic resource]. Available at: <http://bd.patent.su/2360000-2360999/pat/servlet2e9c.html> (access date 17.10.2017). (In Russ.)]
12. Bogoslovskii V. N., Titov V. P., Parfent'eva N. A., Medvedeva E. V. Patent na ustanovku dlya ventilyatsii pomeshchenii [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://patents.su/2-628385-ustanovka-dlya-ventilyatsii-pomeshchenii.html> (data obrashcheniya 17.10.2017). [Bogoslovskii V. N., Titov V. P., Parfent'eva N. A., Medvedeva E. V. Patent for installation for ventilation of rooms [Electronic resource]. Available at: <http://patents.su/2-628385-ustanovka-dlya-ventilyatsii-pomeshchenii.html> (access date 17.10.2017). (In Russ.)]

13. Dong C. Periodically reversible supply/exhaust ventilation strategy. *Building and Environment*. 2017;124:2590-2597.
14. Aristov Yu.I., Mezentsev I.V., Mukhin V.A. A New approach to heat and moisture regeneration in the ventilation system of rooms. I. Laboratory prototype of the regenerator. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2006;3(79):569-576.
15. Aristov Yu.I., Mezentsev I.V., Mukhin V.A. A New approach to heat and moisture regeneration in the ventilation system of rooms. II. Prototype of the real device. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2006;3(79):577-584.
16. Aristov Yu.I., Mezentsev I.V., Mukhin V.A. A New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems. *Energy and buildings*. 2008;3(40):204-208.
17. Nakoryakov V. E., Mukhin V.A., Smirnova N.N. Investigations of nonstationary heat exchange for filtration in pervious media. *Journal of engineering thermophysics*. 1992;2(2):103-119.
18. Dekhtyar R. A., Sikovsky D.Ph., Gorin A.V., Mukhin V.A. Heat transfer in a packed bed at moderate values of the Reynolds number. *High temperature*. 2002;5(40):693-700.
19. Gorin A.V. Turbulent heat and mass transfer in complex geometry channels. NIR/NIOKR report. 1999.
20. Nizovtsev M.I., Borodulin V.Y., Letushko V.N. Regenerative heat exchanger with a periodic change in the air-flow direction for room ventilation. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015;6(22):785-796.
21. Mezentsev I.V. Teploobmen v zernistykh sredakh pri reversivnykh rezhimakh fil'tratsii. *Molodoi uchenyi*. 2010;10:17-20. [Mezentsev I.V. Teploobmen v zernistykh sredakh pri reversivnykh rezhimakh fil'tratsii. *Molodoi uchenyi*. 2010;10:17-20. Heat transfer in granular media with reversible filtration regimes. *The young scientist*. 2010;10:17-20. (In Russ.)]
22. Mezentsev I.V., Vernikovskaya N.V., Aristov Yu.I., Mukhin V.A. Experimental study and mathematical modeling of heat transfer processes in heat accumulating media. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2006;3(13):435-442.
23. Titov V.P., Parfent'eva N.A., Medvedeva E.V. Poristy regenerativnyy teploobmennik s nepodvizhnoy nasadkoi. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 1981;4:27-28. [Titov V.P., Parfent'eva N.A., Medvedeva E.V. Porous regenerative heat exchanger with fixed nozzle. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1981;4:27-28. (In Russ.)]
24. Vatin N.I., Samoplyas T.V. *Sistemy ventilyatsii zhilykh pomeshchenii mnogokvartirnykh domov: ucheb. posobie*. SPb.: Izd-vo SPbGPU; 2004. 44 s. [Vatin N.I., Samoplyas T.V. *Ventilation systems for living quarters of apartment buildings: textbook*. St. Petersburg: Publishing house of SPbSPU; 2004. 44 p. (In Russ.)]
25. Zhilina T.S., Vyatkina S.D., Vyatkina Yu.S. Efficiency of natural ventilation in residential buildings. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017;7:25-29. [Zhilina T.S., Vyatkina S.D., Vyatkina Yu.S. Efficiency of natural ventilation in residential buildings. *Fundamental research*. 2017;7:25-29. (In Russ.)]
26. Bodrov M.V., Boldin V.P., Kuzin V.Yu., Kucherenko M.N. Determining the actual performance of natural ventilation systems with a vertical gathering main of multifamily houses. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2015;1(33):54-59. [Bodrov M.V., Boldin V.P., Kuzin V.Yu., Kucherenko M.N. Determining the actual performance of natural ventilation systems with multifamily houses. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2015;1(33):54-59. (In Russ.)]
27. Rymarov A.G., Kravchuk Y.U. Issledovanie primeneniya vozdukhnykh klapанov v kvartire zhilogo zdaniya v hodochny period // *Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie*. 2016; 12 (180): 70-71. [Rymarov A.G., Kravchuk Y.U. Investigation of the use of air valves in the apartment of a residential building in the cold period. *Plumbing, Heating, Conditioning*. 2016; 12 (180): 70-71. (In Russ.)]
28. Il'in I.V., Ignatkin I.Yu., Kuryachii M.G. Vliyanie parametrov mikroklimata na produktivnost' svinei. *Effektivnoe zhivotnovodstvo*. 2011;7:30-31. [Il'in I.V., Ignatkin I.Yu., Kuryachii M.G. Influence of microclimate parameters on the productivity of pigs. *Effektivnoe zhivotnovodstvo*. 2011;7:30-31. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Кравчук Валерий Юрьевич – ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Рымаров Андрей Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции.

Information about the authors:

Valery Yu. Kravchuk – Assistant, Department of Heat, ventilation and air condition.

Andrey G. Rymarov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Heat, ventilation and air condition.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 19.09.2017.

Принята в печать 28.10.2017.

Conflict of interest.

Received 19.09.2017.

Accepted for publication 28.10.2017.

Для цитирования: Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Статистический анализ акселерограмм реальных сильных землетрясений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):170-183 DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-170-183

For citation: Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Statistical analysis of accelerograms of real strong earthquakes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 170-183. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-170-183

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699.8

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-170-183

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКСЕЛЕРОГРАММ РЕАЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Муселемов Х.М.³, Устарханов О.М.¹, Юсупов А.К.²

¹⁻³ Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹ e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, ² e-mail: abusupk@mail.ru, ³ e-mail: hairulla213@mail.ru

Резюме: Цель. В статье отражены результаты статистического анализа реальных акселерограмм. С этой целью графики реальных акселерограмм увеличиваются по абсциссе и ординате, что позволяет производить соответствующие замеры и представлять записи акселерографов в виде числовых таблиц. Для обработки таблиц строится математическая модель, которая позволяет выполнять статистические исследования реальных акселерограмм. **Метод.** Ускорение поверхности земли при землетрясении представляется в виде нестационарного случайного гауссовского процесса. В настоящее время такой подход считается общепризнанным и не вызывает сомнения. Нестационарный процесс, описывающий ускорение поверхности земли, моделируется в виде функции трех случайных параметров. При этом реальная акселерограмма, которая представлена в единственном экземпляре, моделируется случайной эргодической функцией. **Результат.** Приводятся акселерограммы сильных реальных землетрясений, и соответствующие им фрагменты таблиц. Подробно излагается алгоритм, позволяющий определять все параметры корреляционных функций и спектральных плотностей, соответствующих реальных землетрясений. Приведены результаты обсуждения особенностей построения алгоритма, который позволяет вычислять статистические характеристики землетрясения: доминантную частоту, среднеквадратическое отклонение, коэффициент корреляции, коэффициент, учитывающий не стационарность процесса землетрясения. Вычислены параметры корреляционных функций акселерограмм сильных землетрясений, которые произошли в городах Тафт (США) и Газли (Узбекистан). Результаты исследования представлены в виде графиков и таблиц. **Вывод.** Построенный авторами алгоритм позволяет выполнять статистические исследования сильных землетрясений, акселерограммы которых даются в единственном экземпляре, и вычислять параметры соответствующих корреляционных функций. Изложенный алгоритм может быть использован при статистическом анализе акселерограмм сильных землетрясений. Параметры корреляционных функций могут найти применение при исследовании сейсмостойкости зданий, как с пассивной, так и с активной сейсмозащитой.

Ключевые слова: акселерограмма, нестационарный процесс, случайные параметры, огибающая, доминантная частота

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

Khairulla M. Muselemov³, Osman M. Ustarkhanov,¹ Abusupyan K. Yusupov²

¹⁻³Daghestan State Technical University,

¹⁻³70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, ²e-mail: abusupk@mail.ru, ³e-mail: hairulla213@mail.ru

STATISTICAL ANALYSIS OF ACCELEROGRAMS OF REAL STRONG
EARTHQUAKES

Abstract. Objectives The statistical analysis of real accelerograms is considered. For this purpose, graphs of real accelerograms are enlarged in abscissa and ordinate, allowing the appropriate measurements to be made and the accelerograph records to be presented in the form of numerical tables. To process these tables, a mathematical model is constructed that allows statistical studies of actual accelerograms to be carried out. **Methods** The acceleration of the Earth's surface during an earthquake is represented as a non-stationary random Gaussian process. The non-stationary process describing the acceleration of the Earth's surface is modelled as a function of three random parameters. In this case, the real accelerogram, which is presented in a single copy, is modelled by a random ergodic function. **Results** Accelerograms of strong real earthquakes and corresponding fragments of tables are given. An algorithm that allows all parameters of correlation functions and spectral densities to be determined corresponding to real earthquakes is described in detail. A constructed algorithm that allows the statistical parameters of an earthquake to be calculated, including the dominant frequency, the standard deviation, the correlation coefficient and a coefficient that takes into account the non-stationary nature of the earthquake process, is discussed. The parameters of the correlation functions of accelerograms of strong earthquakes that occurred in the cities of Taft (USA) and Gazli (Uzbekistan) are calculated. The results of the study are presented in the form of graphs and tables. **Conclusion** The algorithm constructed by the authors allows the statistical study of strong earthquakes, whose accelerograms are presented in a single copy, to be carried out and the corresponding correlation function parameters to be calculated. The proposed algorithm can be used for the statistical analysis of accelerograms of strong earthquakes. The parameters of correlation functions can find application in the investigation of seismic resistance of buildings, both with passive and active seismic protection.

Keywords: accelerogram, non-stationary process, random parameters, envelope curve, dominant frequency

Введение. Ускорение поверхности земли при землетрясении, как известно [4-6,12], представляет собой нестационарный случайный процесс.

В настоящее время модель нестационарного случайного процесса, которая применяется для описания ускорения поверхности земли, следует считать общепризнанной в мировой практике. Поскольку реальные акселерограммы для конкретного строительного участка (региона) удается записывать в единственном экземпляре, ее статистическая обработка затруднена. В практике проектирования сейсмостойких зданий применяются различные методы сейсмозащиты [1-3,8-9,11-12]. Поэтому приходится строить адекватные математические модели, которые позволяют построить корреляционные функции ускорения поверхности земли как нестационарного процесса. В настоящей статье даются алгоритм построения корреляционной функции и приведены примеры, соответствующие сильным реальным землетрясениям.

Постановка задачи. Требуется построить алгоритм, позволяющий получить корреляционную функцию ускорения поверхности земли как нестационарного случайного процесса. Для иллюстрации особенностей этого алгоритма следует рассмотреть реальные акселерограммы сильных землетрясений, которые произошли в городах Тафт и Газли (Каракыр). Привести аналитические выражения корреляционных функций и соответствующие их параметры. Ре-

зультаты представить в виде графиков и таблиц. Обсудить особенности статистического анализа акселерограмм, представленных единичными экземплярами. Сформулировать выводы.

Методы исследования. Ускорение поверхности Земли обозначим через $W(t)$:

$$W(t) = Y''_{осн} \quad (1)$$

Здесь $W(t)$ – нестационарный случайный гауссовский процесс, определяемый статистической обработкой некоторого набора акселерограмм, записанных экспериментально приборами для данного района строительства при сильных землетрясениях.

На рис.1. дается графическое представление ускорения поверхности Земли.

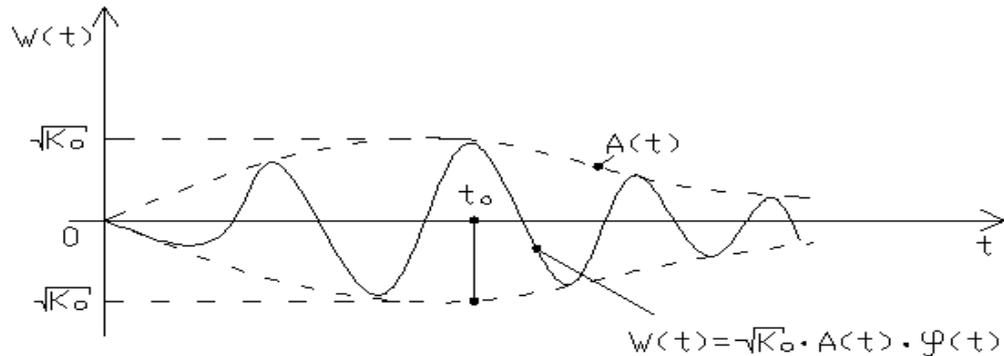


Рис.1. Графическое представление ускорения поверхности Земли
Fig.1. Graphical representation of the acceleration of the Earth's surface

Обычно, ускорение (1) моделируют [12] так:

$$W(t) = \sqrt{K_0} \cdot A(t) \cdot \varphi(t) \quad (2)$$

Здесь: $t \in (0; \infty)$; K_0 – дисперсия ускорения $W(t)$, (рис.1);

$A(t)$ – огибающая функции (рис.1):

$$A(t) = \varepsilon \cdot e \cdot t \cdot e^{-\varepsilon \cdot t} \quad (3)$$

Располагая наибольшим значением стандарта $\sqrt{K_0}$, можно определить [12] все входящие в (3) параметры: $t_0 = \frac{1}{\varepsilon}$, t_0 – соответствует наибольшему значению стандарта $\sqrt{K_0}$, (рис. 1.) $e \approx 2,72$ – основание натуральных логарифмов.

Располагая доминантным периодом колебаний поверхности Земли T , можно [12] определить все входящие в формулу (3) параметры.

Я. М. Айзенбергом предложены эмпирические формулы:

$$\begin{aligned} \sqrt{K_0} &= \frac{150}{\sqrt{T}} - \text{для 9 баллов;} \\ \sqrt{K_0} &= \frac{75}{\sqrt{T}} - \text{для 8 баллов;} \\ \sqrt{K_0} &= \frac{37.5}{\sqrt{T}} - \text{для 7 баллов.} \end{aligned} \quad (4)$$

Эти формулы удовлетворительно согласуются с данными акселерограмм, особенно при $T > 0,6$ с.

Доминантная частота колебаний поверхности Земли при землетрясении $\Omega = \frac{2\pi}{T}$.

В формулах (4) баллы – по шкале ИФЗ (г. Москва); период измеряется в секундах, а

средний квадрат ускорения $\sqrt{K_0}$ в $\left[\frac{см}{с^2} \right]$.

В выражении (2)

$\varphi(t)$ – гауссовский стационарный случайный процесс с нормированной корреляционной функцией

$$K_\varphi = K_\varphi(t-t') = e^{-\rho|t-t'|} \cos \Omega(t-t'), \quad (5)$$

которой соответствует [3,13] спектральная плотность

$$S_\varphi(\theta) = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\theta^2 + \rho^2 + \Omega^2}{(\theta^2 - \rho^2 - \Omega^2)^2 + (2\theta \cdot \rho)^2}, \quad (6)$$

где

$$\rho = 0,5 \Omega, \quad \varepsilon = (0,03 - 0,15) \Omega. \quad (7)$$

Стационарный процесс $\varphi(t)$ можно моделировать [7, 10, 13] тригонометрической функцией:

$$\varphi(t) = p \cdot \cos \theta t + u \cdot \sin \theta t. \quad (8)$$

Здесь: θ, p, u – случайные величины.

Нормальные случайные величины p и u некоррелированы и имеют единичную дисперсию. Это позволяет совместную плотность распределения вероятностей этих величин записать так:

$$f_1(p, u) = \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (p^2 + u^2)} \quad (9)$$

Плотность распределения случайной частоты θ можно представить [14] в виде нормированной на положительной полуоси спектральной плотности:

$$f_2(\theta) = 2 \cdot S_\varphi(\theta) \cdot e(\theta), \quad (10)$$

где $S_\varphi(\theta)$ – дана функцией (6), единичная функция

$$e(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \theta \geq 0, \\ 0 & \text{при } \theta < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Поскольку амплитуды и частоты некоррелированы, то совместную плотность 3-х случайных величин p, u, θ можно представить произведением:

$F_3(p, u, \theta) = f_1(p, u) f_2(\theta)$ или с учетом (9) и (10)

$$f_3(p, u, \theta) = \frac{1}{\pi} S_\varphi(\theta) \cdot e(\theta) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(p^2 + u^2)\right], \quad (12)$$

где $S_\varphi(\theta)$ – определяется выражением (6).

Таким образом, ускорение поверхности земли при землетрясении моделируется нестационарной случайной функцией 3-х случайных величин:

$$W(t) = B \cdot (p \cos \theta \cdot t + u \sin \theta \cdot t) \cdot t \cdot e^{-\varepsilon t}, \quad (13)$$

$$\text{где } B = \varepsilon \cdot e \cdot \sqrt{K_0}. \quad (14)$$

На наш взгляд, имея реальные акселерограммы для сильного землетрясения (рис.1), можно определить стандарт $\sqrt{K_0}$, затем с помощью формул (6) и (12) представить совместную плотность всех 3-х случайных величин p, u, θ .

После чего случайная функция (13) вполне определена.

Построение корреляционной функции. Эта функция строится на основе статистической обработки акселерограмм, записанных приборами при сильных землетрясениях. Сильное землетрясение, как известно, – явление довольно редкое. Поэтому статистическую обработку,

обычно, приходится делать, располагая одной, единственной, реальной акселерограммой, соответствующей конкретному району строительства или региона.

Приведем алгоритм, по которому можно построить корреляционную функцию (5). Как свидетельствуют статистика землетрясений и практический опыт, содержательные результаты при статистической обработке удается получить, если принять гипотезу о нормальности случайного процесса (1). Другими словами, предполагается, что функция (1) есть нестационарный гауссовский случайный процесс. Это предположение – общепринятое, и оно не вызывает сомнений.

Далее будем считать, что мы располагаем одной единственной экспериментальной акселерограммой, записанной для некоторого конкретного района строительства при сильном землетрясении.

Экспериментальную функцию (кривую) акселерограммы обозначим через $\tilde{W}(t)$, аппроксимирующую функцию – через $W(t)$ – (см. равенство (1) и рис. 1.)

Тогда должно быть выполнено следующее условие:

$$W(t) = \tilde{W}(t) \quad (15)$$

Подставляя в равенство (15) выражения (2) и (3), получаем

$$\sqrt{K_0} \cdot \varepsilon \cdot e \cdot t \cdot e^{-\varepsilon \cdot t} \cdot \varphi(t) = \tilde{W}(t), \quad (16)$$

или, введя обозначение

$$z(t) = (\varepsilon \cdot e \cdot t)^{-1} \cdot e^{\varepsilon \cdot t} \cdot \tilde{W}(t), \quad (17)$$

имеем (e – основание натуральных логарифмов)

$$z(t) = \sqrt{K_0} \cdot \varphi(t). \quad (18)$$

Среднее значение функции (16) равно нулю: $\bar{z} = 0$.

Таким образом, мы перешли от равенства нестационарных функций (15) к равенству стационарных функций (17).

Случайная функция (16) является гауссовским стационарным процессом. Это позволяет нам вместо рассмотрения нестационарного процесса рассматривать стационарную функцию (16). Поскольку экспериментальная функция (кривая) $\tilde{W}(t)$, входящая в равенство (16), записана в промежутке времени ($0 \div T_0$) и представлена в единственном экземпляре, то приходится считать процесс $Z(t)$ – эргодическим. Следует учесть [6]: гауссовский случайный стационарный процесс $Z(t)$ можно считать эргодическим, если его корреляционная функция удовлетворяет условию:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lim_{(t-t') \rightarrow \infty} K_z(t-t') = 0, \\ T_0 \rightarrow \infty. \end{array} \right\} \quad (19)$$

Для реальных акселерограмм первое условие из (19) выполняется точно, а второе условие выполняется только приближенно: гипотеза об эргодичности процесса (16) не является

грубой. В функцию (16) входит параметр $\varepsilon = \frac{1}{t_0}$,

где t_0 – значение времени t , которому соответствует наибольшее значение экспериментальной кривой $\tilde{W}(t)$.

Поскольку функции $W(t)$ и $\tilde{W}(t)$ должны быть идентичными, то смысл точки t_0 можно выяснить по рис.1.

При оценке корреляционной функции условия (19) позволяют [13] усреднять процесс (16) не по реализациям, а **по времени**. С учетом этого запишем [13] выражение для вычисления корреляционной функции, получаемой на основе реальной акселерограммы:

$$\hat{K}_z(\tau) = \left[\frac{1}{m-i+1} \cdot \sum_{j=0}^{m-i} z(j \cdot \Delta) \cdot z(j \cdot \Delta + i \cdot \Delta) \right]. \quad (20)$$

Здесь: $z(t)$ – функция (16);

$\Delta = 0,01 \div 0,02$ секунды – шаг суммирования;

$i, j = 1, 2, 3, \dots (m - i)$;

$t - t' = \tau = i \cdot \Delta$;

$t = i \cdot \Delta$; $T_0 = m \cdot \Delta$ - продолжительность землетрясения, в пределах которой

записана реальная кривая $\tilde{W}(t)$. Отсюда $m = \frac{T_0}{\Delta}$.

Из выражения (20) при $\tau = 0$ можно получить дисперсию

$$K_o = \tilde{K}_z(0).$$

С другой стороны, из (18) имеем: $\tilde{K}_z(\tau) = K_o \cdot K_\varphi(\tau)$. (21)

При аппроксимации кривой (20) обычно пользуются функцией

$$K_z(\tau) = K_o \cdot e^{-\rho \cdot |\tau|} \cdot \cos \Omega \tau, \quad (22)$$

Здесь: $\tau = t - t'$,

ρ – коэффициент, характеризующий корреляцию;

Ω – преобладающая (доминантная) частота;

K_o – дисперсия процесса.

На рис. 2 и 3 приведены графики реальных акселерограмм сильных землетрясений.

Taft (USA): время землетрясения 21 июля 1952 г.;

магнитуда $M=7.6$;

глубина очага $\Delta=18$ км.

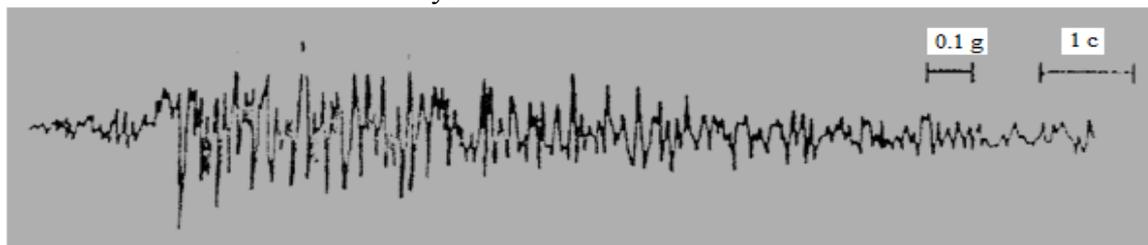


Рис. 2. Акселерограмма землетрясения в г.Тафт (США)

Fig.2. Accelerogram of the earthquake in Taft (USA)

$$t_i = i \cdot \Delta ; \quad \Delta = 1,557 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Газли (Узбекистан): время землетрясения 17 мая 1976г.;

магнитуда $M=7.3$;

глубина очага $\Delta=15$ км.

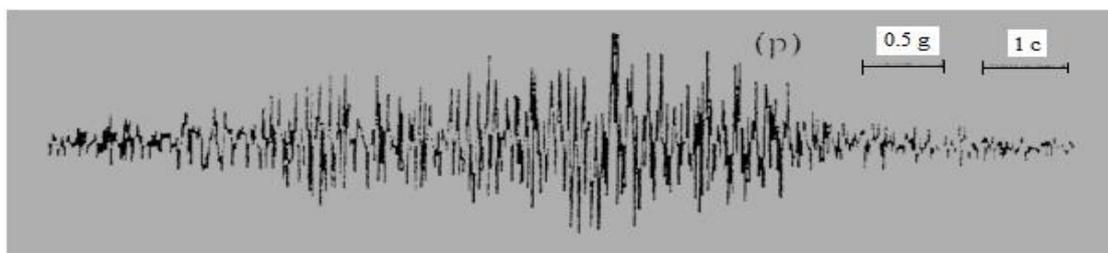


Рис.3. Акселерограмма землетрясения в г. Газли (Узбекистан)

Fig.3. Accelerogram of the earthquake in Gazli (Uzbekistan)

$$t_i = i \cdot \Delta \quad \Delta = 1,636 \cdot 10^{-2} \text{ с}$$

Чтобы была возможность делать замеры и представлять графические записи (рис.2 и 3) в виде чисел, мы увеличили акселерограммы в 4 раза по горизонтали и вертикали, составили соответствующие таблицы. При этом разбили абсциссы так, чтобы в пределах каждого периода

число дискретных точек было не менее пяти.

Таблицы 1 и 2 содержат 732 значения ускорения для города Тафт и 750 значений для города Газли. В статье мы приводим только небольшие их фрагменты.

Таблица 1. По городу Тафт
Table 1. By city Taft

i	k_i
1	-6,6
2	-9,9
3	13,2
4	9,9
5	-6,6
6	-13,2
7	3,3
8	16,5
9	23,1
10	19,8

i	k_i
51	-23,1
52	0
53	-36,3
54	-29,7
55	26,4
56	26,4
57	33
58	39,6
59	56,1
60	-39,6

i	k_i
101	66
102	85,8
103	95,7
104	-260,7
105	-207,9
106	-165
107	-122,1
108	13,2
109	42,9
110	105,6

i	k_i
151	69,3
152	69,3
153	-161,7
154	-161,7
155	105,6
156	-99
157	-92,4
158	-46,2
159	66
160	85,8

Таблица 2. По городу Газли
Table 2. By city Gazli

i	k_i
1	0,00
2	-99,6
3	0,00
4	99,6
5	58,1
6	24,9
7	-107,9
8	-41,5
9	66,4
10	74,7

i	k_i
51	-132,8
52	-132,8
53	149,4
54	-91,3
55	207,5
56	149,4
57	190,9
58	0,00
59	-149,40
60	49,8

i	k_i
101	-74,70
102	-166,00
103	124,50
104	157,7
105	157,7
106	99,6
107	33,20
108	157,7
109	157,7
110	66,4

i	k_i
151	107,9
152	116,2
153	157,7
154	41,5
155	0,00
156	-83,00
157	-116,20
158	-215,8
159	298,8
160	49,80

Дискретные числовые значения ускорения $W(t)$ представим формулой:

$$W(t_i) = 10^{-3} \cdot g \cdot k_i ,$$

где дискретные значения времени $t_i = i \cdot \Delta$;
 Δ - шаг разбиения временной оси; $i = 1.2.3....n$
 g - ускорение свободного падения.

Значение k_i определяются из табл.1 и 2.

Далее, чтобы было удобно вычислять, формулу (20) представим в следующем виде:

$$K_z(\tau_i) = K_z^*(\tau_i) \cdot 10^{-6} \cdot g^2 ;$$

$$K_z^*(\tau_i) = \frac{(e \cdot \varepsilon)^{-2}}{n - i + 1} \cdot \sum_{j=1}^{n-i} \bar{z}(j \cdot \Delta) \cdot \bar{z}(j \cdot \Delta + i \cdot \Delta) \quad (23)$$

Здесь:

$$\bar{z}(j \cdot \Delta) = (j \cdot \Delta)^{-1} \cdot e^{\varepsilon \cdot j \cdot \Delta} \cdot k_j ;$$

$$\bar{z}(j \cdot \Delta + i \cdot \Delta) = (j \cdot \Delta + i \cdot \Delta)^{-1} \cdot e^{\varepsilon \cdot (j \cdot \Delta + i \cdot \Delta)} \cdot k_{j+i}$$

$i = 1.2.3....n$; $j = 1.2.3....(n - 1)$; $\tau_i = i \cdot \Delta$;

Δ - шаг разбиения временной оси;
 $e = 2.7182$ – основание натуральных логарифмов;

k_i - определяются по приведенным выше табл.1 и 2 в зависимости от индекса i .

Вычисленные по формуле (23) корреляционные функции представлены в табл.3 и 4 (соответствующие фрагменты) и на рис.4 и 5.

На графиках рис. 4 и 5 приведена функция $K_z^*(\tau_i)$.

Для получения значений корреляционных функций необходимо пользоваться формулой:

$$K_z(\tau_i) = K_z^*(\tau_i) \cdot 10^{-6} \cdot g^2 \quad (24)$$

Обсуждение результатов. Проведем анализ графиков, построенных корреляционных функций по реальным акселерограммам.

По городу Taft (USA). Определение дисперсии

При $i = 0$ формула (23) дает дисперсию. На графике (рис. 4) и в табл. (3) значения корреляционной функции начинаются с $i = 1$. Для того чтобы получить значение функции при $i = 0$, продолжим график до пересечения с вертикальной осью. Такое пересечение происходит при $i = 0$ и ординате ≈ 6500 .

Это значит, что $K(\tau_0) = K_0 = 6500 \cdot 10^{-6} \cdot g^2$.

Среднеквадратическое отклонение (стандарт)

$$\sigma = \sqrt{K_0} = \sqrt{65} \cdot 10^{-2} \cdot g = 8.07 \cdot 10^{-2} \cdot g = 0.0807 \cdot g .$$

Определение коэффициента ρ

График корреляционной функции имеет первый (от начала координат) положительный максимум при $i = 11.5$.

Этому значению соответствует

$$\tau_i = i \cdot \Delta = 11.5 \cdot 1.557 \cdot 10^{-2} c = 17,9 \cdot 10^{-2} c .$$

Таблица 3. По городу Тафт
Table 3. By city Taft

i	$K_z^*(\tau_i)$	i	$K_z^*(\tau_i)$	i	$K_z^*(\tau_i)$
1	5206.54	35	275.23	69	-619.39
2	1026.45	36	495.58	70	-296.11
3	-1036.87	37	268.28	71	333.23
4	-1847.71	38	-128.03	72	585.02
5	-978.65	39	-75.21	73	400.35
6	-136.93	40	2.62	74	203.61
7	-168.34	41	-137.31	75	66.91
8	-172.3	42	-214.98	76	19.96
9	-375.9	43	-103.84	77	-129.36
10	-260.7	44	-28.52	78	-295.83
11	419.88	45	-48.06	79	-215.45
12	665.96	46	205.1	80	-213.66
13	567.11	47	357.66	81	-41.76
14	-209.48	48	422.24	82	-75.07
15	-470.95	49	284	83	177.82
16	-616.47	50	55.33	84	424.9
17	-547.48	51	155.01	85	231.62
18	14.55	52	420.02	86	154.77
19	89.12	53	536.78	87	226.23
20	-64.21	54	432.46	88	56.99
21	-23.1	55	244.61	89	-37.92
22	158.57	56	-138.35	90	-112.24
23	239.22	57	-380.68	91	255.02
24	423.14	58	-190.82	92	792.09
25	270.1	59	321.11	93	922.07
26	184	60	524.33	94	695.23
27	-6.31	61	789.64	95	-56.2
28	-189.42	62	743.19	96	-406.28
29	-415.12	63	543.19	97	-665.73
30	-228.73	64	385.68	98	-326.62
31	-164.2	65	-11.87	99	423.12
32	-347.06	66	-297.01	100	381.97
33	-280.62	67	-622.24		
34	-76.97	68	-612.87		

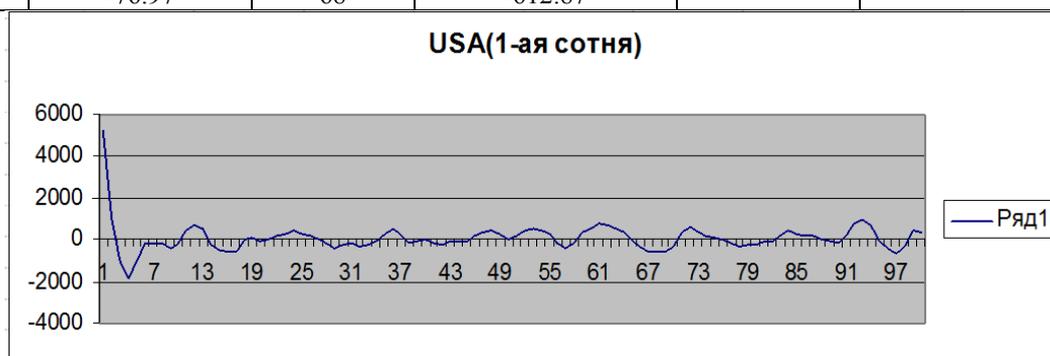


Рис. 4. По городу Тафт
Fig.4. By city Taft

Значение корреляционной функции при $\tau_i = 17,9 \cdot 10^{-2} c$ равно $K_z(\tau_i) = K_0 = 650 \cdot 10^{-6} \cdot g^2$ (табл. 3, рис.4. корреляционной функции по г. Тафт).

Далее, поделим все ординаты корреляционной функции на дисперсию K_0 , то есть пронормируем функцию. Тогда при $\tau_i = 0$ $\frac{K_z(\tau_i)}{K_0} = 1$.

$$\text{При } \tau_i = 17,9 \cdot 10^{-2} \text{ с } \frac{K_z(\tau_i)}{K_0} = \frac{650,0 \cdot 10^{-6} \cdot g^2}{6500 \cdot 10^{-6} \cdot g^2} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Таблица 4. По городу Газли
Table 4. By city Gazli

<i>i</i>	$K_z^*(\tau_i)$	<i>i</i>	$K_z^*(\tau_i)$	<i>i</i>	$K_z^*(\tau_i)$
1	35662.05	35	7758.07	69	398.84
2	-52086.9	36	11097.48	70	123.55
3	-50100.6	37	10614.74	71	2711.64
4	-10170.6	38	857.53	72	1668.66
5	29300.21	39	2072.35	73	3073.65
6	8448.21	40	-4360.06	74	1581.95
7	-27526.6	41	-4428.24	75	547.25
8	-30334.1	42	-10878	76	262.55
9	7160.22	43	14137.03	77	-3423.9
10	22307.82	44	8956.17	78	2419.14
11	8615.56	45	925.13	79	7705.34
12	-7207.9	46	-4207.15	80	11296.47
13	-772.76	47	1492.82	81	9049.06
14	5687.56	48	-3143.41	82	473.46
15	13661.8	49	8120.51	83	2447.95
16	595.01	50	5153.16	84	626.41
17	-8517.21	51	-1881.56	85	-5591.14
18	-15150.4	52	5730.82	86	-11192
19	-11290.3	53	-6196.8	87	-9683.46
20	6922.59	54	-7754.35	88	-638.85
21	7729.13	55	-8220.11	89	5622.32
22	9834.91	56	4524.67	90	4093.16
23	9231.94	57	7721.25	91	-2484.2
24	8520.96	58	3013.41	92	-1920.93
25	-7661.7	59	15226.49	93	12191.32
26	6220.25	60	7701.08	94	22103.14
27	1676.27	61	4628.53	95	7827.01
28	-3814.06	62	-253.11	96	-2679.66
29	-3213.07	63	-9071.91	97	-9117.48
30	2457.25	64	-7455.56	98	-7410.41
31	-8334.21	65	-2676.5	99	7147.82
32	-8104.49	66	2410.52	100	11429.71
33	744.03	67	9839.99		
34	15556.16	68	3980.71		

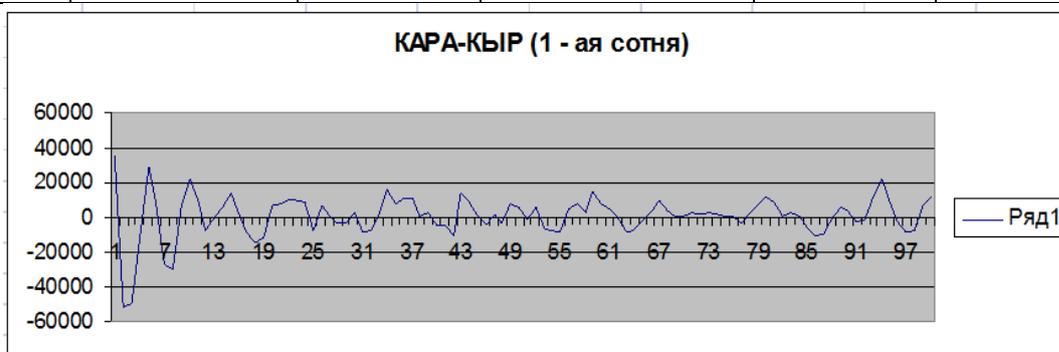


Рис.5. По городу Газли
Fig.5. By city Gazli

Убывание корреляционной кривой обеспечивается параметром ρ , который входит в аппроксимирующую функцию (3). Определим величину аргумента «х» показательной функции e^{-x} , при которой $e^{-x} = 0,1$. Отсюда $x = 2,3$.

Так как $x = \rho \cdot \tau_i$ (формула 3), то

$$\rho = \frac{x}{\tau_i} = \frac{2,3}{17,9 \cdot 10^{-2} c} = 0,128 \cdot 10^2 \frac{1}{c} = 12,8 \frac{1}{c} .$$

Таким образом, мы нашли стандарт $\sqrt{K_0}$ и коэффициент, характеризующий корреляцию ρ , которыми определяется аппроксимирующая функция (3).

Определение доминантной частоты

В формуле (3) остается неопределенной доминантная частота.

Найдем в первую очередь доминантный период. Из графика корреляционной кривой определим точки на оси, где кривая пересекает ось сверху-вниз: первое пересечение происходит в дискретной точке $i = 2$; второе пересечение оси сверху-вниз – в точке $i = 13$, третье пересечение – в точке $i = 26,5$; четвертое – в точке $i = 37,5$.

Таким образом, число всех дискретных точек на отрезке оси, где происходит три пересечения сверху-вниз, равно 35,5.

$$\text{Соответствующее значение } \tau = 35,5 \cdot \Delta = 35,5 \cdot 1,557 \cdot 10^{-2} c = 55,27 \cdot 10^{-2} c$$

То есть за время $\tau = 55,27 \cdot 10^{-2} c$ происходят три полных колебания корреляционной функции.

Теперь можно вычислить усредненный доминантный период

$$T = \frac{55,27 \cdot 10^{-2} c}{3} = 18,42 \cdot 10^{-2} c = 0,184 c .$$

Соответствующая доминантная частота

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6,28}{0,184 c} = 34,13 \frac{1}{c} .$$

Таким образом, мы располагаем всеми тремя параметрами K_0 , ρ , Ω , которыми определяется аппроксимирующая корреляционная функция (3).

По городу Газли.

Определение дисперсии

Продолжая график до пересечения с вертикальной осью, находим

$$\text{при } i = 0 \quad K_z^*(0) = 60000 .$$

$$\text{Это значит, что } K_z(0) = K_0 = 60000 \cdot 10^{-6} \cdot g^2 .$$

Среднеквадратическое отклонение (стандарт)

$$\sigma = \sqrt{K_0} = \sqrt{6} \cdot 10^{-1} \cdot g \approx 2,45 \cdot 10^{-1} \cdot g = 0,245 \cdot g .$$

Определение коэффициента ρ

График (рис. 5) корреляционной функции имеет первый (от начала координат) положительный максимум при $i = 4,5$. Этому значению соответствует

$$\tau_i = i \cdot \Delta = 4,5 \cdot 1,636 \cdot 10^{-2} = 7,35 \cdot 10^{-2} c .$$

Само значение корреляционной функции при $\tau_i = 7,35 \cdot 10^{-2} c$ равно

$$K_z(\tau) \approx 29000 \cdot 10^{-6} \cdot g^2$$

(Рис. 5. и табл.4 корреляционной функции по г. Газли).

Далее пронумеруем корреляционную функцию.

Тогда при $\tau_i = 0$ ($i = 0$) $\frac{K_z(\tau_i)}{K_0} = 1$.

При $\tau_i = 7,35 \cdot 10^{-2} c$ ($i = 7,35$) $\frac{K_z(\tau_i)}{K_0} = \frac{29000 \cdot 10^{-6} \cdot g^2}{60000 \cdot 10^{-6} \cdot g^2} = 0,483$.

Убывание корреляционной кривой обеспечивается параметром ρ , который входит в аппроксимирующую функцию (3).

Определим величину аргумента «х» показательной функции $e^{-x} = 0,483$.

Отсюда $x = 0,73$. Так как $x = \rho \cdot \tau_i$ (формула 3), то

$$\rho = \frac{x}{\tau_i} = \frac{0,73}{7,35 \cdot 10^{-2} c} = 0,099 \cdot 10^2 \frac{1}{c} = 9,9 \frac{1}{c}$$

Определение доминантной частоты

Для вычисления доминантного периода из графика (рис. 5) корреляционной функции определим точки на оси, где кривая пересекает ось сверху-вниз: первое пересечение происходит в точке $i=1$; второе пересечение оси сверху-вниз – в точке $i = 5,7$; третье пересечение – в точке $i = 11$; четвертое сечение в точке $i = 15,5$.

Таким образом, число всех дискретных точек на отрезке оси, где происходят три пересечения сверху-вниз, равно 14,5.

Соответствующее значение $\tau = 14,5 \cdot \Delta = 14,5 \cdot 1,636 \cdot 10^{-2} c = 23,72 \cdot 10^{-2} c$.

Теперь можно вычислять усредненный доминантный период

$$T = \frac{23,72 \cdot 10^{-2} c}{3} = 7,91 \cdot 10^{-2} c = 0,08 c.$$

Соответствующая доминантная частота

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6,28}{0,08 c} = 78,5 \frac{1}{c}.$$

Таким образом, мы располагаем всеми тремя параметрами K_0 , ρ , Ω , которыми определяется аппроксимирующая корреляционная функция (3).

По городу Тафт имеем:

– среднеквадратическое отклонение $\sqrt{K_0} = \sigma = 0,081 \cdot g$;

– доминантный период $T = 0,184 c$;

– доминантная частота $\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,184 c} = 34,13 \frac{1}{c}$;

– коэффициент, характеризующий корреляцию: $\rho = 12,8 \frac{1}{c}$;

– координата по времени наибольшего значения ускорения $t_0 = 3 c$;

– коэффициент, характеризующий нестационарность ускорения $\varepsilon = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{3c}$;

– длительность землетрясения $T_0 = 11,4 c$

По городу Газли имеем

– среднеквадратическое отклонение $\sqrt{K_0} = \sigma = 0,245 \cdot g$;

– доминантный период $T = 0,08 c$;

– доминантная частота $\Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,08 c} = 78,5 \frac{1}{c}$;

- коэффициент, характеризующий корреляцию $\rho = 9,9 \frac{1}{c}$;
- координата по времени наибольшего значения ускорения : $t_0 = 7 c$;
- коэффициент, характеризующий нестационарность ускорения $\varepsilon = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{7c}$;
- длительность землетрясения $T_0 = 12,5 c$.

Вывод. Проведенное исследование позволяет сформулировать следующее:

1. Располагая четырьмя параметрами $\sqrt{K_0}$, ρ , Ω , ε , ускорение земной поверхности при землетрясении можно моделировать функцией (3).
2. При известных параметрах K_0 , ρ , Ω , ε ускорение определяется функцией (13).
3. По изложенному выше алгоритму можно смоделировать ускорение поверхности Земли при землетрясении, располагая всего лишь одной, единственной, реальной акселерограммой, соответствующей данному району строительства.
4. Параметры корреляционных функций могут найти применение при исследовании сейсмостойкости зданий, как с пассивной, так и с активной сейсмозащитой [15-18].

Библиографический список:

1. Айзенберг Я.М., Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. Стройиздат, 1976. М. С 440.
2. Бабаков И.М. «Теория колебаний», «Наука», 1965. М. С 680.
3. Бейтмен Г. и Эрдейн А. Таблицы интегральных преобразований. Том. I. «Преобразование Фурье, Лапласа, Меллина». Наука, 1969. М. С 344.
4. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. Издательство литературы по строительству. 1965. М. С 310.
5. Болотин В.В. Применение теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Издательство литературы по строительству, 1971. М. С 280.
6. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А., Поляков С.В. и др. Модели сейсмостойких сооружений. Наука, 1980. М. С 362.
7. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. Гостехиздат, 1961. М. С 526.
8. Патент на изобретение №2200810 «Адаптивная сейсмозащита зданий и сооружений». Приоритет 06.04, 2001. ФИПС г. Москва.
9. Патент на изобретение 2256749 «Кинематические опоры сейсмостойких зданий и сооружений». Приоритет 18.08.2003. ФИПС г. Москва.
10. Пугачев В.С. Теория случайных функций. Физматгиз, 1960. М. С 798.
11. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В., Современные методы сейсмозащиты зданий. Стройиздат, 1988. М. С 415.
12. Сейсмоизоляция и адаптивные системы. «Наука», 1983, М. С 384, под редакцией Айзенберга Я.М.
13. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. «Наука», 1968. М. С 560.
14. Юсупов А.К. «Резонанс в стохастических системах». Журнал «Известия Северо-Кавказского научного центра» (серия естественных наук), г. Ростов-на-Дону, 1979, №1. С 43-48.
15. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A» 26.
16. Conde, F.F. Seismic structures / F.F. Conde // International Simposium FIP, Tbilisi, 1972, p.655-663. 27.
17. Hwang, J.S. (1996). An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings /J.S. Hwang, L.M.Chiou// Journal of Engineering Structures. 1996, 18(7), 528-536.
18. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A».

References:

1. Aizenberg Ya.M. Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazyami dlya seismicheskikh raionov. M.: Stroiizdat; 1976. S. 440. [Aizenberg Ya.M. Constructions with switched off connections for seismic regions. Moscow: Stroyizdat; 1976. P. 440. (In Russ.)]
2. Babakov I.M. Teoriya kolebanii. M.: Nauka; 1965. S. 680. [Babakov I.M. Theory of oscillations. M.: Nauka; 1965. P. 680. (In Russ.)]

3. Beitmen G., Erdein A. Tablitsy integral'nykh preobrazovaniy. Tom. I. "Preobrazovanie Fur'e, Laplasy, Mellina". M.: Nauka; 1969. S. 344. [Beitmen G., Erdein A. Tables of integral transformations. Volume I. "Transformation of Fourier, Laplace, Mellin". M.: Nauka; 1969. P. 344. (In Russ.)]
4. Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitel'noi mekhanike. M.: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu; 1965. S. 310. [Bolotin V.V. Statistical methods in construction mechanics. M.: Publishing house of literature on construction; 1965. P. 310. (In Russ.)]
5. Bolotin V.V. Primenenie teorii veroyatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii. M.: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu; 1971. S. 280. [Bolotin V.V. The application of probability theory and reliability theory in the calculation of structures. M.: Publishing house of literature on construction; 1971. P. 280. (In Russ.)]
6. Gol'denblat I.I., Nikolaenko N.A., Polyakov S.V. i dr. Modeli seismostoikikh sooruzhenii. M.: Nauka; 1980. S. 362. [Gol'denblat I.I., Nikolaenko N.A., Polyakov S.V. et al. Models of seismic resistant structures. M.: Nauka; 1980. P. 362. (In Russ.)]
7. Gnedenko B.V. Kurs teorii veroyatnosti. M.: Gostekhizdat; 1961. S. 526. [Gnedenko B.V. Course of probability theory. M.: Gostekhizdat; 1961. P. 526. (In Russ.)]
8. Patent na izobretenie №2200810 «Adaptivnaya seimozashchita zdaniy i sooruzhenii». Prioritet 06.04. 2001. FIPS g. Moskva. [Patent for invention №2200810 «Adaptive seismic protection of buildings and structures». Priority 06.04. 2001. FIPS Moscow. (In Russ.)]
9. Patent na izobretenie 2256749 «Kinematicheskie opory seimostoikikh zdaniy i sooruzhenii». Prioritet 18. 08. 2003. FIPS g. Moskva. [Patent for invention 2256749 «Kinematic bearings of seismic resistant buildings and structures». Priority 18. 08. 2003. FIPS Moscow. (In Russ.)]
10. Pugachev V.S. Teoriya sluchainykh funktsii. M.: Fizmatgiz; 1960. S. 798. [Pugachev V.S. Theory of random functions. Moscow: Fizmatgiz; 1960. P. 798. (In Russ.)]
11. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Sovremennye metody seimozashchity zdaniy. M.: Stroizdat; 1988. S. 415. [Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Modern methods of seismic protection of buildings. Moscow: Stroizdat; 1988. P. 415. (In Russ.)]
12. Seismoizolyatsiya i adaptivnyesistemy (podredaktsiei Ya.M.Aizenberga). M.: Nauka; 1983. S. 384. [Seismic isolation and adaptive systems (edited by Ya.M.Aizenberg). M.: Nauka; 1983. P. 384. (In Russ.)]
13. Sveshnikov A.A. Prikladnye metody teorii sluchainykh funktsii. M.: Nauka; 1968. S. 560. [Sveshnikov A.A. Applied methods of the theory of random functions. M.: Nauka; 1968. P. 560. (In Russ.)]
14. Yusupov A.K. Rezonans v stokhasticheskikh sistemakh. Izvestiya Severo-Kavkazskogo nauchnogo tsentra (seriya estestvennykh nauk). 1979;1:43-48. [Yusupov A.K. Resonance in stochastic systems. Izvestiya of the North Caucasian Scientific Center of the Higher School (Series of natural sciences) 1979;1:43-48. (In Russ.)]
15. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A» 26.
16. Conde F.F. Seismic structures. International Symposium FIP, Tbilisi. 1972. P. 655-663.
17. Hwang J.S., Chiou L.M. An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings. Journal of Engineering Structures. 1996;18(7):528-536.
18. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A».

Сведения об авторах:

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Устарханов Осман Магомедович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Юсупов Абусупьян Курашевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Information about the authors:

Khayrulla M. Muselemov – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Osman M. Ustarhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Abusupyan K. Yusupov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.08.2017.

Принята в печать 16.10.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.08.2017.

Accepted for publication 16.10.2017.

Для цитирования: Оцоков К.А. Влияние водоцементного отношения на реологические свойства пенобетона на местном сырье. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):184-193. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-184-193

Forcitation: Otsokov K.A. Effect of water-cement ratio on rheological properties of foam concrete made of local raw materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 184-193. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-184-193

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 666.974.2

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-184-193

ВЛИЯНИЕ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА НА МЕСТНОМ СЫРЬЕ

Оцоков К.А.

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,
e-mail: Kamil24@mail.ru

Резюме: Цель. Целью настоящего исследования является изучение зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения при использовании различных местных заполнителей и отходов производства в Республике Дагестан; а также сравнение показателей текучести смесей при одинаковых значениях водоцементного отношения. При проведении экспериментальных работ использовались: цемент марки М500, кремнеземистый заполнитель - кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе Республики Дагестан с низким модулем крупности, различные синтетические пенообразователи, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок (г. Кизилюрт, Республика Дагестан), отсев камнедробления (г. Кизилюрт, Республика Дагестан). **Метод.** При производстве пенобетона использовался способ, при котором в пеногенераторе готовилась пена, затем готовился раствор из цемента, кремнеземистого компонента (заполнителя) и воды. Затем пена смешивалась с раствором в пенобетоносмесителе до набора соответствующей кратности. Кратность в данном случае определялась, как отношение объема раствора пенобетонной смеси после перемешивания к объему раствора до перемешивания. При проведении исследования определялось водоцементное отношение смеси для всех трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлит). Показатель текучести пенобетонной смеси определялся с помощью вискозиметра Суттарда. **Результат.** Результаты исследований показали, что при увеличении водоцементного отношения для всех трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлит) возрастает показатель текучести пенобетонной смеси. **Вывод.** При одинаковых значениях показателя текучести смесь с перлитовым заполнителем имеет наименьшую текучесть, которая в свою очередь оказывает влияние на дальнейшее структурообразование пенобетона и позволяет подбирать оптимальный состав с заданными свойствами.

Ключевые слова: водоцементное отношение, показатель текучести, пенобетонная смесь, водотвердое отношение, кратность, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

EFFECT OF WATER-CEMENT RATIO ON RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF FOAM CONCRETE MADE OF LOCAL RAW MATERIALS

Kamil A. Otsokov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: Kamil24@mail.ru

Abstract. Objectives The purpose of this work is to study the dependency of the fluidity of foam concrete mixtures on the water-cement ratio when using various local aggregates and wastes from the Republic of Dagestan and comparing the fluidity characteristics of mixtures for the same water-cement ratios. During the experimental work, the following materials were used: M500 cement, siliceous filler (quartz sand from the deposit in the Kumtorkalinsky district of the Republic of Dagestan with a low modulus of grain size, various synthetic foaming agents), perlite sand, ground expanded clay sand (Kizilyurt, Republic of Dagestan), stone crushing screenings (Kizilyurt, Republic of Dagestan). **Methods** During the production of foam concrete, a method was used in which foam was prepared in the foam generator, then a solution was prepared from the cement, siliceous component (filler), and water. Then the foam was mixed with the solution in the foam concrete mixer up to the set of the appropriate multiplicity. (The multiplicity in this case was defined as ratio of the volume of the solution of the foam concrete mixture after mixing to the volume of the solution before mixing. During the studies, the water-cement mixture ratio for all three kinds of filler (expanded clay sand, quartz sand from the deposit of the Kumtorkalinsky region, and perlite) was determined. The fluidity index of the foam concrete mixture was determined using a Suttard's viscometer. **Results** The results of the research indicated that with an increase in the water-cement ratio for all three types of filler (expanded clay sand, quartz sand from the Kumtorkalinsky region and perlite), the foam concrete mixture fluidity index will increase. **Conclusion** With the same fluidity index values, the mixture with perlite filler has the lowest fluidity, which in turn affects the further structure formation of the foam concrete, allowing the optimal composition with the specified properties to be selected.

Keywords: water-cement ratio, fluidity index, foam concrete mixture, water-solid ratio, multiplicity, perlite sand, ground expanded clay sand

Введение. В современных сложных экономических условиях, повышение требования к энергосбережению зданий приобретает особую актуальность.

В связи с ростом цен на энергоносители и теплоносители возникает необходимость использования энергосберегающих технологий в производстве строительных материалов.

С учетом современных нормативных требований к ограждающим конструкциям зданий, использование традиционных распространенных стеновых материалов в некоторых случаях становится менее целесообразным для создания эффективной теплоизоляции.

В этой связи особый интерес представляют пенобетоны, получаемые из различных видов вяжущих и мелкозернистых заполнителей, в том числе из отходов производства различных предприятий. Одним из таких материалов является неавтоклавный пенобетон [1].

Блоки и изделия из неавтоклавного пенобетона обладают высокими показателями теплоизоляции. Использование данного материала при строительстве объектов приводит к снижению себестоимости, а значит к повышению уровня доступности жилья [2-5].

Сегодня нашли широкое применение в качестве теплоизоляционных материалов минеральная вата, полимерные пенопласты [6]. В тоже время полимерные пенопласты имеют недостаточную долговечность [7].

Керамзитовый заполнитель имеет насыпную плотностью более 500 кг/м^3 , тогда как для получения эффективных стен, это значение не должно превышать $250\text{-}300 \text{ кг/м}^3$ [7].

Неавтоклавный пенобетон обладает хорошими теплофизическими свойствами, имеет простую технологию производства и сравнительно низкие производственные затраты.

К недостаткам можно отнести высокие усадочные деформации, что снижает прочность и морозостойкость, повышает теплопроводность и водопоглощение [8].

При этом остаются актуальными вопросы повышения эффективности и качества пенобетона. Одним из путей повышения эффективности и качества, снижения затрат при производстве пенобетона является применение местного сырья и отходов производства предприятий, а также изучение реологических характеристик [5].

Практика показала, что пенобетоны по некоторым свойствам превосходят распространенные в республике материалы аналогичного назначения [9].

Постановка задачи. Увеличению спроса на эффективные теплоизоляционные строительные материалы также способствует повышение требуемого сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций.

В последние годы в Республике Дагестан наблюдается рост объемов малоэтажного строительства, что потребовало расширение производства мелкоштучных строительных материалов. В этой связи практический интерес представляет организация производства пенобетона, что объясняется его высокими технико-экономическими характеристиками и наличием не дефицитной сырьевой базы.

Преимуществами производства пенобетона являются: быстрая скорость монтажа, большие размеры стеновых блоков, что по сравнению с аналогичными стеновыми материалами позволяет увеличить скорость кладки без потери качества, легкость обработки, экологичность, высокие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства.

Неавтоклавный пенобетон отличается простотой и мобильностью производства; высокими эксплуатационными свойствами, что соответствует современным требованиям его использования в качестве стенового материала и позволяет обеспечить требуемое термическое сопротивление теплопередачи.

В этой связи актуально решение задач получения эффективных пенобетонов с заданными эксплуатационными характеристиками, а также и поиск рациональных способов повышения эффективности пенобетона [18].

Реологические свойства пенобетонов зависят от многих факторов в том числе, от однородности структуры и состава, способа образования пор, вида вяжущих веществ и других компонентов. Пористость пенобетонов характеризуется содержанием пор, их диаметрами равномерностью распределения [7].

Качество пенобетона повышается при использовании эффективных пенообразователей, стабилизаторов пены, структурообразующих компонентов [7].

Для создания пенобетона с оптимальными тепловлажностными характеристиками необходимо учитывать особенности формирования поровой структуры [8].

Особую актуальность представляет изучение особенностей взаимодействия пенообразователей с другими компонентами, используемыми при производстве неавтоклавного пенобетона, а также определение оптимальных концентраций пенообразователя при производстве [10].

В технологии получения эффективных пенобетонов важную роль играет качество пенообразователя. Пенообразователь отвечает за образование ячеистой структуры бетона, а значит, во многом влияет на его свойства [6,11].

На свойства пенобетона влияет также прочность межпоровой перегородки. При повышении ее физико-механических свойств, соответственно, повышаются и прочностные характеристики пенобетона [12].

Также значимым является решение проблемы повышения качества пенобетонов, изучение влияния свойств пены, режимов работы оборудования на свойства пенобетона, проблемы использования легких наполнителей [2]. Приобретают значимость сегодня исследования прочностных показателей [14], моделей прогнозирования прочности [14], совершенствования производства, изучение стойкости пенобетонов против действия химических и физических агрессивных факторов [15], при применении различных вяжущих при производстве [13, 14,

17], оценка влияния дисперсного армирования [16], учет структуры и строения межпоровых перегородок [19].

Реология пенобетонных смесей связана с их структурой, изменяющейся в процессе твердения. В этой связи оценка реологических свойств смесей необходима в технологическом процессе производства конструкций, особенно в процессе структурообразования.

Водоцементное, водотвердое отношение, количество и качество заполнителей оказывает влияние на реологические характеристики пенобетонных смесей, что необходимо учитывать при производстве.

Местные отходы производства могут использоваться при изготовлении плит из теплоизоляционного пенобетона, которые являются перспективным материалом, сопоставимым с функциональными свойствами плит из минеральной ваты, а по некоторым строительно-эксплуатационным свойствам их превышают и имеют меньшую стоимость [21, 23].

При организации технологического процесса изготовления пенобетонных изделий и получения высоких физико-механических показателей необходимо повысить усредненные данные, предусмотрев подготовку сырьевых компонентов.

Подготовка сырьевых компонентов предполагает совместный помол вяжущего и кремнеземистого компонента [24].

При этом при производстве пенобетона могут использоваться различные виды вяжущих, различные виды местного заполнителя. В технологии пенобетона важное значение имеет изучение реологических характеристик, влияние водотвердого отношения на свойства [20].

При проектировании состава пенобетона одним из важных этапов является определение водотвердого, водоцементного отношения, которое влияет на свойства, долговечность и экономичность [22].

В частности, научно-практический интерес представляют исследования по изучению зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения (В/Ц) при использовании различных местных заполнителей и отходов производства и сравнение показателей текучести смесей [2].

При проведении экспериментальных работ использовались цемент марки М500, кремнеземистый заполнитель - кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе с низким модулем крупности, различные синтетические пенообразователи, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок (г. Кизилюрт), отсев камнедробления (г. Кизилюрт). Гранулометрический составы представлен в таблицах 1-3.

Таблица 1. Гранулометрический состав перлита
Table 1. Granulometric composition of perlite

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки в %	Полные остатки в %
2.5	241	24.1	24.1
1.25	289	28.9	53.0
0.63	319	31.9	84.9
0.315	49	4.9	89.8
0.14	83	8.3	98.1
Прошло через сито N 0.14	19	1.9	100

Модуль крупности $M_{кр}=3.49$
Насыпная плотность 158 кг/м³

Таблица 2. Гранулометрический состав песка
Table 2. Granulometric composition of sand

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки в %	Полные остатки в %
2.5	5	0.5	0.5
1.25	2	0.2	0.7
0.63	11	1.1	1.8
0.315	282	28.2	30
0.14	566	56.6	86.6
Прошло через сито N 0.14	134	13.4	100

Насыпная плотность – 1116 кг/м³
Содержание глинистых частиц – 2.5 %
Модуль крупности $M_{кр}=1.19$
Влажность 2.9 %

Таблица 3. Гранулометрический состав керамзитового песка
Table 3. Granulometric composition of ceramsite sand

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки в %	Полные остатки в %
1.25	117	11.7	11.7
0.63	493	49.3	61
0.315	277	27.7	88.7
0.14	99	9.9	98.6
Прошло через сито N 0.14	14	1.4	100

Насыпная плотность – 1108 кг/м³
Модуль крупности $M_{кр}=2,6$

Методы исследования. Для решения проблемы повышения качества строительной продукции необходимо достижения высоких физико-механических показателей и долговечности изделий, необходим оптимальный подбор состава сырьевых компонентов [24-25].

При проведении экспериментальных работ использовались: цемент марки М500, кремнеземистый заполнитель – кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе с низким модулем крупности, различные синтетические пенообразователи, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок (г. Кизилюрт), отсев камнедробления (г. Кизилюрт).

Производство пенобетона осуществлялось следующим образом.

В пеногенераторе готовилась пена, затем готовился раствор из цемента, кремнеземистого компонента (заполнителя) и воды. Пена смешивалась с раствором в пенобетоносмесителе до набора соответствующей кратности. Кратность определялась, как отношение объема раствора пенобетонной смеси после перемешивания к объему раствора до перемешивания. При производстве пенобетона использовался и метод сухой минерализации [3-4].

На заводе крупнопанельного домостроения МКД-3 (г. Кизилюрт) с участием автора была внедрена модернизированная установка по получению пенобетона.

С бункеров запаса сухие компоненты (цемент и песок) поступали в дозаторы, оттуда в

специальный шнек, в котором перемешаваясь поступали в пенобетоносмеситель, где равномерно засыпались в готовую пену.

Пенобетоносмеситель был снабжен двумя двигателями. Один двигатель высокооборотный со специально изготовленной рабочей насадкой для получения пены, другой, с понижающим редуктором для перемешивания пенобетонной смеси.

Пенобетоносмеситель был расположен на платформе, перемещаемой по рельсовым путям, вдоль которых располагаются стальные формы. С помощью выпускного крана смесь из пенобетоносмесителя равномерно и поочередно заполняла все установленные формы. Пропаривание пенобетонного массива осуществлялось в специально модернизированной форме до набора пластической прочности.

При предварительном пропаривании стальной формы массив набирает пластическую прочность, необходимую для резки. Поперечная резка пенобетонного массива производилась с помощью резательного устройства снизу вверх, с колебательными движениями струн.

Были модернизированы, применительно для заливки пенобетона, стальные формы. Были спроектированы и изготовлены две модификации пеногенераторов.

Для облегчения приготовления пенобетона в лаборатории автором была разработана и изготовлена лабораторная установка по приготовлению пенобетона, которая обеспечивает быстрое и качественное приготовления пенобетонной смеси. После резки массива были получены блоки конструкционного пенобетона (20x20x40), плитки (20x20x10).

При проведении экспериментальных исследований определялось водоцементное отношение смеси при использовании всех трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлит). Показатель текучести пенобетонной смеси определялся с помощью вискозиметра Суттарда.

Обсуждение результатов. В технологии производства пенобетона важное значение имеет изучение реологических характеристик для наиболее оптимального подбора состава при изготовлении изделий. Были проведены исследования по изучению зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения при использовании различных местных заполнителей и отходов производства, а также сравнение показателей текучести смесей при одинаковых значениях водоцементного отношения [2].

Результаты исследования показали, что при увеличении водоцементного отношения при использовании трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлит) возрастает показатель текучести пенобетонной смеси, а при одинаковых его значениях смесь с перлитовым заполнителем имеет наименьшую текучесть. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 1- 3.

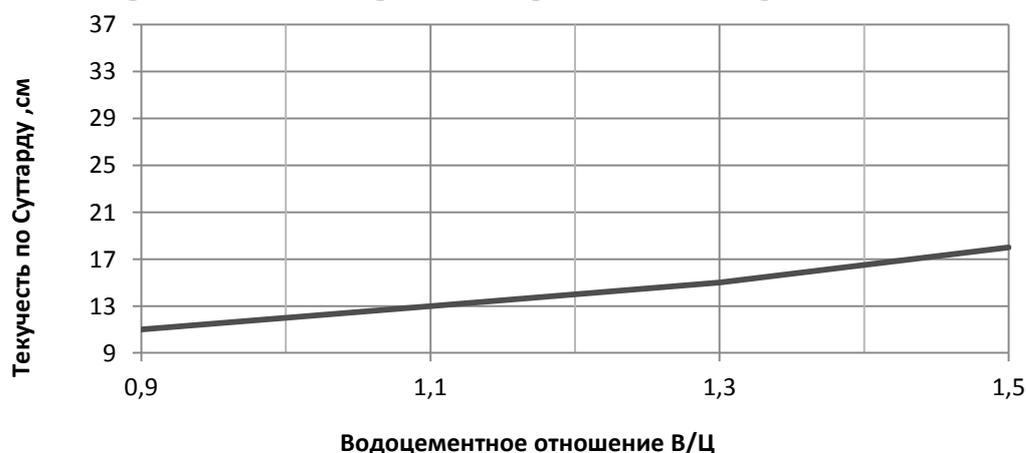


Рис.1. Зависимость текучести пенобетонной смеси на основе перлита от водоцементного отношения

Fig. 1. The dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on pearlite from water-to-cement ratio

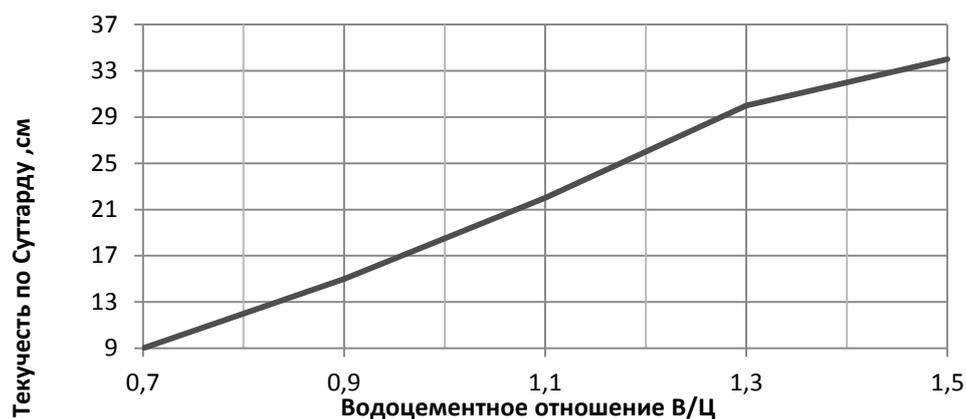


Рис.2. Зависимость текучести пенобетонной смеси на основе молотого керамзитового песка от водоцементного отношения
Fig. 2. The dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on ground clay and sand from water-to-cement ratio

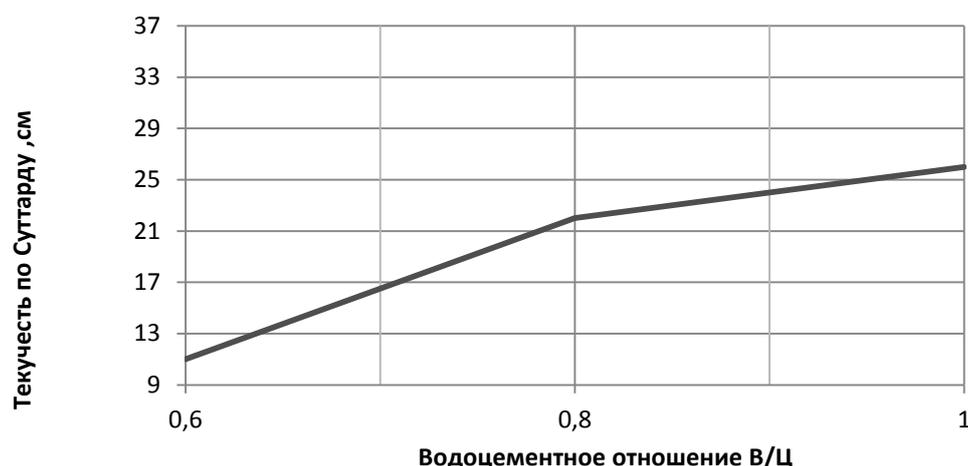


Рис. 3. Зависимость текучести пенобетонной смеси на основе кварцевого песка (месторождения в Кумторкалинском районе) от водоцементного отношения
Fig. 3. Dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on quartz sand (field Kumtorka district) of the water-to-cement ratio

При водоцементном отношении $V/C=0.9$ текучесть смеси на основе молотого керамзитового песка (диаметр расплыва) 15 см, на основе кварцевого песка (месторождения в Кумторкалинском районе) - 24 см, на основе перлита - 11 см, что оказывает существенное влияние на дальнейшее структурообразование, и позволяет подбирать оптимальный состав пенобетона с заданными свойствами.

Для повышения эффективности технологии получения пенобетона неавтоклавно твердения необходимо изучение зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения при использовании различных местных заполнителей и отходов производства; изучение влияния количества пены в цементной смеси на ее текучесть или влияния соотношения объема пены к объему цементного теста на текучесть пеномассы.

Полученные на основе анализа и экспериментальных данных результаты позволяют подобрать оптимальный состав пенобетона.

Регулирование реологических характеристик позволяет улучшить характеристики пенобетона, что может в дальнейшем использоваться при производстве изделий.

Вывод. Проведенные исследования показали, что формированием ячеистой структуры пенобетона можно эффективно управлять с помощью направленного регулирования реологических свойств за счет изменения характеристик расхода пены и заполнителей.

В результате разработаны и определены технологические параметры получения эффективных по теплофизическим параметрам экологически чистых неавтоклавных пенобетонов.

Разработана технология производства пенобетона с использованием песков, искусственных и природных пористых заполнителей, производимых в Республики Дагестан.

На заводе крупнопанельного домостроения (МКД-3) г. Кизилюрт была внедрена предложенная технология производства пенобетона, изготовлены стеновые блоки и теплоизоляционные плиты.

Библиографический список:

1. Барлыбаев У.Д. Институциональные аспекты устойчивого развития сельских территорий в условиях становления. Москва. 2015. 333 с.
2. Оцоков К.А., Джалалов Ш.Г. Способы повышения эффективности пенобетона// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 3 .Т.42 .С.167-174.
3. Оцоков К.А. Повышение эффективности пенобетона путем использования местных материалов: Дис ... канд.техн.наук.-М.,2002. С.141.
4. Меркин А.П., Кобидзе Т.Е. Особенности структуры и особенности получения эффективных пенобетонных материалов// Строительные материалы. 1988. №3. С.12-14.
5. Селезнев И.Г. Пенобетон для монолитного домостроения: Дис...канд.техн.наук.- М.: 1995.С.5.
6. Тотурбиев А. Б. Теплоизоляционный пенобетон неавтоклавного твердения на бесцементном композиционном вяжущем: Автореф. дис. канд. техн. наук. Ставрополь, 2006. С.3
7. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: 1998. С.394
8. Серова Р.Ф., Касумов А.Ш., Величко Е.Г. Проблемы производства и применения ячеистого бетона //Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. с. 267-271.
9. Павленко Н.В., Пастушков П.П., Хархардин А.Н., Войтович Е.В. Исследование взаимосвязи структурных и тепловлажностных характеристик на примере пенобетона на основе наноструктурированного вяжущего//Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 6 (52). С. 80-86.
10. Лойко К.О., Белова С.А., Дерябин П.П. Влияние текучести смеси на основные свойства пенобетона сухой минерализации// Архитектура, строительство, транспорт. Материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 518-522.
11. Горбач П.С., Щербин С.А. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона//Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 5 (46). С. 126-132.
12. Кучерявенко Д.А. Свойства пенобетона неавтоклавного твердения с использованием белкового пенообразователя// Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки. Материалы международной научно-практической конференции: [электронный ресурс]. 2014. С. 50-52.
13. Савенков А.И., Тюлькин С.В., Шиндель Е.В. Взаимосвязь вяжущего и свойств цементной матрицы и пенобетона//Аспирант. 2016. № 5 (21). С. 146-151.
14. Yue L., Bing C. New type of super-lightweight magnesium phosphate cement foamed concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015; 27(1): 401-412.
15. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. Mydin Md.A.O. Europeanresearcher. series a. 2014. № 1-2 (67). p. 124-129.
16. Influence of size factor on creep deformation of fine-grain foam concrete for repair. Bataev D.K.S., MazhievKh.N., Gaziev M.A., Salgiriev R.R., MazhievK.Kh., MazhievaA.Kh. Lifesciencejournal. 2014. т. 11. № 12. PP. 995-997.
17. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete Vesova L. M. Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. PP. 1587-1590.
18. Формирование структуры магнизиальных ячеистых бетонов Мирюк О.А. International scientific and practical conference worldscience. 2016. Vol. 1. № 3 (7). PP. 62-66.
19. Improving technology of non-autoclave foam concrete. Krasinikova N.M., Khozin V.G., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Eruslanova E.V. International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. № 22. PP. 16735-16741.
20. Соков В.Н., Жабин Д.В., Бегляров А.Э., Землянушнов Д.Ю. Теоретические основы получения ячеистых бетонов из пеномасс, активируемых гидротеплосиловым полем//Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 18-19.

21. Лойко К.О., Белова С.А., Дерябин П.П. Влияние текучести смеси на основные свойства пенобетона сухой минерализации. В сборнике: Архитектура, строительство, транспорт материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 518-522.
22. Mydin Md.A.O. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. European researcher. Series A. 2014; 1-2(67):124-129.
23. Савенков А.И. Определение оптимального водотвердого отношения для пенобетона. Сборник научных трудов ангарского государственного технического университета. 2005. т. 1. № 1. с. 372-374.
24. Коломацкий А.С., Коломацкий С.А. Теплоизоляционные изделия из пенобетона //Строительные материалы. 2003. №1. С.38-39.
25. Липилин А.Б., Коренюгина Н.В. Дезинтегратор мокрого помола в производстве неавтоклавного пенобетона //Строительные материалы. 2014. №6. С.10-11.

References:

1. Barlybayev U.D. Institutsional'nyye aspekty ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy v uslovi-yakh stanovleniya. Moskva, 2015; 333. [Barlybaev U.D. Institutional aspects of sustainable development of rural areas in conditions of formation. 2015; 333.] (In Russ.)
2. Otsokov K.A., Dzhalalov Sh.G. Sposoby povysheniya effektivnosti penobetona. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;3(42):167-174. [Otsokov K.A., Dzhalalov Sh.G. Ways to improve the effectiveness of foam concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;3(42):167-174. (In Russ.)]
3. Otsokov K.A. Povyshenie effektivnosti penobetona putem ispol'zovaniya mestnykh materialov. Dis...kand.tekhn.nauk. M., 2002. С. 141. [Otsokov K.A. Increase the effectiveness of foam concrete by using local materials. The Candidate of technical sciences dissertation.M., 2002.P. 141. (In Russ.)]
4. Merkin A.P., Kobidze T.E. Osobennosti struktury i osobennosti polucheniya effektivnykh penobetonnykh materialov. Stroitel'nyematerialy. 1988; 3:12-14. [Merkin A.P., Kobidze T.E. Features of the structure and of obtaining effective foam concrete materials. Construction Materials. 1988;3:12-14. (In Russ.)]
5. Seleznev I.G. Penobeton dlya monolitnogo domostroeniya. Dis...kand.tekhn.nauk. M., 1995.C.5. [Seleznev I.G. Foam concrete for monolithic housing construction.The Candidate of technical sciences dissertation.M., 1995.P.5. (In Russ.)]
6. Toturbiev A.B. Teploizolyatsionnyi penobetonne avtoklavnogo tverdeniya na bestsementnom kompozitsionnomv yazhushchem: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Stavropol', 2006. S.3. [Toturbiev A.B. Heat-insulating foam concrete of non-autoclaved hardening on a cement-free composite binder: Published summary of the candidate of technical sciences dissertation. Stavropol', 2006.P.3. (In Russ.)]
7. Batrakov V.G. Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika. M.,1998. S.394. [Batrakov V.G. Modified concrete.Theory and practice. M.,1998. P.394. (In Russ.)]
8. Serova R.F., Kasumov A.Sh., Velichko E.G. Problemy proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona. Fundamental'nye issledovaniya. 2016;7-2:267-271. [Serova R.F., Kasumov A.Sh., Velichko E.G. Problems of production and use of cellular concrete. Fundamental research. 2016;7-2:267-271. (In Russ.)]
9. Pavlenko N.V., Pastushkov P.P., Kharkhardin A.N., Voitovich E.V. Issledovanie vzaimosvyazi strukturnykh i teplovlazhnostnykh kharakteristik na primere penobetona na osnove nanostrukturirovannogo vyazhushchego. Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii. 2016;6(52):80-86. [Pavlenko N.V., Pastushkov P.P., Kharkhardin A.N., Voitovich E.V. Investigation of the interrelation between structural and heat and moisture characteristics on the example of foam concrete on the basis of a nanostructured binder. VestnikSibADI. 2016;6(52):80-86. (In Russ.)]
10. Loiko K.O., Belova S.A., Deryabin P.P. Vliyanie tekuchesti smesi na osnovnye svoystv penobetona sukhoi mineralizatsii. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Arkhitektura, stroitel'stvo, transport». 2015;518-522. [Loiko K.O., Belova S.A., Deryabin P.P. Influence of fluidity of the mixture on the basic properties of foam dry mineralisation. Materials of the international scientific-practical conference «Architecture, construction, transport». 2015;518-522. (In Russ.)]
11. Gorbach P.S., Shcherbin S.A Vliyanie penoobrazovatelya na svoystva peny i penobetona. VestnikTomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2014;5(46):126-132. [Gorbach P.S., Shcherbin S.A Influence of a foaming agent on the properties of foam and foam concrete.Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2014;5(46):126-132. (In Russ.)]
12. Kucheryavenko D.A. Svoystva penobetona neavtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniem belkovogo penoobrazovatelya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoenie strategicheskii vazhnykh territorii Sibiri i Arktiki: vklad nauki» [elektronnyi resurs]. 2014;50-52. [Kucheryavenko D.A. Properties of foam concrete of non-autoclaved hardening with the use of a protein foaming agent. Materials of the international scientific and practical conference «Development of road and transport and construction complexes and development of strategically important territories of Siberia and the Arctic: the contribution of science» [electronic resource]. 2014;50-52. (In Russ.)]
13. Savenkov A.I., Tyul'kin S.V., Shindel' E.V. Vzaimosvyaz' svyazhushchego i svoystv tsementnoi matrity i penobetona. Aspirant. 2016;5(21):146-151. [Savenkov A.I., Tyul'kin S.V., Shindel' E.V. Interrelation of binder and the properties of cement matrix and foam concrete. Aspirant. 2016;5(21):146-151. (In Russ.)]

14. Yue L., Bing C. New type of super-lightweight magnesium phosphate cement foamed concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015; 27(1):401-412.
15. Mydin Md.A.O. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. *European researcher. Series A*. 2014;1-2(67):124-129.
16. Bataev D.K.S., MazhievKh.N., Gaziev M.A., Salgiriev R.R., MazhievK.Kh., MazhievaA.Kh. Influence of size factor on creep deformation of fine-grain foam concrete for repair. *Life science journal*. 2014;11(12):995-997.
17. Vesova L.M. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete. *Procedia Engineering*. 2016;150:1587-1590.
18. Miryuk O.A. Formirovanie struktury magnezial'nykh yacheistyykh betonov. *World science - International scientific and practical conference*. 2016;1(7):62-66. [Miryuk O.A. Formation of the structure of magnesial cellular concrete. *World science - International scientific and practical conference*. 2016;1(7):62-66. (In Russ.)]
19. Krasnikova N.M., Khozin V.G., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Eruslanova E.V. Improving technology of non-autoclave foam concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2014; 9(22):16735-16741.
20. Sokov V.N., Zhabin D.V., Beglyarov A.E., Zemlyanushnov D.Yu. Teoreticheskie osnovy polucheniya yacheistyykh betonov iz penomass, aktiviruemykh gidroteplosilovym polem. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012;12:18-19. [Sokov V.N., Zhabin D.V., Beglyarov A.E., Zemlyanushnov D.Yu. Theoretical foundations for the production of cellular concrete from foam masses activated by a hydrothermal field. *Industrial and civil engineering*. 2012;12:18-19. (in Russ.)]
21. Loiko K.O., Belova S.A., Deryabin P.P. Vliyanie tekuchesti smesi na osnovnye svoystva penobetona sukhoi mineralizatsii. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Arkhitektura, stroitel'stvo, transport»*. 2015;518-522. [Loiko K.O., Belova S.A., Deryabin P.P. Influence of fluidity of the mixture on the basic properties of foam dry mineralisation. *Materials of the international scientific-practical conference «Architecture, construction, transport»*. 2015;518-522. (In Russ.)]
22. Mydin Md.A.O. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. *European researcher. Series A*. 2014;1-2(67):124-129.
23. Savenkov A.I. Opredelenie optimal'nogo vodotverdogo otnosheniya dlya penobetona. *Sbornik nauchnykh trudov angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005;1(1):372-374. [Savenkov A.I. Determination of the optimum water-hardening ratio for foam concrete. *Collection of scientific works of Angarsk State Technical University*. 2005;1(1):372-374. (In Russ.)]
24. Kolomatskii A.S., Kolomatskii S.A. Teploizolyatsionnye izdeliya iz penobetona. *Stroitel'nye materialy*. 2003; 1:38-39. [Kolomatskii A.S., Kolomatskii S.A. Thermal insulation products made of foam concrete. *Construction Materials*. 2003;1:38-39. (In Russ.)]
25. Lipilin A.B., Korenyugina N.V. Dezintegrator mokrogo pomola v proizvodstve neavtoklavnogo penobetona. *Stroitel'nyematerialy*. 2014;6:10-11. [Lipilin A.B., Korenyugina N.V. Wet disintegrator in the production of non-autoclave foam concrete. *Construction Materials*. 2014;6:10-11. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

Оцоков Камиль Алиевич - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и инженерных сетей.

Information about the author:

Kamil A. Otsokov - Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department Construction materials and engineering systems.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.09.2017.

Принята в печать 23.10.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 13.09.2017.

Accepted for publication 23.10.2017.

Для цитирования: Абдулхаликова П.А., Павлюченко Е.И. Особенности развития лизинговых отношений в строительстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):194-206. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-194-206

For citation: Abdulkhalikova P.A., Pavlyuchenko E.I. Development features of leasing relations in construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4):194-206. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-194-206

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 69.003

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-194-206

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЛИЗИНГОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Абдулхаликова П.А.², Павлюченко Е.И.¹

¹⁻²Дагестанский государственный технический университет,
¹⁻²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: elenamars2015@gmail.com, ²e-mail: asuta1964@mail.ru

Резюме. Цель. В настоящее время к числу наиболее эффективных методов финансирования строительных организаций относится лизинг, представляющий собой альтернативу традиционным для России формам инвестирования. В условиях дефицита свободных финансовых ресурсов, лизинг позволяет в кратчайшие сроки провести модернизацию производства, получить в пользование новое современное оборудование или открыть новое производство. **Цель** исследования состоит в аналитическом обобщении особенностей лизинга в строительстве и доказательстве его преимуществ как инструмента финансирования строительных организаций. **Метод.** Теоретической основой исследования послужили фундаментальные положения экономической теории; теории финансов и теории управления. В ходе исследования были использованы методы логического, статистического и сравнительного анализа, методы экспертных оценок, факторного анализа. **Результат.** Рекомендовано проводить анализ целесообразности формирования кредитного портфеля лизинговой компании, целью которого является определение потенциальных зон риска, связанных с возможностью превышения запланированных затрат. Установлено, что сделка лизинговой компании со строительной организацией может быть представлена как отдельный инвестиционный проект со сложной финансовой структурой и комплексом взаимоувязанных долгосрочных договоров. Доказано, что стандартизация принципов корпоративного управления и риск-менеджмента способна не только снизить подверженность строительной организации риску, но и повысить степень доверия со стороны заказчиков и контрагентов. **Вывод.** Целесообразность применения лизинга в строительстве обусловлена недостаточным объемом собственных средств для обновления строительного оборудования и техники, что приобретает особую актуальность на фоне стремительного устаревания производственных мощностей строительных организаций. В условиях широкомасштабного технического перевооружения, внедрения передовой техники и технологий в строительство, лизинговые технологии финансирования могут рассматриваться в качестве одного из наиболее эффективных способов решения существующих проблем.

Ключевые слова: лизинг, лизингодатель, лизингополучатель, сделки, операции, строительство, инструмент финансирования

ECONOMIC SCIENCE

DEVELOPMENT FEATURES OF LEASING RELATIONS IN CONSTRUCTION

*Patimat A. Abdulkhalikova*², *Elena I. Pavlyuchenko*¹

¹⁻²Daghestan State Technical University,

¹⁻²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: elenamars2015@gmail.com, ²e-mail: asuta1964@mail.ru

Abstract. Objectives Leasing, which is an alternative to traditional forms of investment for Russia, is currently among the most effective methods of financing construction organisations. Under conditions of shortage of available financial resources, leasing allows the modernisation of production to be carried out, modern equipment to be used or new production facilities to be opened in the shortest possible time. The purpose of the study is to comprehensively substantiate the specifics of leasing operations in construction and demonstrate its advantages as a tool for financing construction organisations. **Methods** The theoretical basis of the study was the fundamental provisions of economic, financial and management theory. During the process of research, logical, statistical and comparative analysis methods were used alongside expert evaluation and factor analysis approaches. **Results** For a leasing company whose purpose is to identify potential risk areas associated with the possibility of exceeding planned costs, it is recommended that a feasibility analysis be carried out prior to forming a loan portfolio. It is established that the transactions of a leasing company with a construction organisation can be presented as a separate investment project with a complex financial structure and a combination of interrelated long-term contracts. It is shown that the standardisation of principles of corporate governance and risk management is capable not only of reducing the susceptibility of a construction organisation to risk, but also of increasing the degree of trust on the part of customers and counterparties. **Conclusion** The expediency of using leasing in construction is due to the insufficient volume of private funds for the acquisition of equipment, which becomes particularly relevant against the background of rapidly aging facilities of construction organisations. Under conditions of large-scale technical re-equipment, in which advanced construction equipment and technologies are being introduced, leasing-based financing approaches can be considered as one of the most effective ways to solve existing problems.

Keywords: leasing, lessor, lessee, transactions, operations, construction, financing instrument

Введение. Лизинг представляет форму предпринимательской деятельности, основанной на экономических отношениях между лизингодателем и лизингополучателем по поводу приобретения или передачи основных средств на срочной и платной основе [1].

Лизинг является эффективным инструментом при решении проблемы обновления морально и физически изношенных основных производственных фондов, так и в инвестиционном обеспечении создаваемых производств [2]. Лизинг имеет многозначную экономическую основу и проявляет одновременно свойства кредита, инвестиций и аренды, образуя, таким образом, новую организационно-правовую форму бизнеса [3].

С помощью лизинга возможна реализация комплекса имущественных отношений, связанных с передачей средств производства во временное пользование путем их купли и последующей сдачи в аренду.

В настоящее время лизинговые сделки и операции входят в систему финансовых мер, направленных на стабилизацию экономики во многих отраслях. Однако в строительной отрасли наблюдаются причины, препятствующие активному росту объема лизинговых операций, адекватных потребностям рынка.

Среди них можно отметить дефицит средств для долгосрочного финансирования строительных проектов; проблемы поиска надежных лизингополучателей; необходимость гарантированной защиты прав и интересов лизингодателя в случае неплатежеспособности лизингополу-

чателя; длительность применяемых судебных процедур возврата собственности; отсутствие вторичного рынка оборудования и др.

До сих пор находятся в состоянии дискуссии множество вопросов, имеющих прямое отношение к особенностям развития лизинговых отношений в строительстве, что актуализирует выбор направления исследования [4, 9-14].

Постановка задачи. Цель исследования состоит в аналитическом обобщении особенностей лизинга в строительстве и доказательстве его преимуществ как инструмента финансирования строительных организаций.

В соответствии с российским законодательством, в лизинг можно передавать имущество – оборудование, транспорт, недвижимость и даже целые имущественные комплексы (предприятия) за исключением земельных участков и других природных объектов, а также имущество, которое согласно законодательству запрещено для свободного обращения или имеет особый порядок обращения [1-3].

Лизинговые отношения реализуются в виде сделок и операций. Лизинговая сделка характеризует осознанное действие юридических (физических) лиц по долгосрочной аренде имущества с последующим выкупом по остаточной стоимости [15]. Лизинговые отношения позволяют предприятиям обновлять основные фонды, не отвлекая из оборота значительный объем средств, оптимизируя при этом обязательства по налогам

Как правило, лизинг представляет собой многостороннюю сделку, в которой лизингодатель приобретает у фирмы-изготовителя движимое или недвижимое имущество и передает его в распоряжение лизингополучателя [16].

Лизинговые отношения в строительстве, основанные на договорных отношениях между сторонами, практически не отличаются от подобных операций, совершаемых в других сферах экономики.

Как правило, объектами лизинга в строительстве являются:

- транспортные средства, используемые при проведении строительных работ (автокраны, автогрейдеры, башенные краны, мобильные электрические подстанции, грузовые автомобили);
- экскаваторы, гидродъемники, скреперы, бульдозеры самоходные и бульдозеры с поворотным отвалом;
- бетономешалки или растворосмесители (растворомешалки);
- мобильные растворо-бетонные, щебеночные минизаводы;
- сверлильные машины, отбойные молотки, трамбовки и т.д.;
- приборы, механические элементы;
- здания и сооружения производственного назначения.

Лизингодателем в строительстве могут являться различные предприятия и организации: управления механизации, передвижные механизированные колонны (предприятия); финансовая лизинговая компания; специализированная лизинговая компания, выполняющая также и услуги по содержанию и ремонту имущества, замене изношенных частей, консультации по его использованию и т.д. Деятельность таких предприятий по проведению лизинговых сделок обязательно должна соответствовать условиям Устава.

Лизингополучателем может быть юридическое лицо любой организационно-правовой формы собственности.

Методы исследования. В настоящее время, согласно оценкам экспертов, в целом по строительной отрасли 40 - 50% всех основных фондов строительного комплекса по степени изношенности не отвечает конъюнктуре спроса, что требует их замены [4]. Кроме этого, в строительных организациях наблюдается тенденция роста удельного веса машин и механизмов с истекшим сроком службы.

По данным табл.1, коэффициент обновления основных фондов в строительной отрасли, рассчитанный в сопоставимых ценах, в 2016 г. составил 3,2 % и по сравнению с 2015 г. снизился на 0,2 процентного пункта.

Коэффициент выбытия основных фондов в строительстве в 2016 г. составил 1,0 %, по сравнению с 2015г. не изменился. На конец 2016г. степень износа уменьшилась на 1,4 пункта по сравнению с 2015 г.[4-5].

Таблица 1. Уровень износа, коэффициенты обновления и выбытия основных фондов в строительстве

Table 1. The level of wear, the coefficients of renewal and retirement of fixed assets in construction

Показатели	Строительство, %		
	2014г.	2015г.	2016г.
Коэффициент обновления основных фондов (в сопоставимых ценах)	3,8	3,4	3,2
Коэффициент ликвидации основных фондов (в сопоставимых ценах)	1,1	1,0	1,0
Степень износа основных фондов (в текущих ценах, на конец года)	51,2	50,4	51,8

В тоже время, устойчиво происходит рост стоимости основных видов материалов, деталей и конструкций, что, в свою очередь, затрудняет процесс обновления основных и оборотных фондов строительных организаций (табл. 2)

Таблица 2. Средние цены на основные виды материалов, деталей и конструкций, приобретенных строительными организациями [7]

Table 2. Average prices for the main types of materials, parts and structures purchased by construction organizations [7]

	2015г., руб. за ед. измер.	2016г. руб. за ед. измер.
Растворы строительные, за м ³	3365	3583
Кирпич керамический неогнеупорный строительный, за тыс. усл.кирпичей	9701	10207
Конструкции строительные сборные из стали прочие, за тонну	78376	85212
Материалы минеральные вспученные прочие (гравий керамзитовый), за м ³	1275	1289
Щебень, за м ³	1018	1038
Стекло листовое литое и прокатное профилированное, за м ²	229	264
Цемент, за тонну	3708	4232
Конструкции строительные сборные из стали прочие, за тонну	76744	78376
Прокат сортовой и фасонный горячекатаный, горячекатаный, экструдированный и кованный из нелегированной стали, за тонну	32034	35461

В сложившейся ситуации реализация лизинговых отношений в строительстве способна решить комплекс проблем и, прежде всего, своевременно обеспечить производственный процесс современным оборудованием, сырьем, материалами, конструкциями.

Преимущества развития лизинговых отношений в строительстве проявляются в возможности применения прогрессивных методов материально-технического обеспечения производства и вложения средств в основные производственные фонды, в дополнение к традиционным каналам инвестирования (бюджетные средства, собственные средства предприятий, долгосрочный кредит и т.д.).

Экономическая целесообразность и необходимость развития лизинговых отношений в строительстве подтверждается устойчивым снижением стоимости договоров финансового лизинга в строительной отрасли в 2015 году по сравнению с 2013 годом на 38,2 млрд. рубл. при сохранении доли заключенных договоров финансового лизинга в строительстве свыше 23% [4-5].

Таблица 3. Стоимость и структура договоров финансового лизинга машин, оборудования по отраслям
Table 3. Cost and structure of financial leasing agreements machines, equipment by industry

Показатели	2005	2010	2013	2014	2015
	<i>Млрд.рублей</i>				
Лизингополучатели по видам экономической деятельности	43,6	192,3	253,1	257,9	155,5
в том числе:					
сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	6,4	6,8	23,6	30,9	30,1
добыча полезных ископаемых	3,3	26,4	32,2	33,1	17,0
обрабатывающие производства	14,4	49,5	60,3	66,1	44,0
производство и распределение электроэнергии, газа и воды	3,9	16,0	9,2	14,8	3,5
строительство	7,1	71,3	71,8	59,7	36,6
оптовая и розничная торговля	2,6	4,8	13,6	12,2	8,2
транспорт и связь	3,0	5,5	9,8	11,0	7,1
финансовая деятельность	1,0	2,5	16,3	22,1	4,2
государственное управление и обеспечение военной безопасности	0,01	0,4	5,8	0,1	0,8
здравоохранение	0,3	0,1	1,2	1,2	0,9
другие виды деятельности	1,6	9,0	9,3	6,7	3,1

Как показало исследование, в целом объем лизинговых сделок в России за 2016 год вырос на 36% и составил 742 млрд. рублей [6].

В 2016 году впервые с 2013 года доля лизингового бизнеса в ВВП достигла 1,2%, что последний раз отмечалось в 2011–2013 годы (табл. 4) [8].

Таблица 4. Индикаторы развития рынка лизинга
Table 4. Leasing market development indicators

Показатели	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Объем нового бизнеса (стоимости имущества), млрд. руб.	450	741	770	783	680	545	742
Темпы прироста, %	150	64,6	3,9	1,7	-13,2	-19,9	36,1
Сумма новых договоров лизинга, млрд. руб.	725	1 300	1 320	1 300	1 000	830	1150
Темпы прироста, %	130,2	79,3	1,5	-1,5	-23,1	-17	38,6
Объем полученных лизинговых платежей, млрд. руб.	350	540	560	650	690	750	790
Темпы прироста, %	9,4	54,3	3,7	16,1	6,2	8,6	5,3
Объем профинансированных средств, млрд. руб.	450	737	640	780	660	590	740
Темпы прироста, %	192,2	63,8	13,2	21,9	-15,4	-10,6	25,4
Совокупный лизинговый портфель, млрд. руб.	1 180	1 860	2 530	2 900	3 200	3 100	3 200
Темпы прироста, %	22,9	57,6	36	14,6	10,3	-3,1	3,2
Номинальный ВВП России, млрд. руб. (в постоянных ценах 2011 г., по данным Росстата)	46 308,5	59 698,1	61 798,3	62 588,9	63 038,4	61 249,4	61 097,5
Доля лизинга (объема нового бизнеса) в ВВП, %	1,0	1,2	1,2	1,3	1,1	0,9	1,2
Концентрация на топ-10 компаний в сумме новых договоров, %	62,4	66,5	63,0	65,0	66,4	66,0	62,2
Индекс розничности, %	24,0	23,0	28,0	34,7	43,9	44,0	45,2

Как видно из табл. 4, доля кредитов в структуре профинансированных средств выросла с 52 до 60% за 2016 год вследствие снижения кредитных ставок банками.

Доля сегмента малого и среднего бизнеса в объеме нового бизнеса второй год подряд превышает 50%.

Ключевое позитивное влияние на розничный сегмент оказал автолизинг, доля которого на рынке составила около 35% [5].

Кроме того, рост показали строительная и сельскохозяйственная техника, увеличившие доли на рынке до 7 и 3 %, соответственно [5].

Всего по рынку из 17 крупнейших сегментов, выделенных экспертами [8] в рамках исследования, положительные темпы прироста имеет строительная и дорожно-строительная техника, включая строительную спецтехнику на колесах (табл. 5).

Таблица 5. Структура рынка по предметам лизинга
Table 5. Market structure by leasing items

Предметы лизинга	Доля в новом бизнесе (стоимости имущества) за 2016 г., %	Доля в новом бизнесе (стоимости имущества) за 2015 г., %	Прирост (+) или сокращение (-) объема сегмента, %	Доля в лизинговом портфеле на 01.01.17, %
Авиационный транспорт (воздушные суда, вертолеты)	20,5	20,6	35,5	21,6
Грузовой автотранспорт	17,6	16,8	42,6	7,1
Легковые автомобили	17,5	19,8	20,3	6,8
Железнодорожная техника	13,0	17,	-1,1	40,8
Суда (морские и речные)	7,1	1,5	544,4	4,9
Строительная и дорожно-строительная техника, включая строительную спецтехнику на колесах	7,0	5,8	64,3	3,5
Сельскохозяйственная техника и скот	3,1	1,5	181,4	3,2
Машиностроительное, металлообрабатывающее и металлургическое оборудование	2,4	2,9	12,7	3,7
Оборудование для нефте- и газодобычи и переработки	2,3	0,8	291,4	1,9
Недвижимость (здания и сооружения)	1,3	2,6	-31,9	1,8
Погрузчики и складское оборудование, упаковочное оборудование и оборудование для производства тары	1,2	1,3	25,7	0,4
Оборудование для пищевой промышленности, включая холодильное и оборудование для ресторанов	0,9	1,0	22,5	0,3
Телекоммуникационное оборудование, оргтехника, компьютеры	0,7	0,6	58,8	0,3
Оборудование для ЖКХ	0,4	1,8	-69,7	0,6
Энергетическое оборудование	0,3	0,7	-41,7	0,5
Полиграфическое оборудование	0,3	0,5	-18,3	0,2
Медицинская техника и фармацевтическое оборудование	0,2	0,4	-31,9	0,1
Прочее оборудование	4,2	3,5	63,4	2,3

В 2017 году рынок лизинга, согласно базовому прогнозу экспертов продолжит расти и превысит рекордные 800 млрд. рублей, а с 2018 года на динамику и структуру нового бизнеса влияние начнет оказывать реформа регулирования финансового лизинга [6].

Общая стоимость договоров финансового лизинга, заключенных в 2016 г., составила 743,5 млрд. рублей, из них на лизинг машин, оборудования, транспортных средств – 735,2 млрд. рублей, что составляет 16,4 % от общего объема инвестиций в активную часть основных фондов (табл. 6) [5].

Средний срок действия договоров финансового лизинга (без микропредприятий), заключенных в 2016г., составляет 4 года.

Средний срок работы лизинговых компаний на рынке лизинговых услуг в 2016г. составил 7 лет.

Таблица 6. Общая стоимость договоров финансового лизинга, заключенных организациями, осуществлявшими деятельность в сфере финансового лизинга в 2016 году
Table 6. The total value of financial leasing contracts concluded by organizations that carried out activities in the field of financial leasing in 2016

	Всего	В том числе			
		крупный бизнес	средние предприятия	малые предприятия	Микро-предприятия
<i>Млрд.рублей</i>					
Общая стоимость договоров финансового лизинга	743,5	646,5	33,7	46,0	17,3
в том числе: зданий (кроме жилых) и сооружений	7,5	5,3	0,5	0,5	1,2
машин и оборудования	217,6	165,0	16,9	27,6	8,1
из них: компьютеров и компьютерных сетей	3,0	1,7	0,6	0,5	0,2
транспортных средств	517,6	475,5	16,4	17,9	7,9
из них: автомобилей (включая автобусы и троллейбусы)	270,7	236,5	14,5	14,8	5,0
судов	47,2	46,2	0,4	0,5	0,1
железнодорожных транспортных средств	150,3	148,6	0,5	0,9	0,3
аппаратов летательных воздушных	38,3	36,3	0,3	-	1,7
рабочего, продуктивного и племенного стада	0,7	0,6	-	-	0,1
<i>В % к итогу</i>					
Общая стоимость договоров финансового лизинга	100	100	100	100	100
в том числе: зданий (кроме жилых) и сооружений	1,0	0,8	1,5	1,2	6,8
машин и оборудования	29,3	25,5	50,0	59,9	47,1
из них: компьютеров и компьютерных сетей	0,4	0,3	1,7	1,1	0,9
транспортных средств	69,6	73,6	48,5	38,9	45,5
из них: автомобилей (включая автобусы и троллейбусы)	36,4	36,6	42,9	32,2	28,7
судов	6,3	7,2	1,1	1,1	0,3
железнодорожных транспортных средств	20,2	23,0	1,6	2,0	1,8
аппаратов летательных воздушных	5,2	5,6	0,8	-	9,9
рабочего, продуктивного и племенного стада	0,1	0,1	-	-	0,6

Обсуждение результатов. Общая стоимость договоров финансового лизинга представляет собой общую сумму всех инвестиционных затрат лизингодателя, связанных с приобретением и использованием предмета финансового лизинга

Основным источником финансирования лизинговой деятельности в 2016 году являлись кредиты российских банков, на долю которых приходится 47,8% от стоимости заключенных договоров.

За счет авансовых платежей лизингополучателя финансируется 23,8% договоров, за счет собственных средств лизинговых компаний – 15,6%. За счет других источников финансирования (заемных средств других организаций, иностранных кредитов, бюджетных средств, средств физических лиц - резидентов РФ) финансируется 12,8% договоров [15].

Важнейшее значение для лизингодателя имеет определение величины арендной платы, обеспечивающей получение желаемой нормы доходности [16]. Немаловажная проблема сводится к определению величины арендной платы, обеспечивающей требуемую доходность операции после вычета налоговых платежей.

Процедуру определения величины арендной платы можно свести к выполнению следующих расчетов [17 -20].

1. Определить современную стоимость платежей, связанных с владением активом (PV). Элементами этих платежей, прежде всего, являются налоговый «щит», образуемый за счет амортизационных отчислений, а также доходы, полученные в конце срока лизинговой операции. Сюда же могут быть отнесены различные налоговые льготы, связанные с инвестированием средств в данный вид активов лизинговой компанией.

Формула, по которой ведется расчет, может быть представлена в следующем виде:

$$PV = I_0 * T + \sum \frac{A_t * T}{(1+r)^t} - \frac{SV_n}{(1+r)^t}; \quad (1)$$

где T – ставка налога;

A_t – амортизационные отчисления в периоде t;

SV_n – величина остаточной стоимости оборудования на конец срока операции;

I_0 – стоимость оборудования;

r – норма дисконта (доходности).

2. Определить сумму, подлежащую возмещению от проведения лизинговой операции (S).

$$S = I_0 - PV \quad (2)$$

3. Определить величину посленалоговой арендной платы (NR) по формуле:

$$NR = S * \left(\frac{r * (1+r)^n}{1 - (1+r)^n} \right); \quad (3)$$

4. Определить величину доналоговой арендной платы (R) по формуле:

$$R = NR / (1-T) \quad (4)$$

Каждая сделка лизинговой компании может быть представлена как отдельный инвестиционный проект со сложной финансовой структурой и комплексом взаимосвязанных долгосрочных договоров [21].

К числу наиболее важных этапов реализации такого рода проектов относится составление графика лизинговых платежей, поскольку он определяет привлекательность лизинга для клиента и в то же время формирует цену лизингового договора [22].

Для лизингодателя важно учесть и правильно отразить в текущих лизинговых платежах все понесенные им расходы по лизинговой сделке. При наличии аванса и выкупной цены данные платежи также являются обязательными, но не входят в лизинговый платеж.

В структуре лизингового платежа основную часть составляет закупочная стоимость имущества, переданного в лизинг. Она представляет собой сумму, которую инвестировал лизингодатель в данную сделку на возвратной основе (исключая аванс и выкупную цену имущества) [23].

В зависимости от того, каким образом будет распределено во времени в лизинговом платеже погашение закупочной стоимости имущества, и будет формироваться та или иная форма лизингового платежа.

Формы лизинговых платежей, наиболее часто применяемых в строительстве, и соответствующие им способы погашения закупочной стоимости имущества сгруппированы в табл. 7.

При равномерном погашении стоимости имущества ввиду того, что инвестиционные издержки начисляются на остаток задолженности, а, следовательно, имеют регрессивный вид, форма лизингового платежа носит также регрессивный характер.

Данная форма лизингового расчета наиболее простая и довольно часто применяемая лизингодателями.

Таблица 7. Соответствие форм лизинговых платежей динамике погашения платежей
Table 7. Conformity of forms of leasing payments to the dynamics of repayment of payments

№	Способы погашения закупочной стоимости имущества	Форма лизинговых платежей
1	Равномерная	Регрессивная
2	Регрессивно-ступенчатая	Регрессивно-ступенчатая
3	Прогрессивная	Аннуитетная

Уменьшение платежа с течением времени зачастую так же выгодно и лизингополучателю, т.к. эксплуатационные затраты на оборудование, как правило, с течением времени растут, тем самым, снижение лизинговых платежей позволяет сохранить положительный денежный баланс при неизменной выручке.

Однако эффективность лизинговых отношений в строительстве во многом зависит от учета факторов риска при проведении лизинговых сделок, что требует разработки мер по устранению или локализации последствий действия факторов риска.

Как показала практика лизинговых отношений в строительстве, все множество рисков, с которыми сталкиваются лизинговые компании в процессе своей деятельности, можно подразделить на две большие группы:

- общие, с которыми сталкиваются все предприятия, работающие на российском рынке;
- специфические, т.е. либо относящиеся только к лизинговой деятельности, либо имеющие отраслевые особенности.

Под общие риски подпадают такие категории рисков, как политические, макроэкономические, правовые и налоговые.

Эффективность лизинговой сделки напрямую зависит от успеха проекта лизингополучателя, поэтому значительная группа рисков, характерная для лизинговых сделок в строительстве – это специфические проектные риски, связанные с разработкой и реализацией конкретного инвестиционно-строительного проекта. К ним можно отнести и экономическую целесообразность и экологическая безопасность инвестиционно-строительного проекта, и маркетинговую стратегию лизингополучателя.

Большая группа рисков, на которые лизингодателю следует обратить большое внимание, связана с предметом лизинга, которым чаще всего бывает оборудование и строительная дорожная техника. Риски можно классифицировать следующим образом:

- риск невозврата, когда лизингополучатель отказывается возвращать лизинговое имущество;
- риск утраты, когда лизинговое имущество физически утрачено;
- риск невозможности реализации оборудования на вторичном рынке.

Финансовые риски, с которыми сталкивается лизинговая компания, можно условно подразделить на три категории: портфельный риск, процентный риск, валютный риск.

Учет действия факторов риска предполагает разработку специфических элементов механизма управления реализацией лизинговой деятельности, позволяющих снизить риск или уменьшить связанные с ним неблагоприятные последствия.

Особое внимание уделяется выявлению основных факторов риска с целью разработки соответствующего механизма управления ими в будущем. Это можно будет сделать путем

обеспечения учета, контроля и анализа происходящих или возможных последствий от действия факторов и прогнозирования их влияния на эффективность реализации программных мероприятий.

Следует учесть, что лизинг как финансовая аренда в отличие от банковской сферы менее подвержен финансовому риску, однако, в силу своей инвестиционной природы, в большей степени проявляемого в строительстве, риск адекватности принятого решения относительно инвестиционно-строительных проектов наиболее существенен, как по величине, так и по вероятности совершения. Именно поэтому, на наш взгляд, введение стандартов корпоративного управления и риск-менеджмента является фактором повышения надежности лизинговых компаний [24].

Основная функция риск-менеджмента – разработка и принятие мер по снижению неблагоприятных последствий риска и управление им с целью извлечения стратегических преимуществ.

Лизинговая компания должна, прежде всего, управлять портфельным инвестиционным риском, увязывая принципы и методы риск-менеджмента со стратегией предприятия. Стандартизация принципов корпоративного управления и риск-менеджмента способна не только снизить подверженность компаний риску, но и повысить степень доверия со стороны клиентов и контрагентов.

С этой целью нами предлагается проводить анализ целесообразности формирования кредитного портфеля лизинговой компании, целью которого является определение потенциальных зон риска, связанных с возможностью превышения первоначально запланированных затрат. Для формирования кредитного портфеля лизинговая компания может использовать различные способы привлечения средств.

Наиболее простой способ – это кредит под конкретную сделку для финансирования лизинговой компанией. Для этого лизинговая компания, зная регламент финансирующего банка, подготавливает все необходимые документы по сделке, проводит оценку рисков и финансового состояния клиента. Затем, документы направляют в банк, где рассматривается сделка и принимается решение о выдаче кредита.

Как показало исследование, в числе финансовых рисков находится процентный риск, возникающий из соотношения процентов по банковскому кредиту, который взят для финансирования лизинговой сделки, а также процентов по договору лизинга. Например, если договор на банковский займ был заключен с плавающей процентной ставкой, а лизинговый договор, при этом, с фиксированной, то процент по кредитному договору может повыситься, и, как следствие, сделка для лизинговой компании окажется убыточной.

При выборе конкретного метода воздействия на риск в банке анализируют негативную и позитивную стороны реализации риска и учитывают результаты анализа при принятии решения о величине инвестиционного риска для конкретного лизингового договора.

Страхование рисков – это обязательная процедура при заключении договора лизинга. Необходимость ее обоснована ст. 21 ФЗ «О финансовой аренде» [2]. Страхование осуществляется одной из сторон соглашения или по обоюдному согласию участников сделки. Порядок распределения рисков между сторонами договора прописан в ст. 22 ФЗ.

В лизинговом договоре, конечно, может предусматриваться и некоторая определенная ответственность лизингополучателя за ущерб, нанесенный имуществу, которое он взял в аренду. Но размер выплат в этом случае для клиента будет небольшой и значительно меньше первоначальной стоимости имущества. Лизингополучатель может договор расторгнуть, если взятое имущество в силу непредвиденных обстоятельств оказалось в непригодном для эксплуатации состоянии.

Среди инновационных схем применения лизинга в строительстве на российском лизинговом рынке все большую популярность в последнее время приобретает секьюритизация активов.

Под секьюритизацией понимается замена нерыночных займов и/или потоков наличности на ценные бумаги, свободно обращающиеся на рынках капиталов [25].

Секьюритизация представляет способ привлечения источников финансирования, связанный с выпуском ценных бумаг, обеспеченных активами, генерирующими стабильные денежные потоки (например, портфель ипотечных кредитов, автокредитов, лизинговые активы, коммерческая недвижимость, генерирующая стабильный рентный доход и т.д.) [25].

В первую очередь секьюритизация может быть интересна коммерческим банкам, имеющим значительные портфели однородных кредитов, лизинговым компаниям, фондам недвижимости и девелоперам. Секьюритизация при определенных условиях позволяет повысить доходность на собственный капитал; диверсифицировать источники финансирования; снизить стоимость привлекаемых источников финансирования; привлечь финансирование на более длительный срок; снизить уровень риска лизингового портфеля за счет перевода кредитных рисков на широкий круг инвесторов - владельцев ценных бумаг, выпущенных на основе секьюритизации лизингового портфеля.

Начальным этапом внедрения проектов по секьюритизации является анализ экономической обоснованности проведения сделки по секьюритизации по сравнению с другими вариантами финансирования. Для этого необходимо проводить анализ стратегических целей клиента, портфеля секьюритизируемых активов, состояния информационных систем, правовых проблем, налоговых аспектов, важных для сделки по секьюритизации. Кроме того, на основе предварительного анализа бюджета инвестиционно-строительного проекта рекомендуется проводить консультации с рейтинговыми агентствами и банками в целях построения рейтинга лизинговой компании и прогнозирования затрат на осуществление сделки.

Вывод. Результаты проведенного исследования позволяют обосновать преимущества развития лизинговых отношений в строительстве:

- приобретение в пользование основных фондов при минимальном собственном капитале лизингополучателя;
- возможность применения механизма ускоренной амортизации к имуществу, переданному в лизинг;
- расширение возможности по налоговой оптимизации лизинговой сделки;
- гибкость графика выплат по лизинговым соглашениям;
- возможность гарантийного обслуживания оборудования и строительной техники;
- инвестирование в форме имущества в отличие от денежного кредита снижает риск невозврата средств, так как за лизингодателем сохраняются права собственности на переданное имущество;
- лизинговое соглашение более гибко, чем кредит, так как предоставляет возможность обеим сторонам выработать удобную схему выплат;
- ставки платежей могут быть фиксированными и плавающими;
- для лизингополучателя уменьшается риск морального и физического износа и устаревания имущества;
- поскольку платежи по лизингу жестко не привязаны к нормам амортизации, то при лизинговых отношениях лизингополучатель имеет ускоренную амортизацию имущества;
- лизинговое имущество не числится у лизингополучателя на балансе, что не увеличивает его активы и освобождает от уплаты налога на это имущество;
- лизинговые платежи относятся на издержки производства лизингополучателя и соответственно снижают налогооблагаемую прибыль.

Таким образом, лизинг в строительстве дополняет традиционные отношения реального сектора экономики с финансово-кредитными институтами по обеспечению модернизации, реконструкции и развитию строительного производства.

Библиографический список:

1. Федеральный закон «О присоединении Российской Федерации к Конвенции УНИДРУА о международном финансовом лизинге», от 16 января 1998 г.
2. Федеральный закон «О финансовой аренде (лизинге)» от 29.10.98, 164–ФЗ. (ред. от 03.07.2016).
3. Конвенция УНИДРУА о международном финансовом лизинге.

4. Строительный комплекс Российской Федерации в 2016 году
http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/building/ (размещено 31.05.2017г.
5. http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_46/Main.htm Строительство в России - 2016 г.
6. http://infobank.by/news_4_page/itemid/1061 Рынок лизинга по итогам 2016 года: реактивное восстановление
7. Цены в России - 2016 г. http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_17/Main.htm
8. <http://raexpert.ru/> Рейтинговое Агентство RAEX (Эксперт РА).
9. Адамов Н., Мельцас Е.. Вопросы взаимодействия финансовой логистики и лизинга. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 128 с.
10. Алексеева Т.Р. Лизинг в инновационном развитии строительного комплекса. М.: МГСУ, 2014. – 160 с.
11. Бордин Н.Ф. Лизинг как способ обновления ОПФ / Н.Ф. Бордин // *Машиностроитель*. – 2014. 1. С.18 – 29.
12. Борисов А.Н. Комментарий к Федеральному закону от 29 октября 1998 г. N 164-ФЗ «О финансовой аренде (лизинге)» (постатейный). Деловой двор. 2012 г.
13. Васильев Н.М. Лизинг: организация, нормативно-правовая основа, развитие Васильев Н.М., С.Н. Катырин. Мн.: «ДеКА», 2014. – 458 с.
14. Винслав Ю. Управление лизинговой деятельностью в интегрированных корпоративных структурах / Ю.Винслав, М.Ведров // *Российский экономический журнал*. 2010. N 1. С.79-90.
15. Канцер Ю. Сравнительный анализ лизинга и кредита. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 87 с.
16. Nevitt P. K. and F. J. Fabozzi *Equipment Leasing* (Third Ed.), Dow-Jones, Irwin, Homewood, IL, 1988.
17. Stadler A. *Leasing in Deutschland : Immobilien weiter expansiv - Massengeschaft rucklaufig*. IFO Schnelldienst. - Munchen, 1995. - Jg. 48, N 1/2. PP. 8-15.
18. Sugarman Alan D., Goldberg Joel J., *Commercial Tenant's Leasing Transactions Guide: Forms and Strategies*, 381pp. ISBN: 0471634735 Publisher: Wiley, John & Sons, Incorporated Pub. Date: November 1988.
19. Корнилова Е.В., Паштова Л.Г. Финансовое проектирование лизинговых сделок. Монография. М.: КноРус, 2017. 112 с.
20. Amembal Sudhir P., Halladay Shawn D., Isom Terry A., Leininger R. *Equipment Leasing: A Complete Handbook*, 2nd Ed., 844pp. ISBN: 0070011729 Publisher: McGraw-Hill Companies, The Pub. Date: June 1991.
21. Пенчукова Т. Лизинговые услуги как фактор модернизации экономики России. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 164 с.
22. Сафиуллина И. Роль лизинга в активизации инновационной деятельности предприятий. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 208 с.
23. Сивориновский Б.Г. Статистическое изучение лизинга как вида инвестиционной деятельности / Б.Г.Сивориновский, Н.С.Апарин // *Вопросы статистики*. 2015. N 9. С.23-29.
24. Смирнов А.Л. Лизинговые операции / А.Л. Смирнов / Серия *Международный банковский бизнес*. – М.: Издательство «Консалтбанкир», 2015. 136 с.
25. Тихомиров М.Ю. Финансовая аренда (лизинг). Практика применения законодательства и официальные разъяснения. – М.: Издание Тихомирова М. Ю., 2016. 48 с.

References:

1. Federal'nyi zakon «O prisoedinenii Rossiiskoi Federatsii k Konventsii UNIDRUA o mezhdunarodnom finansovom lizinge» ot 16 yanvarya 1998 g. [The Federal Law «On the Accession of the Russian Federation to the UNIDROIT Convention on International Financial Leasing» of January 16, 1998. (In Russ.)]
2. Federal'nyi zakon «O finansovoi arende (lizinge)» ot 29.10.98, 164-FZ. (red. ot 03.07.2016). [Federal Law «On Financial Leasing (Leasing)» dated 29.10.98, 164-FZ. (as amended on 03/07/2016). (In Russ.)]
3. Konventsiya UNIDRUA o mezhdunarodnom finansovom lizinge. [UNIDROIT Convention on International Financial Leasing. (In Russ.)]
4. Stroitel'nyy kompleks Rossiyskoy Federatsii v 2016 godu
http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/building/ (razmeshcheno 31.05.2017g. [The construction complex of the Russian Federation in 2016
http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/building/ (posted 31.05.2017. (In Russ.)]
5. Polozhenie po bukhgalterskomu uchetu PBU 6/01 «Uchet osnovnykh sredstv». Prikaz Minfina RF ot 30 marta 2001 g. N 26n (red. ot 16 maya 2016 g.). [Accounting Regulations PBU 6/01 «Accounting for Fixed Assets». Order of the Ministry of Finance of the Russian Federation. March 30, 2001 No. 26n (as amended on May 16, 2016) (In Russ.)]
6. http://infobank.by/news_4_page/itemid/1061 Rynok lizinga po itogam 2016 goda: reaktivnoe vosstanovlenie. [http://infobank.by/news_4_page/itemid/1061 The leasing market following the results of 2016: reactive recovery. (In Russ.)]
7. Tseny v Rossii - 2016g. <http://www.gks.ru> [Prices in Russia – 2016. http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_17/Main.htm (In Russ.)]
8. <http://raexpert.ru/> Reitingovoe Agentstvo RAEX (Ekspert RA). [<http://raexpert.ru/> Rating Agency RAEX (Expert RA). (In Russ.)]

9. Adamov N., Mel'tsas E. Voprosy vzaimodeistviya finansovoi logistiki i lizinga. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 128 s. [Adamov N., Mel'tsas E. Questions of interaction of financial logistics and leasing. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 128 s. (In Russ.)]
10. Alekseeva T.R. Lizing v innovatsionnom razvitii stroitel'nogo kompleksa. M.: MGSU; 2014. 160 s. [Alekseeva T.R. Leasing in the innovative development of the building complex. M.: MGSU; 2014. 160 p. (in Russ.)]
11. Bordin N.F. Lizing kak sposob obnovleniya OPF. Mashinostroitel'. 2014;1:18 – 29. [Bordin N.F. Leasing as a way to update the OPF. Mashinostroitel'. 2014;1:18 – 29. (In Russ.)]
12. Borisov A.N. Kommentarii k Federal'nomu zakonu ot 29 oktyabrya 1998 g. N164-FZ «O finansovoi arende (lizinge)» (postateinyi). «Delovoi dvor». 2012. [Borisov A.N. Comments to the Federal Law of October 29, 1998 N164-FZ «On financial leasing (leasing)» (itemised). «Delovoi dvor». 2012. (In Russ.)]
13. Vasil'ev N.M., Katyryn S.N. Lizing: organizatsiya, normativno-pravovaya osnova, razvitie. Mn.: «DeKA»; 2014. 458 s. [Vasil'ev N.M., Katyryn S.N. Leasing: organisation, regulatory framework, development. Mn.: «DeKA»; 2014. 458 p. (In Russ.)]
14. Vinslav Yu., Vedrov M. Upravlenie lizingovoi deyatel'nost'yu v integrirovannykh korporativnykh strukturakh. Ros. ekon. zhurnal. 2010;1:79-90. [Vinslav Yu., Vedrov M. Management of leasing activity in integrated corporate structures. Russian Economic Journal. 2010;1:79-90. (In Russ.)]
15. Kantser Yu. Sravnitel'nyi analiz lizinga i kredita. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2012. 87 s. [Kantser Yu. Comparative analysis of leasing and credit. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2012. 87 p. (In Russ.)]
16. Nevitt P.K. and Fabozzi F.J. Equipment Leasing (Third Ed.). Dow-Jones, Irwin, Homewood, IL; 1988.
17. Stadler A. Leasing in Deutschland: Immobilien weiter expansiv - Massengeschäft rucklauffig. IFO Schnelldienst. Munchen; 1995;48(1/2):8-15.
18. Sugarman A.D., Goldberg J.J. Commercial Tenant's Leasing Transactions Guide: Forms and Strategies. Wiley, John & Sons; 1988. 381 p.
19. Kornilova E.V., Pashtova L.G. Finansovoe proektirovanie lizingovykh sdelok. Monografiya. M.: KnoRus; 2017. 112 s. [Kornilova E.V., Pashtova L.G. Financial design of leasing transactions. Monograph. M.: KnoRus; 2017. 112 p. (In Russ.)]
20. Amembal S.P., Halladay S.D., Isom T.A. Leininger R. Equipment Leasing: A Complete Handbook, 2nd Ed. McGraw-Hill Companies; 1991. 844 p.
21. Penchukova T. Lizingovye uslugi kak faktor modernizatsii ekonomiki Rossii. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 164 s. [Penchukova. Leasing services as a factor of modernisation of the Russian economy. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 164 p. (In Russ.)]
22. Safiullina I. Rol' lizinga v aktivizatsii innovatsionnoi deyatel'nosti predpriyatii. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2012. 208 s. [Safiullina I. The role of leasing in the activation of innovative activities of enterprises. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2012. 208 p. (In Russ.)]
23. Sivorinovskii B.G., Aparin N.S. Statisticheskoe izuchenie lizinga kak vida investitsionnoi deyatel'nosti. Voprosy statistiki. 2015;9:23-29. [Sivorinovskii B.G., Aparin N.S. Statistical study of leasing as a type of investment activity. Voprosy statistiki. 2015;9:23-29. (In Russ.)]
24. Smirnov A.L. Lizingovye operatsii. Seriya Mezhdunarodnyi bankovskii biznes. M.: Izdatel'stvo «Konsaltbankir»; 2015. 136 s. [Smirnov A.L. Leasing operations. Series International banking business. M.: Izdatel'stvo «Konsaltbankir»; 2015. 136 p. (In Russ.)]
25. Tikhomirov M.Yu. Finansovaya arenda (lizing). Praktika primeneniya zakonodatel'stva i ofitsial'nye raz'yasneniya. M.: Izdanie Tikhomirova M. Yu.; 2016. 48 s. [Tikhomirov M.Yu. Financial lease (leasing). Practice of application of legislation and official explanations. M.: Izdanie Tikhomirova M.Yu.; 2016. 48 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Абдулхаликова Патимат Ахмедовна – аспирант.

Павлюченко Елена Ивановна - доктор экономических наук, профессор, член редакционной коллегии.

Information about the authors:

Patimat A. Abdulkhalikova – Graduate student.

Elena I. Pavlyuchenko – Dr.Sci. (Economics), Prof., Member of the editorial Board.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.08.2017.

Received 17.08.2017.

Принята в печать 28.10.2017.

Accepted for publication 28.10.2017.

Для цитирования: Иванов Н.А., Кожушкина И.В., Оборин М.С., Шерешева М.Ю. Методология формирования взаимовыгодного сетевого взаимодействия малых городов и районных центров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):207-222. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-207-222

For citation: Ivanov N.A., Kozhushkina I.V., Oborin M.S., Sheresheva M.Yu. Methodology for forming mutually beneficial network interaction between small cities and district centres. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (4): 207-222. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-207-222

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.48

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-207-222

МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЗАИМОВЫГОДНОГО СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ И РАЙОННЫХ ЦЕНТРОВ

Иванов Н.А.³, Кожушкина И.В.⁴, Оборин М.С.¹, Шерешева М.Ю.²

¹Пермский институт (филиал), Российский экономический университет
имени Г.В. Плеханова,

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,

¹614070, г. Пермь, ул. бульвар Гагарина, 57, Россия,

¹614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, Россия,

²⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1-46, Россия,

⁴ Сочинский государственный университет,

⁴354000, г. Сочи, ул. Советская, 26а, Россия,

¹e-mail: recreachin@rambler.ru, ²e-mail: m.sheresheva@gmail.com,

³e-mail:n.a.ivanov33@gmail.com, ⁴e-mail: kojushkina@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методологии сетевого взаимодействия малых городов и районных центров на основе разработки взаимовыгодных направлений. Представляется важной оценка возможности сотрудничества малых городов, районных центров и органов местного самоуправления на примере отдельных территориальных образований России в контексте формирования и укрепления структур сетевого взаимодействия и поддержки территориального развития. **Методы.** Основными методами исследования является системный и функциональный подходы. Моделирование социально-экономических процессов дает наглядное представление о динамике положительных изменений для малых городов и районных центров выбранных субъектов РФ. **Результат.** Выявлены особенности сотрудничества малых городов и районных центров в некоторых областях: образование, торговля и общественное питание, туристско-рекреационная деятельность. Охарактеризована роль обеспечивающих подсистем: управления, нормативно-правовой деятельности, транспорта и логистики. Приведены схемы формирования взаимовыгодного сетевого взаимодействию; охарактеризованы преимущества для каждого субъекта сети. Выявлен экономический эффект от реализации взаимодействия для малых городов и районных центров. В основу методологии положена оценка доступа городов к коммутированию, на основе которого формируются региональные и городские сети. **Вывод.** Определен перечень направлений взаимовыгодного сетевого взаимодействия малых городов и районных центров, позволяющий сформировать изменения в региональной экономической политике и программах, обеспечивающих развитие территорий малых городов и районных центров, в том числе депрессивных. Статья выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-18-01324) «Устойчивое развитие экономики территорий на основе сетевого взаимодействия малых городов и районных центров».

Ключевые слова: сетевое взаимодействие, специализация, взаимовыгодное сотрудничество, развитие территорий, экономический эффект

ECONOMIC SCIENCE
METHODOLOGY FOR FORMING MUTUALLY BENEFICIAL NETWORK
INTERACTION BETWEEN SMALL CITIES AND DISTRICT CENTRES

Nikolay A. Ivanov³, Irina V. Kozhushkina⁴, Matvey S. Oborin¹, Marina Yu. Sheresheva²

¹Perm Institute (branch) of Plekhanov Russian University of Economics,

¹57 Gagarin Boulevard, Perm 614070, Russia,

¹Perm State University,

¹15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia,

²⁻³Lomonosov Moscow State University,

²⁻³1-46 Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russia,

⁴Sochi State University,

⁴26 a Sovetskaya Str., Sochi 354000, Russia,

¹e-mail: recreachin@rambler.ru, ²e-mail: m.sheresheva@gmail.com,

³e-mail: n.a.ivanov33@gmail.com, ⁴e-mail: kojushkina@yandex.ru

Abstract. Objectives The aim of the study is to develop a methodology for networking between small towns and regional centres on the basis of developing areas of mutual benefit. It is important to assess the possibility of cooperation between small towns and regional centres and local self-government bodies on the example of individual territorial entities of Russia in the context of the formation and strengthening of networks and support for territorial development. **Methods** Systemic and functional methodical approaches were taken. The modelling of socio-economic processes provides a visual representation of the direction of positive changes for small towns and regional centres of selected Subjects of the Russian Federation. **Results** Specific examples of cooperation between small towns and district centres are revealed in some areas; these include education, trade and public catering, tourist and recreational activities. The supporting role of subsystems, including management, regulatory activity, transport and logistics, is described. Schemes, by to which mutually beneficial network interaction is formed, are characterised in terms of the specific advantages accruing to each network subject. Economic benefits of realising interaction between small cities and regional centres are discussed. The methodology is based on assessing the access of cities to commutation, on which basis contemporary regional and city networks are formed. **Conclusion** On the basis of the conducted study, a list of areas for mutually beneficial networking between small towns and district centres has been identified, allowing the appropriate changes in regional economic policies to be effected in terms of programmes aimed at the development of regions and small towns, including those suffering from economic depression.

Acknowledgment The work was financially supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 17-18-01324) "Sustainable development of the economy of territories based on the network interaction of small towns and regional centres".

Keywords: network interaction, specialisation, mutually beneficial cooperation, development of territories, economic effect

Введение. В настоящее время в России назрела потребность в выработке системы мер и механизмов эффективного партнерства государства, отдельных территорий и гражданского общества, поскольку органы власти, которые сотрудничают с более мелкими территориальными структурами и образованиями, а также институтами гражданского общества, повышают результативность своей деятельности и усиливают ее правомерность в глазах граждан.

Взаимодействие городов разных уровней на основе партнерства необходимо для развития России как правового, демократического и социальноориентированного государства. Органы власти признают, что социальный прогресс, демократическое развитие, экономический подъем трудно реализовывать без активного участия со стороны малых городов и районных центров [1].

В демократических странах существует широкая сеть взаимодействия городов, групп со-

трудничества, которые в большей или меньшей степени принимают участие в управлении городами. Опыт демократических государств мира свидетельствует, что именно взаимодействие малых территорий позволяет добиться большей эффективности во многих сферах общественной жизни – от социальной политики до сферы государственного управления [2].

В условиях экономической свободы и поиска форм взаимодействия, подходящих для решения проблем всех субъектов, расположенных на территории, сетевое взаимодействие является наиболее эффективным, так как позволяет гибко учитывать интересы всех партнеров [3-4].

Постановка задачи. Основной задачей исследования является оценка возможности сотрудничества малых городов, районных центров и органов местного самоуправления на примере отдельных территориальных образований России в контексте формирования и укрепления структур сетевого взаимодействия, поддержки их территориального развития.

Методы исследования. Применение системного и функционального подходов, а также методов моделирования позволяют в совокупности оценить комплекс направлений развития форм сетевого взаимодействия малых городов и районных центров. На основании данных методов оценен взаимовыгодный эффект, выявлены наиболее значимые последствия для каждого участника сети.

Взаимодействие между малыми городами и районными центрами должно осуществляться самоуправляющимися сетевыми структурами, обеспечивающими защиту и достижение общих интересов соседствующих территорий [5].

Особое внимание исследователи уделяют вопросам взаимодействия соседних районов и городов в области предпринимательства и предлагают включить в схему взаимодействия помимо муниципальных органов власти еще и предпринимательские структуры [6, 8-9]. Включение предпринимательских и социальных сообществ в сеть взаимодействия малых городов представляется весьма полезным, так как позволяет учесть интересы бизнеса и общества в развитии малых городов в контексте их сетевого взаимодействия с районными центрами.

Инициатором построения взаимодействия между городами и прочими структурами территориального управления должно выступать государство. В числе путей улучшения ситуации при формировании сетевых форм взаимодействия малых городов и районных центров особое значение играет самоограничение государства в отношениях с муниципалитетами, признание автономности малых городов во многих функциях [7, 11]. Важную роль в этом контексте играет идея совещательной демократии, что предполагает значительную активность населения малых городов, объединенных в различные организации и ассоциации, с целью контроля за муниципальной властью, осуществления местного самоуправления и сотрудничества с другими территориальными образованиями [7, с. 304].

В условиях географического расширения границ сетевого взаимодействия особое внимание нужно уделить аспектам пространственной организации сетевого взаимодействия предпринимательских структур [10, с.159]. Хотя данная точка зрения может оказаться правильной для целого ряда регионов и территориальных образований, всё же инициатива формирования сетевого сотрудничества между малыми городами должна исходить от органов муниципального управления, а предпринимательские структуры должны выступать партнерами органов власти по развитию сетевого взаимодействия. Органы управления должны носить первичную роль в процессе формирования взаимодействия, что ведет к более четким и системным действиям [12 - 13].

Исследователи Семибратова Л.М. и Широкова Н.В. рассматривают взаимодействие малых городов с позиции соорганизации ресурсов и их взаимовыгодного использования; выделяют формы организации взаимодействия малых городов, отмечая при этом именно сетевое взаимодействие, как наиболее эффективное и взаимовыгодное [16]. Учеными также проведена подготовка и внедрение сетевой модели взаимодействия малых городов. Таким образом, необходимо обратить особое внимание именно на сетевую форму взаимодействия малых городов и районных центров, что может обеспечить наибольшую пользу для всех участников такой сетевой модели.

При этом любое взаимодействие малых городов с другими территориальными или муниципальными структурами должно строиться с позиций приоритета данной цели и ориентироваться на улучшение условий жизни жителей малых городов. При построении сетевого взаимодействия малых городов и районных центров социальные цели являются главнейшими [17]. Однако отсутствие комплексной инновационно-инвестиционной программы развития страны, которая сочетала бы в себе инновационные решения на уровнях региона, района и малого города, а также содержала бы в себе максимально эффективное решение экономических и социальных проблем не только региона, но и городов, не позволяет осуществлять аккумуляцию всех ресурсов на всех уровнях управления и реализацию программ развития регионов и городов [17 - 18].

Многими иностранными учеными отмечается глобальное распространение и признание различных форм сетевого взаимодействия на разных уровнях управления территориями [19-21]. Город, как участник сетевого взаимодействия, освещен в работах достаточно большого числа ученых ближнего зарубежья. Города, функционируя в тесном сотрудничестве друг с другом, с местными компаниями и представителями международных организаций, базирующихся в городах, смогут прийти к взаимовыгодным результатам реализации стратегии планирования и повышению привлекательности города для частного бизнеса [2, 8, 10, 15, 20].

Данный вывод представляется верным и для российских реалий. В основе сетевого взаимодействия малых городов должна быть положена конкретная стратегия, содержащая индикаторы развития по различным направлениям взаимовыгодного для малых городов сотрудничества. Партнёрство в рамках отдельных городов и районов должно быть ориентировано на соблюдение принципа взаимовыгодных действий в общем взаимодействии [3]. Именно аспект взаимовыгодного сотрудничества должен быть основным в рамках концепции построения взаимовыгодных отношений такого уровня.

Обсуждение результатов. Рассмотрим взаимовыгодное сотрудничество в конкретных сферах экономики на уровне малых городов.

Так, во Владимирской области в настоящее время происходит формирование транспортного кластера, в создание которого вовлечены и малые города – более всего такие, как Лакинск, Собинка, Вязники, Петушки, Суздаль. Данные города расположены, в основном, вблизи трассы М-7 и активно включены в построение транспортного кластера по таким направлениям, как создание транспортной инфраструктуры, туризм, развитие деятельности дорожных и транспортных организаций, создание современных складских комплексов и т.д. Эти направления призваны устранить существующие проблемы транспортно-логистического комплекса Владимирской области в целом, а именно: низкую пропускную способность дорог – в том числе, федеральной трассы; неразвитость логистической инфраструктуры – особенно на уровне малых городов; отсутствие механизмов взаимодействия нескольких видов транспорта, что особенно очевидно для малых городов, где происходит постепенное снижение числа местных поездов и сокращение числа локальных маршрутов.

На рис.1 представлена схема взаимодействия малых городов в области построения транспортного кластера во Владимирской области.

Дальнейшее развитие транспортной отрасли Владимирской области возможно только при построении взаимовыгодного сотрудничества малых городов и районных центров, основными направлениями которого должны стать:

- увеличение экспортных и транзитных перевозок через регион путем привлечения перевозчиков, с учетом применения маркетинговых и экономических инструментов, на уровне малых городов и региона в целом;
- увеличение роли транспортно-логистической отрасли в экономике малых городов и региона в целом;
- совместное участие в реализации инвестиционных проектов в транспортно-логистической области;
- сотрудничество в области подготовки логистических специалистов в учебных учрежде-

ниях областного центра для работы в малых городах;

- создание условий для развития пассажирского транспорта и туристической инфраструктуры на уровне малых городов при финансировании и поддержке региональных органов власти;
- создание комплексных программ для малых городов, направленных на развитие транспортно-логистической отрасли, согласованных с общерегиональной стратегией развития транспортного кластера.



Рис. 1. Схема создания транспортного кластера во Владимирской области через взаимодействие малых городов и региональных органов власти [составлено авторами]

Fig. 1. The scheme is the creation of a transport cluster in the Vladimir region through the interaction of small towns and regional authorities [compiled by the authors]

Таким образом, для дальнейшего развития транспортной отрасли Владимирской области необходимо соблюдение следующих принципов взаимовыгодного сотрудничества малых городов региональных органов власти:

- поддержка региональными органами власти развития смежных направлений взаимодействия, например, повышение уровня качества образования в области логистики и транспорта; развитие туристской отрасли и территориального маркетинга. Малые города не могут обойтись без помощи региональных властей по данным направлениям, так как не обладают необходимыми ресурсами – образовательными учреждениями высокого уровня, мощными информационным порталами и пр.;
- перенесение важных объектов транспортно-логистической инфраструктуры в малые города, что поможет снизить транспортную напряжённость в больших городах и поможет малым городам не только в области транспорта и логистики, но и позволит улучшить демографическую ситуацию в малых городах, поднимет их значимость и экономический потенциал;

- создание региональной стратегии развития транспортно-логистической отрасли на основе инициатив и программ малых городов, что позволит создать многоуровневую иерархическую программу транспортного развития региона, в реализации которой будут заинтересованы как малые города, так и крупные центры.

Соблюдение данных принципов поможет более эффективному построению транспортно-го кластера во Владимирской области и развитию малых городов региона – во всех отраслях и направлениях экономики.

В Тульской области идет активное построение взаимодействия малых городов и региональных органов власти в области образования. Так, при Министерстве образования Тульской области создан Общественный совет, куда входят представители и малых городов и поселений городского типа, как г. Белёв, г. Венёв, пгт. Куркино, пгт. Дубна и с. Волово.

Общественный совет занимается решением следующих вопросов:

- рассмотрение и утверждение планов развития образовательных организаций в регионе и выработка рекомендаций по реализации планов и проектов в работе образовательных организаций – в том числе, малых городов;
- проведение независимой оценки качества образовательных услуг, оказываемых образовательными организациями Тульской области в малых городах и районных центрах;
- осуществление общественного контроля за деятельностью образовательных учреждений на уровне малых городов и районных центров;
- рассмотрение, утверждение и разработка планов по улучшению качества работы образовательных организаций и устранению недостатков, выявленных в ходе независимой оценки качества и др.

На основе рассмотренных основных функций Общественного совета при Министерстве образования Тульской области формируется схема взаимовыгодного сотрудничества малых городов и региональных органов власти в области образования. Следует отметить, что в Общественный совет входят, в основном, учителя, воспитатели, члены родительских комитетов и другие активисты. Выполняя свои функции в Общественном совете, они получают возможность воздействовать на развитие образования в своих городах и селах, контролировать качество образовательных услуг, вносить инициативы в образовательную сферу.

При рассмотрении сферы образования Тульской области на уровне малых городов необходимо выделить следующие проблемы:

- значительное влияние на функционирование филиалов вузов социокультурных черт микросреды конкретных малых городов и поселений;
- воздействие на спектр предоставляемых образовательных услуг уровня социально-экономического развития конкретного малого города и состояния местного рынка труда;
- спрос на определенные специальности, который формируется с учетом повседневного опыта общения с неформальными общностями конкретного малого города и популярности специальности, а не рациональным выбором будущей профессии и сферы трудовой деятельности [10, с.84].

Общая схема взаимовыгодного сотрудничества в области образования в Тульской области представлена на рис. 2.

Для дальнейшего развития сферы образования как в области в целом, так и в малых городах Тульской области на основе взаимовыгодного сотрудничества необходимо соблюдение следующих принципов:

- Модернизация образовательных учреждений и процессов в селах и малых городах с использованием ресурсов, как регионального центра, так и самих малых городов. Это ведет к развитию сферы образования в малых городах и повышению общей эффективности системы образования региона в целом;
- Формирование и дальнейшее развитие региональных программ привлечения молодых специалистов в сферу образования малых городов. Это ведет к обеспечению кадровыми ресурсами образовательных учреждений малых городов и населенных пунктов, а также к

- совершенствованию процессов распределения выпускников педагогических вузов;
- Реструктуризация институтов профессионального образования на уровне региона с ориентацией на потребности малых городов и поселений. Соблюдение данного принципа позволит улучшить эффективность профессионального образования в части соответствия рынку труда, а также улучшить обеспеченность кадрами ресурсами экономику малых городов.

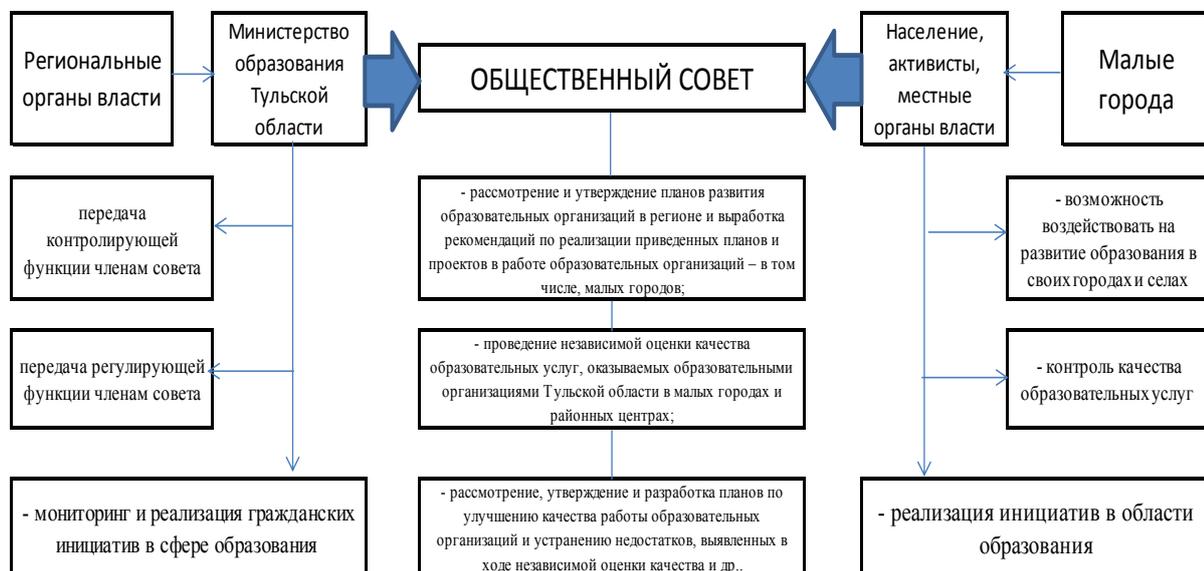


Рис. 2. Сотрудничество в сфере образования региональных органов власти и малых городов в Тульской области [составлено авторами]

Fig. 2. Cooperation in the field of education regional authorities and towns in the Tula region [compiled by the authors]

Соблюдение данных принципов позволит повысить эффективность региональной системы образования в Тульской области, создать условия для развития образования и рынка труда в малых городах. При этом необходимо учесть, что развитие образования в малых городах Тульской области должно происходить с учетом особенностей и потребностей каждого конкретного населенного пункта.

Рассмотрим взаимодействие малых городов Пермского края с районными центрами и региональными органами власти на примере сферы торговли. Данное взаимодействие осуществляется под контролем и инициативой Министерства промышленности, предпринимательства и торговли Пермского края. Основными функциями Министерства в данном направлении являются:

- координация деятельности исполнительных органов малых городов Пермского края по вопросам реализации торговой деятельности;
- содействие созданию условий для привлечения инвестиций в торговую сферу малых городов;
- согласование проектов договоров о сотрудничестве, подготовленных исполнительными органами малых городов в сфере торговли;
- обеспечение проведения мероприятий, направленных на создание положительного имиджа торгового потенциала отдельных населенных пунктов Пермского края и др.

Необходимо отметить, что сфера торговли в Пермском крае развивается согласно общероссийским тенденциям и для нее характерно преимущественное развитие сетевой торговли. Так, согласно данным органов статистики Пермского края за период 2012 – 2016 гг. удельный вес оборота розничной торговли торговых сетей в общей величине оборота розничной торговли Пермского края составил 28,4%, причем доля сетевых торговых точек в общем региональном обороте ежегодно росла [22] (рис. 3):

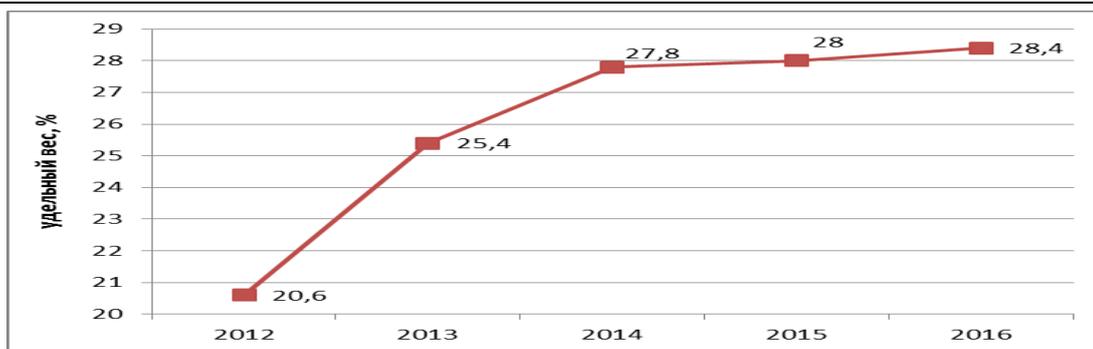


Рис. 3. Изменение доли сетевых торговых точек в общем региональном торговом обороте Пермского края [составлено авторами на основе данных ист. 22]
Fig. 3. The change in the share of network outlets in total regional trade turnover in Perm region [compiled by the authors based on data ist. 22]

Данные тенденции справедливы для таких малых городов Пермского края, как Верещагино, Гремячинск, Кизел, Оханск, Александровск, Горнозаводск и Усолье.

При этом торговые сети в малых городах, в основном, представлены продуктовыми супермаркетами. Для малых городов сетевые торговые предприятия имеют следующие преимущества:

- удовлетворение широких потребностей населения в товарах, как дешевых, так и премиум-уровня;
- оказание населению малых городов конкурентоспособных торговых услуг;
- обеспечение доступности разнообразных продуктов питания для населения малых городов.

Развитие сетевых магазинов в малых городах ведет к соответствующему снижению оборота прочих магазинов, в том числе, принадлежащих районным потребительским обществам (РайПО). Несмотря на то, что РайПО также имеют свою торговую сеть, но её конкурентоспособность значительно ниже других федеральных сетевых магазинов. Это отрицательный факт развития торговли в малых городах, так как РайПО – это целая структура с большой численностью персонала, основными фондами, высоким налоговым потенциалом (что весьма важно для формирования доходной части местного бюджета), а также налаженными связями с органами власти малых городов.

Снижение эффективности РайПО ведет к сокращению персонала, закрытию торговых точек в удаленных населенных пунктах и прочим отрицательным последствиям. При этом зачастую взаимодействие РайПО с местными органами власти осуществляется на основе личных контактов руководителей данных структур без составления программ развития взаимодействия и формирования перспективных направлений взаимного сотрудничества. Это устаревшая форма взаимодействия, не имеющая высокой эффективности в настоящее время и не приносящая особой выгоды сторонам взаимодействия.

В данной ситуации Министерство промышленности, предпринимательства и торговли Пермского края осуществляет активную поддержку именно сетевых торговых структур, так как это позволяет увеличить приток налоговых доходов в региональный бюджет, обеспечить возможность активных финансовых вложений в торговую отрасль края за счет инвестиций крупных российских сетей, что соответствует стратегии развития торговли в Пермском крае.

Действительно, сетевой розничный бизнес имеет возможность добиться больших результатов в расчёте на одну торговую точку, чем отдельно стоящий магазин, и позволяет обеспечить сосредоточение людских, технических и информационных ресурсов в одном центре, что диктуется принципом экономии [7, 14].

Таким образом, для развития сферы торговли в Пермском крае необходимо соблюдение следующих принципов и условий:

- развитие платежеспособного спроса населения малых городов;
- увеличение объемов инвестирования в сферу торговли;

- создание сетей из отдельных местных предпринимателей, занятых в сфере торговли малых городов;
 - развитие кадрового потенциала торговли;
 - развитие инфраструктурной базы существующих торговых точек малых городов;
- Соблюдение данных принципов позволит достичь следующих эффектов:
- повышение уровня жизни населения – на федеральном уровне за счет обеспечения продовольственной безопасности населения и предоставления населению конкурентоспособных торговых услуг;
 - повышение кадрового, налогового и общеэкономического потенциала Пермского края – за счет развития отрасли торговли малых городов и поселений региона, что ведет к повышению занятости специалистов в сфере торговли, увеличению налоговых поступлений в региональный бюджет за счет торговых организаций;
 - развитие торговли на уровне малых городов, что ведет к улучшению условий жизни в малых городах.

Таким образом, может быть сформирована схема взаимодействия малых городов и региональных органов власти в целях развития сферы торговли Пермского края (рис. 4):

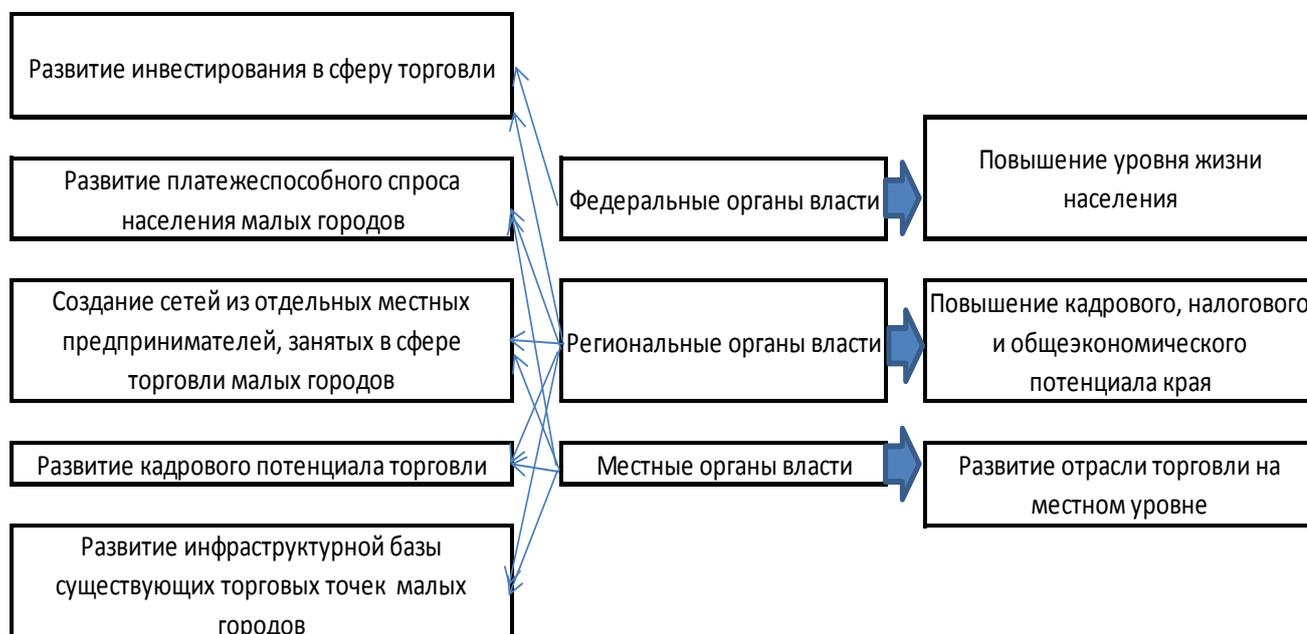


Рис. 4. Схема взаимодействия малых городов и региональных органов власти в целях развития сферы торговли Пермского края [составлено авторами]

Fig. 4. The scheme of interaction of small towns and regional authorities in the development of trade of the Perm region [compiled by the authors]

Как можно видеть из рис. 4, для эффективного развития торговли в Пермском крае необходимо тесное взаимодействие малых городов, а также районных и региональных органов власти по всем предусмотренным направлениям развития.

Важным направлением социально-экономического развития Пермского края является сельское хозяйство, при этом комплекс мер нацелен на качественно-количественные критерии роста отрасли.

Учитывая, что потенциал малых городов в развитии сельского хозяйства играет ведущую роль, необходимо задействовать функциональные каналы распределения сельскохозяйственной продукции между малыми городами и районными центрами, повышая производительность и качество продукции. Отразим направления взаимодействия малых городов и районных центров в целях развития сельского хозяйства (рис. 5).

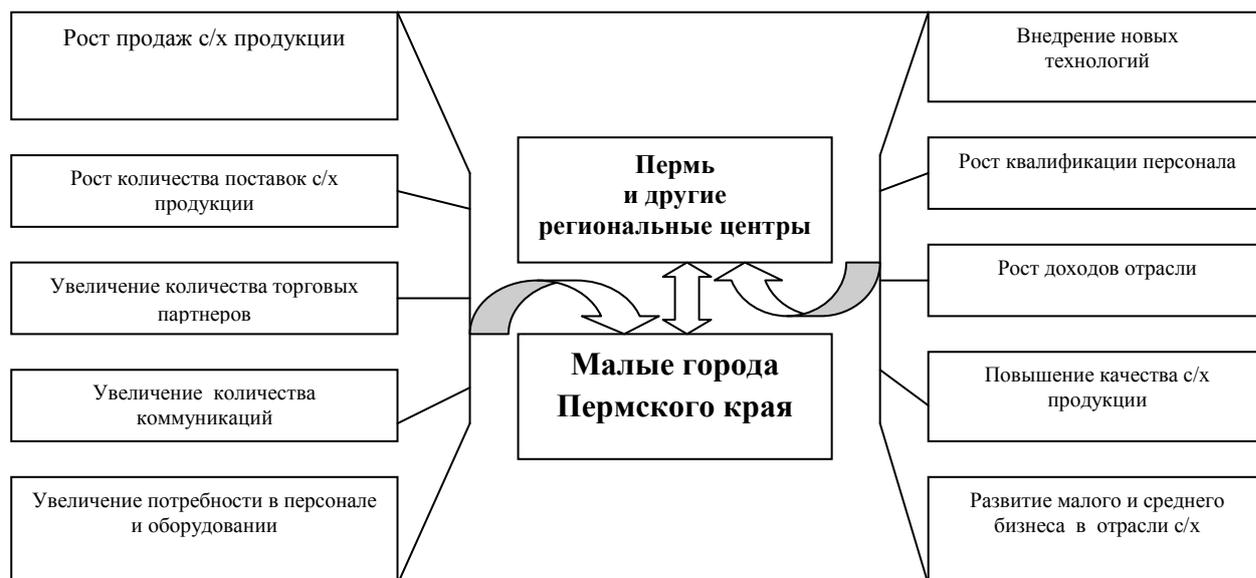


Рис. 5. Схема взаимодействия малых городов и региональных центров в целях развития сельского хозяйства Пермского края [составлено авторами]

Fig. 5. The scheme of interaction of small towns and regional authorities for development of agriculture of the Perm region [compiled by the authors]

Усиление взаимодействия в целях развития сельского хозяйства будет способствовать получению для малых городов таких преимуществ, как:

- рост объема продаж сельскохозяйственной продукции, что будет качественно влиять на расширение отрасли, привлечение в нее новых производителей, развитие малого и среднего бизнеса, а также сопутствующих отраслей, например транспорта и логистики;
- рост количества поставок, обусловленный спросом, позволит усилить транспортную составляющую, повлечет закономерное развитие логистических сетей, обеспечивая удобство поставщикам и покупателям в ритмичности поставок;
- усиление взаимодействия будет способствовать росту количества торговых партнеров, которыми могут быть как отдельные предприятия общественного питания, так и представители сетевых компаний, которые заинтересованы в диверсифицированных и качественных сельскохозяйственных продуктах;
- увеличение количества коммуникаций будет способствовать внедрению прогрессивных форм маркетинга, менеджмента и учета, требования к которым продиктованы имеющимся уровнем качественного обслуживания заказчиков, экономией времени и оптимизацией технологий;
- рост потребности в персонале и оборудовании закономерно обусловлен возросшими потребностями производства и положительно отразится на занятости и росте дохода населения.

Для региональных центров основной эффект будет заключаться в насыщении продовольственного рынка, в более полном удовлетворении местного населения в качественных и разнообразных продуктах питания, в развитии технологий, в росте экономических показателей отрасли, что в целом благоприятно отразится на социально-экономическом развитии Пермского края.

Другим важным направлением взаимодействия является туристско-рекреационная специализация малых городов Пермского края, которые обладают потенциалом для развития лечебно-оздоровительного туризма и санаторно-курортного комплекса, экологического, аграрного, сельского туризма.

Представим возможное взаимодействие схематично на рис. 6.

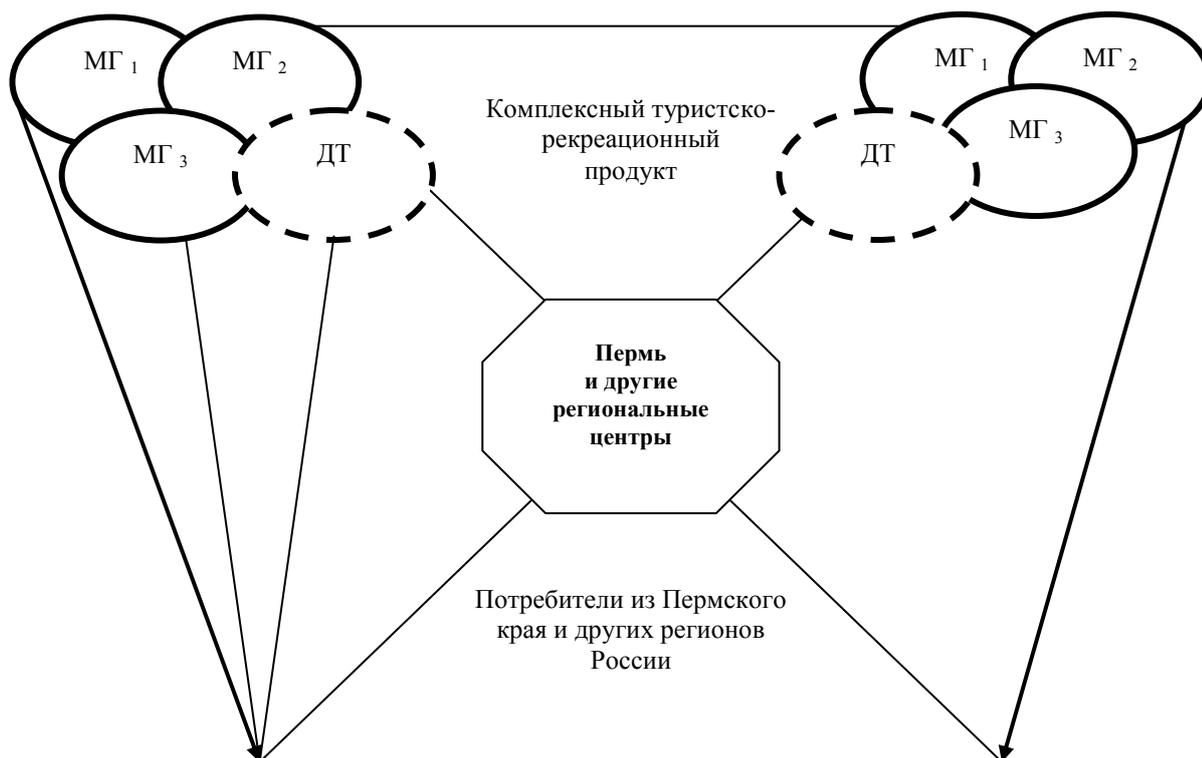


Рис. 6. Схема взаимодействия малых городов и региональных центров в целях развития туристско-рекреационной деятельности Пермского края [составлено авторами]
Fig. 6. The scheme of interaction of small towns and regional centres for development of tourist and recreational activities in Perm region [compiled by the authors]

Взаимовыгодность развития туристско-рекреационной сферы для малых городов и районных центров обеспечит:

- вовлеченность депрессивных территорий (ДТ) в сетевое взаимодействие при создании и реализации комплексного туристско-рекреационного продукта с малыми городами различной специализации (МГ₁, МГ₂, МГ₃) и их участие в распределении дохода;
- рост туристских потоков на территории малых городов и районных центров, что позволит повысить доходность не только предприятий туристско-рекреационной сферы, но и комплекса отраслей, взаимосвязанных с ними;
- развитие имиджа территории Пермского края как туристско-рекреационного, а не только промышленного производства;
- улучшение социально-экономических показателей за счет роста доходности отраслей, роста занятости и сокращения оттока населения;
- оптимизация использования курортно-рекреационного потенциала малых городов в целях роста доходности отраслей, повышения качества жизни населения, привлечения платежеспособного спроса в регион, в том числе в форме инвестиций.

На основе проведенного исследования были выявлены направления взаимовыгодного сетевого взаимодействия малых городов и районных центров.

К основным направлениям относятся: образование, торговля и общественное питание, сельское хозяйство, туристско-рекреационная деятельность.

К обеспечивающим направлениям: транспорт и логистика, управление, нормативно-правовая деятельность.

С учетом сформированных направлений представим эффект от сетевого взаимодействия для малых городов и районных центров (табл. 1).

Таблица 1. Эффект от взаимовыгодного сетевого взаимодействия малых городов и районных центров
Table 1. The effect of a mutually beneficial network interaction of small towns and district centers

Направления взаимодействия	Малые города	Районные центры
Основные направления		
Образование	Повышение доли квалифицированных кадров в общей структуре, привлечение молодежи, трудоустройство, развитие ВУЗов с учетом потребностей местного населения и специализации региона	Приобретение новых специальностей, усиление специализации, важной для региона, обмен опытом и навыками, получение специалистов, востребованных в регионе
Торговля и общественное питание	Развитие инфраструктуры торговли и общественного питания, рост занятости, обеспечение местного населения услугами и продукцией региональных предприятий	Получение качественных услуг в общественном питании, расширение ассортимента, возможность рынка сбыта для предприятий районных центров
Сельское хозяйство	Развитие производства, рост доходов, инфраструктуры, расширение региональных связей	Приобретение качественной продукции, рост социально-экономических показателей отрасли края
Туристско-рекреационная деятельность	Развитие сети предприятий, приток платежеспособных туристов из края и других регионов РФ, повышение известности территории в качестве поставщика диверсифицированной продукции и услуг	Обеспечение населения качественными туристско-рекреационными услугами, наполнение регионального бюджета, рост налоговых поступлений, развитие социально-экономического пространства субъекта РФ
Вспомогательные направления		
Транспорт и логистика	Обеспечение эффективного взаимодействия рыночных и социальных агентов, доступ к местным продуктам и услугам	Реализация социально-экономического партнерства в различных областях
Управление	Реализация программ по развитию и созданию необходимых условий для малого и среднего бизнеса для работы, обеспечение населения качественными услугами и продуктами	Взаимодействие регионального и муниципального планирования, контроль и мониторинг показателей реализации планов
Нормативно-правовая деятельность	Создание благоприятного инвестиционного климата	Повышение экономического рейтинга региона, обеспечение привлекательности для отечественных и зарубежных инвесторов

Представленные взаимные результаты свидетельствуют о выгодном сетевом взаимодействии на уровне малых городов и развитых районных центров.

Вывод. Методология анализа возможности построения сетевого взаимодействия в рамках региона включает определение нескольких характеристик эффективного сетевого взаимодействия и наличия возможностей у городов вхождения в такую сеть. В основу методологии положена оценка доступа городов к коммутированию.

К основным характеристикам эффективного сетевого взаимодействия можно отнести:

1. Наличие физической связи.

Физические связи означают прямое подключение городов через грузовой и пассажирский трафик. В частности, основываясь на данных о пассажиропотоках автомобильных дорог между административными единицами уровня региона возможно построение транспортно-логистических сетей на основе качественных и количественных показателей. Транспортное со-

общение представляет собой важную характеристику уровня пространственной зависимости и преодоления проблемы больших расстояний между населенными пунктами региона, что имеет особое значение при организации пространственных связей в региональном масштабе.

Чтобы сформировать сетевой город в конкретном регионе важно знать критическое значение всех транспортных потоков во всех соседних городах региона. Также нужно изучить типологию сетевых городов с узловым расположением (центральная позиция) и полицентризмом в регионе; оценить порог объема перевозок грузов, пассажиров и мигрантов, необходимых для формирования городских сетей в регионе.

Региональные сети, основанные на транспортных потоках, демонстрируют сильную пространственную зависимость и ярко выраженные иерархические характеристики, которые в значительной степени влияют на устойчивое развитие региона в целом.

2. Наличие функциональной связи.

Функциональные связи относятся к обмену другими ресурсами через функциональное разделение городов на основе сложившейся и перспективной специализации. Правильно организованное функциональное взаимодействие внутри городской сети заменяет физическую близость, обеспечивает положительное влияние региональной городской сети на национальное экономическое развитие в целом, в том числе и в отношении связи транспортных узлов, сетей связи и расширения взаимодействия между людьми.

3. Уровень включенности в сетевое взаимодействие. Для построения действующей региональной городской сети необходимо наличие связи у узла не менее чем с 3 другими городами. При этом такими узлами не обязательно должны выступать крупные города региона. Такими узлами могут быть малые и средние города, обладающие свойствами привлекательности в силу функционального (промышленность, сельское хозяйство, отдых, наука и пр.) или физического свойства (транспортные узлы на магистралях).

Сетевой анализ для уровня включенности основан на результатах анализа узловой структуры, которую можно измерить по количеству и объему различных связей между городами. При этом включенность тесно связана с существующей транспортной инфраструктурой в регионе, что можно оценить через объем и потоки пассажирских и грузовых перевозок. Роль городов в рамках этой методики была учтена для общего объема перевозок между городами, но не учитывает внутренние транспортные потоки в самих городах (внутри городов).

Взаимовыгодное сотрудничество заключается в повышении социально-экономических показателей отраслей экономики и региона в целом; в росте занятости и сокращении оттока населения; в более эффективном использовании имеющихся ресурсов за счет привлечения платежеспособного спроса, усиления диверсификации деятельности на основе создания новых продуктов и услуг; вовлечения в сетевое взаимодействие депрессивных территорий.

Библиографический список:

1. Большев О.Н. Пространственное развитие сетевых структур: методика отбора городов для построения сети взаимодействия // Вестник Балтийского федерального университета им. и. канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2013. №2. с. 156 – 166.
2. Бутко М.П. Перспективы развития взаимодействия и поддержки малого бизнеса в муниципальных образованиях Украины // Актуальные вопросы развития субъектов малого и среднего предпринимательства: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. 2014. с. 50-55.
3. Василевская Е.Г. Особенности организации использования ресурсов в системе территориального развития малого города (на примере г. Тары) // Вестник Государственного университета Астаны. 2015. № 2 (18). С. 28-33.
4. Данилова М.В. Оптимизация деятельности муниципальной (районной) методической службы на основе сетевого взаимодействия // Проблемы и перспективы муниципального управления. 2015, №2. С. 102 – 105.
5. Ерофеева Н.Ю. От интеграции содержания к сетевому взаимодействию // Международное сотрудничество: интеграция образовательных пространств. Материалы III международной научно-практической конференции. 2016. С. 219-223.
6. Кузнецов С.В. Механизмы координации при сетевом и межсетевом взаимодействии // Вестник Московско-

- го университета МВД России. 2014. № 7. С. 35-38.
7. Кутовой С.И. Взаимодействие городов как механизм развития регионального экономического пространства // Бизнес в законе. 2013. №6. С. 302-306
8. Лендьял М. Государственно-частное партнерство на примере взаимодействия администрации и субъектов малого и среднего бизнеса // *Juvenis scientia*. 2016. № 2. С. 120-122.
9. Лобанова А.С. Малые города Дальневосточного края в социально-экономическом развитии территорий // Вестник Дальневосточного государственного экономического университета. 2016. № 5. с. 14-20.
10. Мишина Н.А., Орловский А.П. Правовые основы взаимодействия мегаполисов и малых городов // *Инновационные технологии в управлении: сборник научных статей*. Киев, 2014. с. 81-86.
11. Оборин М.С., Пахалов А.М., Шерешева М.Ю. Эффективность стратегического планирования развития малых городов на основе сетевого механизма координации // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. № 4, 2017. С. 100-117.
12. Оборин М.С., Шерешева М.Ю., Пахалов А.М. Институциональная среда как фактор формирования инвестиционного климата малых городов России // *Ars Administrandi (Искусство управления)*. Том 9, № 3, 2017. С. 370-394.
13. Оборин М.С., Шерешева М.Ю., Иванов Н.А. Обоснование стратегических ориентиров социально-экономического развития малых городов России // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика» = Perm University Herald. Economy. Том 12. № 3, 2017. С. 437-452.
14. Осипова А.О. Сетевой проект как вид сотрудничества // *Молодёжь в меняющемся мире: вызовы современности: материалы VII международной научно-практической конференции*. Издательство: Уральский государственный педагогический университет (Екатеринбург), 2017. с. 94 – 99.
15. Савченко В.Ф. Стратегии развития малых городов, основанные на привлечении творческого и инновационного потенциала. – Киев: Наука, образование и экспериментальное проектирование тезисы докладов международной научно-практической конференции, профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов Киевского национального университета. 2015. С. 327-338.
16. Семибратова Л.М., Широкова Н.В. Сетевое взаимодействие в условиях малого города // *Народное образование*. – 2014, №6. – с. 64 – 68.
17. Социальное взаимодействие в современных условиях: различные аспекты исследования: коллективная монография под ред. Кандауровой А.В. Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, кафедра социальной педагогики и социальной работы. 2017. 426 с.
18. Усова М.В., Фокина Т.П. Современные социальные практики управления имиджем города в сетевом обществе // Вестник Поволжского Института Управления. 2014, №4. С.78 – 83.
19. Vancolen A. Urban development, and the interaction of urban structures. Brussels: Onbox, 2014. 340 p.
20. Verheij Fritts. Long-term vision and goals of the interaction between urban structures. London, 2015. 286 p.
21. Richard Richie. Factors of territorial development. Washington, Publish Unit, 2015. 342 p.
22. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики – Режим доступа <http://gks.ru/> (дата обращения: 06.11.2017).

References:

1. Bolychev O.N. Prostranstvennoe razvitie setevykh struktur: metodika otbora gorodov dlya postroeniya seti vzaimodeistviya. Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: estestvennye i meditsinskie nauki. 2013;2:156 – 166. [Bolychev O.N. Spatial development of network structures: a methodology for selecting cities for building an interaction network. The Vestnik of the Immanuel Kant Baltic Federal University. Natural and medical sciences. 2013;2:156 – 166. (In Russ.)]
2. Butko M.P. Perspektivy razvitiya vzaimodeistviya i podderzhki malogo biznesa v munitsipal'nykh obrazovaniyakh Ukrainy. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy razvitiya sub"ektiv malogo i srednego predprinimatel'stva». 2014. S. 50-55. [Butko M.P. Prospects for development of interaction and support of small business in municipal formations of Ukraine. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific and practical conference «Relevant issues of development of small and medium-sized businesses». 2014. P. 50-55. (In Russ.)]
3. Vasilevskaya E.G. Osobennosti organizatsii ispol'zovaniya resursov v sisteme territorial'nogo razvitiya malogo goroda (na primere g. Tary). Vestnik Gosudarstvennogo universiteta Astany. 2015;2(18):28-33. [Vasilevskaya E.G. Features of the organisation of the use of resources in the system of territorial development of a small town (on the example of the town of Tara). Bulletin of the State University of Astana. 2015;2(18):28-33. (In Russ.)]
4. Danilova M.V. Optimizatsiya deyatelnosti munitsipal'noi (raionnoi) metodicheskoi sluzhby na osnove setevogo vzaimodeistviya. Problemy i perspektivy munitsipal'nogo upravleniya. 2015;2:102 – 105. [Danilova M.V. Optimisation of the municipal (district) methodical service on the basis of network interaction. Problems and prospects of municipal management. 2015;2:102 – 105. (In Russ.)]
5. Erofeeva N.Yu. Ot integratsii sodержaniya k setevomu vzaimodeistviyu. Materialy III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Mezhdunarodnoe sotrudnichestvo: integratsiya obrazovatel'nykh prostranstv». 2016. S. 219-223. [Erofeeva N.Yu. From the integration of content to network interaction. Materials of the III International Scientific and Practical Conference "International Cooperation: Integration of Educational Spaces". 2016. P. 219-

223. (In Russ.)]
6. Kuznetsov S.V. Mekhanizmy koordinatsii pri setevom i mezhsetevom vzaimodeistvii. Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii. 2014;7:35-38. [Kuznetsov S.V. Coordination mechanisms for network and internetwork interaction. Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii. 2014;7:35-38. (In Russ.)]
7. Kutovoi S.I. Vzaimodeistvie gorodov kak mekhanizm razvitiya regional'nogo ekonomicheskogo prostranstva. Biznes v zakone. 2013;6:302-306. [Kutovoi S.I. Interaction of cities as a mechanism for the development of regional economic space. Business in law. 2013;6:302-306. (In Russ.)]
8. Lend'el M. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo na primere vzaimodeistviya administratsii i sub"ektov malogo i srednego biznesa. Juvenis scientia. 2016; 2:120-122. [Lend'el M. Public-private partnership on the example of interaction between administration and subjects of small and medium-sized businesses. Juvenis scientia. 2016; 2:120-122. (In Russ.)]
9. Lobanova A.S. Malye goroda Dal'nevostonogo kraya v sotsial'no-ekonomicheskom razvitii territorii. Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. 2016;5:14-20. [Lobanova A.S. Small towns of the Far East Territory in the socio-economic development of territories. Bulletin of the Far Eastern State University of Economics. 2016;5:14-20. (In Russ.)]
10. Mishina N.A., Orlovskii A.P. Pravovye osnovy vzaimodeistviya megapolisov i malykh gorodov. Sbornik nauchnykh statei «Innovatsionnye tekhnologii v upravlenii». Kiev; 2014. S. 81-86. [Mishina N.A., Orlovskii A.P. Legal basis for interaction between megacities and small towns. Collection of scientific articles «Innovative technologies in management». Kiev; 2014. P. 81-86. (In Russ.)]
11. Oborin M.S., Pakhalov A.M., Sheresheva M.Yu. Effektivnost' strategicheskogo planirovaniya razvitiya malykh gorodov na osnove setevogo mekhanizma koordinatsii. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika. 2017;4:100-117. [Oborin M.S., Pakhalov A.M., Sheresheva M.Yu. Effectiveness of strategic planning for the development of small towns on the basis of a network coordination mechanism. Moscow University Economics Bulletin. Series 6: Economics. 2017;4:100-117. (In Russ.)]
12. Oborin M.S., Sheresheva M.Yu., Pakhalov A.M. Institutsional'naya sreda kak faktor formirovaniya investitsionnogo klimata malykh gorodov Rossii. Ars Administrandi (Iskusstvo upravleniya). 2017;9(3):370-394. [Oborin M.S., Sheresheva M.Yu., Pakhalov A.M. Institutional environment as a factor of investment climate formation in small Russian cities. Ars Administrandi (The Art of Management). 2017;9(3):370-394. (In Russ.)]
13. Oborin M.S., Sheresheva M.Yu., Ivanov N.A. Obosnovanie strategicheskikh orientirov sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya malykh gorodov Rossii. Vestnik Permskogo universiteta. Ser. «Ekonomika». 2017;12(3):437-452. [Oborin M.S., Sheresheva M.Yu., Ivanov N.A. Substantiation of strategic landmarks of social and economic development of small cities of Russia. Perm University Herald. Economy. 2017;12(3):437-452. (In Russ.)]
14. Osipova A.O. Setevoi proekt kak vid sotrudnichestva. Materialy VII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Molodezh' v menyayushchemsya mire: vyzovy sovremennosti». Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet; 2017. S. 94 – 99. [Osipova A.O. Network project as a kind of cooperation. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference «Youth in a Changing World: Challenges of the Present». Ekaterinburg: Publishing house of the Ural State Pedagogical University; 2017. P. 94 – 99. (In Russ.)]
15. Savchenko V.F. Strategii razvitiya malykh gorodov, osnovannye na privlechenii tvorcheskogo i innovatsionnogo potentsiala. Tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodykh uchenykh i studentov Kievskogo natsional'nogo universiteta «Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie». Kiev; 2015. C. 327-338. [Savchenko V.F. Strategies for the development of small towns, based on the attraction of creative and innovative potential. Abstracts of the reports of the international scientific and practical conference of the faculty, young scientists and students of the Kiev National University «Science, Education and Experimental Design». Kiev; 2015. P. 327-338. (In Russ.)]
16. Semibratova L.M., Shirokova N.V. Setevoe vzaimodeistvie v usloviyakh malogo goroda. Narodnoe obrazovanie. 2014;6:64 – 68. [Semibratova L.M., Shirokova N.V. Networking in a small city. Narodnoe obrazovanie. 2014;6:64 – 68. (In Russ.)]
17. Sotsial'noe vzaimodeistvie v sovremennykh usloviyakh: razlichnye aspekty issledovaniya: kollektivnaya monografiya pod red. Kandaurovoi A.V. Sankt-Peterburg: Rossiiskii gosudarstvennyi pedagogicheskii universitet im. A. I. Gertsena, kafedra sotsial'noi pedagogiki i sotsial'noi raboty; 2017. 426 s. [Social interaction in modern conditions: various aspects of the study: a collective monograph (ed. A.V. Kandaurov). St. Petersburg: Herzen State Pedagogical University of Russia, Department of Social Pedagogy and Social Work; 2017. 426 p. (In Russ.)]
18. Usova M.V., Fokina T.P. Sovremennye sotsial'nye praktiki upravleniya imidzhem goroda v setevom obshchestve. Vestnik Povolzhskogo Instituta Upravleniya. 2014;4:78 – 83. [Usova M.V., Fokina T.P. Modern social practices of managing the image of a city in a networked society. The Bulletin of the Volga Region Institute of Administration. 2014;4:78 – 83. (In Russ.)]
19. Vancolen A. Urban development, and the interaction of urban structures. Brussels: Onbox; 2014. 340 p.
20. Verheij F. Long-term vision and goals of the interaction between urban structures. London; 2015. 286 p.
21. Richard R. Factors of territorial development. Washington: Publisher Unit; 2015. 342 p.
22. Ofitsial'nyi sait Federal'noi sluzhby statistiki [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.gks.ru/> (data

obrashcheniya 06.11.2017). [Official website of the Federal Statistical Service [Electronic resource]. Available at: <http://www.gks.ru/> (access date 06.11.2017). (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Оборин Матвей Сергеевич – доктор экономических наук, профессор.

Шерешева Марина Юрьевна – доктор экономических наук, профессор.

Иванов Николай Александрович – аспирант, кафедра маркетинга.

Кожушкина Ирина Владимировна – аспирантка, кафедры финансов, кредита и мировой экономики.

Information about the authors:

Matvey S. Oborin – Dr. Sci. (Economics), Prof.

Marina Yu.Sheresheva - Dr. Sci. (Economics), Prof.

Nikolay A. Ivanov – Post-graduate student, Department of Marketing.

Irina V. Kozhushkina – Post-graduate student, Department of Finance, Credit and World Economy.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.09.2017.

Принята в печать 21.10. 2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.09.2017.

Accepted for publication 21.10.2017.

Для цитирования: Разаханова Ф.М. Особенности импортозамещения строительных материалов на рынке строительной продукции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (4):223-233. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-223-233

For citation: Razakhanova F.M. Issues concerning import substitution of building materials in the construction market. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(4): 223-233. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-223-233

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 69.003

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-223-233

ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЫНКЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Разаханова Ф.М.

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия
e-mail: foty776@mail.ru

Резюме: *Цель.* Цель исследования состоит в выявлении особенностей организации процессов импортозамещения строительных материалов на отраслевом рынке и разработке на этой основе программных действий, обеспечивающих повышение конкурентоспособности отечественных производителей на отраслевом рынке. **Метод.** В процессе исследования были использованы методы логического, статистического и сравнительного анализа, методы экспертных оценок. **Результат.** Обосновано, что переходу на импортозамещение способствует удорожание стройматериалов, в связи с изменением уровня стоимости иностранных валют и нестабильной ситуацией во внешнеэкономических отношениях. Доказано, что государство в сфере стройматериалов выступает не только регулятором, определяющим стратегические приоритеты отрасли, но и заказчиком современных технологий. Предлагается создание реестра инновационной продукции в области строительных материалов на рынке строительной продукции. Реализация данной программы позволит связать в единую системную матрицу все элементы нормирования и технического регулирования на рынке строительной продукции. Обоснована необходимость проведения планомерной политики импортозамещения строительных материалов на рынке строительной продукции. **Вывод.** В условиях политики импортозамещения повышение уровня конкурентоспособности строительных материалов предусматривает расширение номенклатуры строительных материалов и повышение доли производства отечественного инновационного товара. Адаптация нормативно-правовой базы и норм технического регулирования для производства отечественных строительных материалов и технологий будет способствовать продвижению инновационной продукции на рынке строительной продукции. Ввиду реализации стратегии по внедрению инновационных технологий в строительное производство прогнозируется эффективная реализация программы импортозамещения в строительстве, которая обеспечит создание дополнительных рабочих мест, появление новых компаний и предприятий, а также благоприятные условия для отечественных производителей.

Ключевые слова: строительный рынок, строительные материалы, импортозамещение

ECONOMIC SCIENCE

ISSUES CONCERNING IMPORT SUBSTITUTION OF BUILDING MATERIALS IN THE CONSTRUCTION MARKET

Fatima M. Razakhanova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: foty776@mail.ru

Abstract. Objectives The purpose of the study is to identify the specifics of the organisation of import substitution of building materials in the sectoral market and the development on this basis of programme actions that ensure the competitiveness of domestic producers in the sectoral market. **Methods** During the research process, logical, statistical and comparative analysis approaches were used alongside expert evaluation. **Results** It is demonstrated that the transition to import substitution is promoted by price rises of building materials due to changes in foreign currency exchange rates and the unstable situation in foreign trade relations. It is shown that, in addition to the present state of the building materials market, demand for modern technologies constitutes an additional factor determining the strategic priorities of the industry. It is proposed to create a register of innovative products in the field of building materials in the construction product market. The implementation of this programme will allow all the standardisation and technical regulation elements of the construction product market to be linked into a single system matrix. The necessity of implementing the planned policy of import substitution of construction materials in the construction product market is substantiated. **Conclusion** In the context of the import substitution policy, the increase in the competitiveness of building materials provides for the expansion of the range of construction materials and an increase in the proportion of innovative goods. Adaptation of the regulatory and legal framework and norms of technical regulation for the production and use of domestic building materials and technologies will favour the promotion of innovative products in the construction product market. In view of the implementation of the strategy for the introduction of innovative technologies in the construction industry, a positive implementation of the import substitution programme in construction is expected, which will create additional jobs and lead to the emergence of new companies and enterprises under increasingly favourable conditions for domestic producers.

Keywords: construction market, building materials, import substitution

Введение. Импортзамещение является одним из важнейших инструментов экономической политики государства в условиях нестабильного внутреннего рынка.

Экономическая сущность импортзамещения состоит в уменьшении объемов импорта страны или прекращении ввоза на территорию страны конкретных видов товара, удовлетворяя спрос на них за счет производства аналогичных конкурентоспособных отечественных товаров.

В условиях продолжающихся санкционных мер решение комплекса проблем по обеспечению импортзамещения приобретает особую актуальность.

В первую очередь необходимость импортзамещения связывают с решением одной из ключевых задач экономики России — ее диверсификацией.

Постановка задачи. Сегодня настоятельно требуется обоснованный выбор и применение наиболее эффективных мер по замещению импорта в различных сферах отечественного производства, в том числе и в строительстве.

С учетом этого, цель исследования состоит в выявлении особенностей организации процессов импортзамещения строительных материалов на отраслевом рынке и разработке на этой основе программных действий, обеспечивающих повышение конкурентоспособности отечественных производителей на рынке строительных материалов.

Методы исследования. Задача по преодолению критической зависимости от зарубежных технологий и промышленной продукции была поставлена еще в 2014 году в послании Президента РФ Федеральному Собранию. В соответствии с Посланием была разработана стратегия развития промышленности строительных материалов в РФ.

В государственной программе «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», в числе главных задач установлено значительное снижение к 2020 году доли импорта продукции, в том числе используемой отечественными производителями, с уровня 70-90 % до уровня 50-60%.

В июле 2015 года вступил в силу закон «О промышленной политике в Российской Федерации», который содержит меры поддержки высокотехнологичных производств в строительстве [1]. Причем, инвестиции в импортозамещающие производства будут осуществлены за счет внедрения механизма специального инвестиционного контракта, а также фонда поддержки промышленности, выделяющего средства на модернизацию существующих предприятий по ставкам – до 5% в год.

Предусмотрено финансирование проектов импортозамещения в форме субсидирования и софинансирования исследований, а также предоставления грантов и преференций при государственных закупках. Реализация данных мероприятий, безусловно, будет стимулировать производство отечественных строительных материалов и конструкций.

В соответствии со Стратегией развития промышленности строительных материалов к 2030 году экспорт строительных материалов должен составить 15 % от общего объема производства (3,8 % в 2015 г.), а доля импорта снизится с 3,8 до 1,5 % [2 -5].

Годовой объем производства основных стройматериалов должен вырасти в 1,5-2 раза. Производство отечественного цемента и кирпича планируется увеличить более чем на 50%, производство теплоизоляционных материалов – более чем на 73%, производство нерудных материалов – более чем в два раза [2].

По отдельным видам строительной продукции планируется максимальное повышение уровня обеспеченности строительной отрасли материалами и конструкциями отечественного производства (табл. 1).

Таблица 1. Уровень обеспеченности отрасли материалами отечественного производства

Table 1. The level of supply of the industry with materials of domestic production

Цемент, бетон, растворы строительные	До 100%
Строительное стекло и изделия	До 90%
Металлоконструкции строительные	До 90%
Прокат, трубы, профили из металлов	До 90%
Материалы нерудные строительные	До 90%
Железобетонные изделия сборные	До 98%

Государственная поддержка строительной отрасли способствовала ее динамичному развитию, и к маю 2016 года уже около 200 российских предприятий стали производить стройматериалы, по качеству не уступающие импортируемым ранее аналогам [3].

Следует обратить внимание, что необходимость выбора стратегии импортозамещения вызвана, в том числе и значительным повышением цен на стройматериалы, в связи с изменением курсовой разницы валют и нестабильной ситуацией во внешнеторговых отношениях.

Тенденция к росту цен начала проявляться в 2014 г., но значительный подъем цен был отмечен в 2015-2016 гг. (табл. 2) [2].

Таблица 2. Средние цены на приобретенные строительными организациями основные материалы, детали и конструкции
Table 2. Average prices for basic materials, parts and structures purchased by construction organizations

Наименование продукции	2014г., (декабрь, руб.)	2015г. (декабрь, руб.)	2016г. (декабрь, руб.)
Арматура периодического профиля класса АIII	27 603,75	28 002,69	33 557,98
Бетон, готовый для заливки (товарный бетон), куб.м	4 201,15	4 247,04	4 100,21
Битумы, т	16 313,3	14 316,55	13 604,56
Гравий, за куб.м	950,49	877,65	941,52
Кабели, км	32 661,33	39 991,37	37 329,01
Кирпич керамический неогнеупорный строительный, тыс.усл.кирп.	10 139,74	9 700,84	10 207,49
Кирпич силикатный, тыс.усл.кирп.	7 605,92	7 482,06	7 889,24
Краски, т	53 569,22	56 685,69	67 793,27
Линолеум, кв.м	317,02	326,35	346,59
Провода, км	8 478,99	11 603,5	19 382,24
Растворы строительные, куб. м	3 443,92	3 364,89	3 583
Рубероид, кв.м	32,28	27,63	38,01
Сваи железобетонные, за куб.м	10 177,14	11 301,34	11 416,43
Смеси и изделия из теплоизоляционных и звукоизоляционных материалов, не включенные в другие группировки, куб.м	3 975,9	4 672,34	3 624,86
Смесь песчано-гравийная, за куб.м	495,65	564,73	507,01
Стекло листовое литое и прокатное профилированное, кв.м	257,86	228,99	264,29

В соответствии с планом мероприятий по импортозамещению [6], предусмотрено к 2020 году существенно сократить долю импортируемого высокопрозрачного стекла с повышенной прочностью со 100% до 0%, керамических санитарно-строительных изделий премиального сегмента с 43% до 9%, жестких, слабогорючих или негорючих теплоизоляционных строительных материалов – с 81% до 25% (табл.3)

Для реализации поставленных целей в России имеются исторически сложившиеся предпосылки и переход к полному импортозамещению строительных материалов по таким видам, как цемент, бетон, кирпич, арматура, вполне реален в установленные сроки [7].

В тоже время проблематичен переход к импортозамещению оборудования, входящего в системы вентиляции, кондиционирования, водо –и теплоподачи, водоочистки, поскольку доля импорта при их производстве на территории России может сохраниться пропорционально увеличению высокотехнологичных импортных комплектующих. Аналогичная ситуация складывается на рынке строительной продукции с отделочными материалами [8-10] .

Таблица 3. План мероприятий по импортозамещению строительных материалов и конструкций до 2020 года [6]

Table 3. Plan of measures for import substitution of building materials and structures to 2020 [6]

№	Строительные материалы и конструкции	Доля импорта, %	
		в 2015 году	к 2020 году
1	Стекло высокопрозрачное с повышенной прочностью	100	0
2	Быстротвердеющие составы на цементной основе и анкерочные составы на цементной и полимерной основе	69	51
3	Плиты и плитки керамические премиального сегмента	43	25
4	Керамические санитарно-строительные изделия премиального сегмента	43	9
5	Гипсовые вяжущие (гипс формовочный)	51	46
6	Жесткие, слабогорючие или негорючие теплоизоляционные строительные материалы	81	25

По данным Росстат за период 2010-2015 гг. доля импорта на строительном рынке лаков, красок, керамической плитки, сантехники, упала в два раза. В целом доля импорта основных строительных материалов, сократилась примерно в 5 раз [3].

Отечественное производство вытеснило импорт лесоматериалов необработанных, раковин, умывальников и прочих изделий из керамики; кирпичей строительных (табл. 4) [3].

Таблица 4. Импорт отдельных видов товаров и продукции для строительной деятельности

Table 4. Import of certain types of goods and products for construction activities

Виды продукции	2010	2013	2014	2015
Галька, гравий, щебень или дробленый камень, тыс. т	18087	26073	25821	13131
Портландцемент, цемент и прочий, тыс. т	1765	4912	5056	2985
Лесоматериалы необработанные, тыс. м ³	20,3	38,2	12,8	0,1
Окна, балконные двери и их рамы, тыс. т	7,8	13,2	6,2	5,0
Двери и их рамы и пороги, тыс. т	15,3	22,0	21,8	16,4
Панели напольные собранные (паркет щитовой), тыс. м ²	3363	3847	4060	2979
Линолеум, тыс. м ²	2636	1307	585	321
Изделия из асфальта и др. в рулонах, тыс. т	4,0	4,8	4,9	2,2
Сборные строительные блоки, тыс. т	12,6	47,9	74,2	50,1
Изделия из асбоцемента, цемента, содержащие асбест, тыс. т	24,7	8,4	8,5	9,6
Кирпичи строительные, млн. шт.	303	1047	1061	651
Черепица из керамики, млн. шт.	7,0	9,5	9,0	7,9
Плиты для мощения, плитки облицовочные и прочие из керамики, млн. м ²	34,6	43,5	45,6	45,2
Раковины, умывальники, ванны, унитазы и прочие из керамики, млн. шт.	2,7	4,4	53,4	2,2
Прочие изделия из прессованного или литого стекла, тыс. т	3,1	4,4	5,9	3,0
Радиаторы для центрального отопления, тыс. т	75,1	97,7	96,2	84,8

Значительно сократился импорт отдельных видов строительных машин и оборудования (табл. 5). В 2015 году по сравнению с 2014 годом почти в 4 раза сократился импорт бетононасосов, в 4,5 раза – импорт кранов башенных, в 3 раза – строительной дорожной техники [3].

Таблица 5. Импорт отдельных видов строительных машин и оборудования
Table 5. Import of certain types of construction machinery and equipment

Наименования	2010	2013	2014	2015
Бетононасосы, шт.	451	2242	793	222
Краны башенные, шт.	101	770	644	143
Автопогрузчики, тыс. шт.	22,7	38,5	34,8	18,3
Бульдозеры, грейдеры, планировщики, скреперы, механические лопаты, экскаваторы, одноковшовые погрузчики, трамбовочные машины и дорожные катки, тыс. шт.	16,0	41,7	27,9	8,2
Бетономешалки или растворосмесители, тыс. шт.	158	434	387	174

2016 году по сравнению с 2013 годом в результате применения политики импортозамещения импорт тротуарного клинкерного кирпича снизился на 46% (с 28 млн. тонн до 13 млн. тонн) [11].

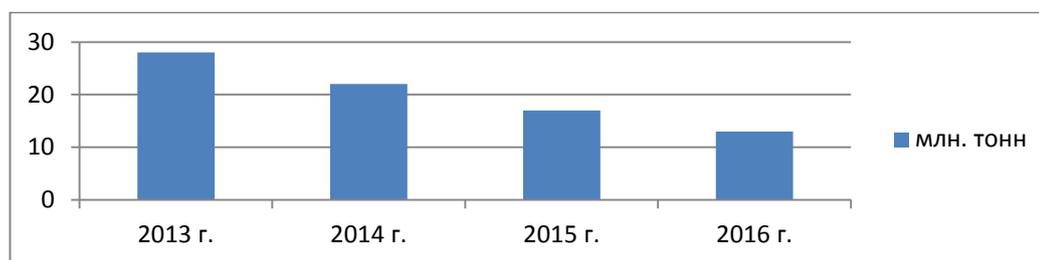


Рис.1. Импорт тротуарного клинкерного кирпича в РФ
Fig. 1. Import of paving clinker bricks in Russia

Однако в первой половине 2017 года российский рынок строительных материалов характеризуется разнонаправленной динамикой. Так, за период с января по май 2017 года снизилось производство строительного сырья (-4,3% г/г) и базовых строительных материалов (-8%).

Особенно сильно сократился выпуск дешевого силикатного кирпича (-40,5% г/г), железобетонных изделий (-20%), цемента (-13,7%) и керамического кирпича (-13,5%), то есть материалов, применяемых при возведении стен, опор мостов и несущих конструкций.

Производство портландцемента, цемента глиноземистого, цемента шлакового и аналогичных цементов гидравлических составило 88,6% к уровню 2015 года. Снижение объема выпуска продукции наблюдалось в большинстве субъектов Российской Федерации.

В то же время растет производство тротуарной плитки (+5,4%), используемой при благоустройстве, и черепицы (+19,6), часто приобретаемой для целей ремонта, а не строительства.

Наблюдается рост выпуска листового стекла (+5%) и паркета (+1,9%).

В январе - мае 2017 года зафиксирован прирост производства отделочных материалов (+5,7%), активно используемых при ремонтных работах. Наблюдается рост объемов производства лакокрасочных материалов (+23,3% г/г) и обоев (+19,5%) [12].

Обсуждение результатов. Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод, что наиболее оптимистично обстоят дела у тех видов строительных материалов, которые еще недавно России приходилось импортировать, но теперь большинство потребностей в них обеспечивают отечественные производители.

Ключевым событием для рынка в первом полугодии 2017 года стало утверждение плана мероприятий по реализации Стратегии развития промышленности строительных материалов в России на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года [9-13].

В рамках этого документа предусмотрено пять основных направлений: создание условий, обеспечивающих развитие отрасли и внутриотраслевой конкуренции; стимулирование спроса на внутреннем рынке; управление качеством и ассортиментом стройматериалов; развитие экспортного потенциала, а также мониторинг достижения целевых индикаторов Стратегии.

Основным вектором развития отрасли является постоянное расширение спектра используемых в России стройматериалов с особым упором на инновационную продукцию. Сформировать «высокотехнологичную, конкурентоспособную, устойчивую и сбалансированную (в части спроса и предложения) промышленность строительных материалов инновационного типа» [14].

В период с 2013 по 2016 года Министерство строительства РФ выдало почти тысячу технических свидетельств на новые виды отечественных строительных материалов, в том числе 276 – в 2016 году [15]. Среди них фасадные системы, различные виды крепежа, теплоизоляционные материалы, строительные смеси и лакокрасочные материалы, композитные и другие.

Для ускорения внедрения в производство новых стройматериалов и технологий в России действует процедура подтверждения пригодности новых видов продукции, требования к которым отсутствуют в документах нормативно-технического регулирования.

Этот механизм устраняет на пути внедрения новых материалов технические и административные барьеры, возникающие в связи с сомнениями надзорных органов, проектировщиков и строителей в безопасности применения новых стройматериалов и технологий. Пригодность новой продукции подтверждается техническим свидетельством Министерства строительства Российской Федерации. Техническое свидетельство является документом, разрешающим применение в строительстве на территории Российской Федерации новой продукции при условии ее соответствия приведенным в свидетельстве требованиям.

Техническое свидетельство выдается с учетом обязательных строительных, санитарных, пожарных, промышленных, экологических требований и норм безопасности, утвержденных в соответствии с действующим законодательством.

Важно отметить, что государство в сфере стройматериалов выступает не только регулятором, определяющим стратегические приоритеты отрасли, но и заказчиком современных технологий [14-15].

В частности, была представлена инициатива: установить квоту для строительства социальных объектов (детские сады, школы, фельдшерско-акушерских пункты, участковые дома, спортивные объекты, дома для расселения жителей из ветхого и аварийного жилья) из дерева в размере 30% [16]. Данное решение позволит более эффективно использовать такой вид строительных материалов, как лесоматериалы необработанные.

Работа по расширению номенклатуры отечественных строительных материалов также требует эффективного взаимодействия разных ведомств, в связи с чем, было принято решение о создании Межведомственной комиссии по развитию инфраструктуры городов и ЖКХ, современных методов строительства, строительных материалов и строительной техники [17]. Работа этого органа направлена на объединение усилий для совместного решения задач импортозамещения, развития промышленности строительных материалов и строительных конструкций, лифтовой и крановой отраслей, а также на углубление производственной и технологической кооперации.

Предлагается создание реестра отечественной инновационной строительной продукции, учитывая то, что система квалификации стройматериалов как инновационных и система оценки их жизненного цикла, которые непосредственно связаны с системой ценообразования, в настоящее время недостаточно развита [18].

На наш взгляд, в целях совершенствования механизма технического регулирования в строительстве необходимо рассмотреть целесообразность выделения и последующей классификации обобщающих критериев инновационности отечественных строительных материалов [19-20]. Применение критериев при ценообразовании, при выборе материалов и изделий на стадии проектирования и с учетом последующих этапов жизненного цикла позволит связать в единую систему все элементы нормирования и технического регулирования [21-22].

Так как уже разрабатывается программа действий по созданию системы нотифициро-

ванных органов в строительном комплексе, обеспечивающих доверие к органам по сертификации и выполняющих задачи оценки соответствия прогрессивных технических новшеств, то создание такой системы несомненно будет иметь положительный эффект.

Адаптация нормативно-правовой базы и норм технического регулирования для производства и применения отечественных строительных материалов и технологий будет способствовать продвижению инновационной продукции на рынке строительной продукции.

Следует отметить, что при реализации стратегии импортозамещения в строительной отрасли крайне важно не допустить снижение качества строительной продукции и требований безопасности. Несмотря на то, что сейчас уделяется особое внимание развитию промышленности строительных материалов, соотношение цена/качество отечественной продукции пока не так высоко как у зарубежных аналогов, а, значит, снизить процент импорта до минимума в 2020 году весьма проблематично [23-25].

По данным Комитета Российского союза промышленников и предпринимателей (работодателей) по промышленной политике и конкурентоспособности в качестве потенциальных внешних рынков строительной отрасли Российской Федерации сегодня можно рассматривать только страны СНГ и страны, планирующие развивать атомную и гидроэнергетику, добычу и сети транспортировки нефти и газа.

Проведем SWOT- анализ факторов и оценим конкурентоспособность строительных материалов (табл.6)

Таблица 6. SWOT-Анализ конкурентоспособности строительных материалов
Table 6. SWOT-Analysis of competitiveness of building materials

Сильные стороны	Слабые стороны
Естественные конкурентные преимущества перед импортом Высокая конъюнктура рынка недвижимости Высокий спрос на строительные материалы и конструкции	Низкий уровень правоприменения. Высокая степень морального и физического износа оборудования в большинстве подотраслей строительства. Низкий уровень концентрации производства, обусловленный «привязкой» бизнеса к региональному уровню управления. Дефицит финансовых ресурсов для полноценного технического перевооружения и модернизации импортозамещающего производства
Возможности	Угрозы
Активное расширение рынка за счет роста объемов производства Импортозамещение на отдельных сегментах строительного рынка Вхождение компаний производства стройматериалов в состав строительных холдингов	Удорожание товаров и услуг естественных монополий Конкурентные преимущества высокотехнологичного импортного оборудования и техники

Оценка сильных и слабых стороны, возможностей и угроз позволяет обозначить конкурентные преимущества и приоритетные направления развития российского рынка строительных материалов.

У российских производителей есть перспективные преимущества по отношению к импортируемой к нам продукции. Мы выделили основные из них:

- лучшее знание условий эксплуатации;
- возможность организовать высокое послепродажное обслуживание;
- организация постоянного взаимодействия с потребителями.

Основные факторы, влияющие на качественное развитие промышленности строительных материалов и повышение ее конкурентоспособности:

- технологические прорывы;
- разработка новых материалов;
- внедрение в производственные процессы инновационных технологий (в том числе нанотехнологий);
- снижение затрат и рост производительности труда.

Большинство указанных факторов, являются взаимозависимыми и усугубляют основные системные проблемы отрасли — технологическую отсталость, разобщенность, закрытость.

Вывод. Проведение политики импортозамещения на рынке строительной продукции имеет позитивные сдвиги, но, стоит учитывать, что если импортозамещение происходит только ради импортозамещения, когда не учитывается качество производимой продукции, а в приоритете стоит только страна происхождения, то может возникнуть ситуация, когда на строительном рынке будут преобладать некачественные материалы, конструкции, оборудование и техника. В этом случае может снизиться стоимость самого строительства, но дальнейшая эксплуатация сооружения становится гораздо дороже в связи с частой необходимостью в проведении ремонта.

В соответствии с проведенным исследованием можно прогнозировать положительное развитие программы импортозамещения в строительстве, реализация которой обеспечит создание дополнительных рабочих мест, увеличение объемов производства инновационной строительной продукции; благоприятные условия для отечественных производителей и вхождения их продукции на рынок.

Библиографический список:

1. О промышленной политике в Российской Федерации. Федеральный закон от 31.12.2014 N 488-ФЗ (ред. от 13.07.2015)
2. http://www.tatre.ru/articles_id10067
3. Строительство в России - 2016 г. URL http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_46/Main.htm
4. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года (разработан Минэкономразвития России) [Электронный ресурс]. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/c591369a5bffd9f37a79bf770075db7f025b27b9/.
5. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 10 мая 2016 г. № 868-р). https://realty.gia.ru/analysis_trends/20150528/405332405.
6. Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в промышленности строительных материалов (изделий) и строительных конструкций Российской Федерации. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 13 июля 2016г. № 2380.
7. Levy S.M. Project Management in Construction. 6th Edition. N.Y.; 2012.
8. Алексеева Т. Р. Развитие инструментов модернизации строительного комплекса. МГСУ , 2016, Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ , 978-5-7264-1280-1, 96 с.
9. Березин А.А. Влияние стратегий издержек на конкурентоспособность компании // Микроэкономика. 2012. N 5.
10. Хейфец Б.А. Импортозамещение и конкурентоспособность // Россия и совр. мир. 2016. N 2. С.12-29.
11. <https://www.fedstat.ru/indicator/31450> Единая межведомственная информационно-статистическая система
12. <http://www.cmpo.ru/>
13. Кара А. Оценка конкурентоспособности специалистов на основе комплексной системы показателей // Пробл. теории и практики управл. 2011. N 7. С.36-44.
14. Каминский М.А. Исследование требований к деятельности строительных предприятий в условиях новой модели экономического роста // Экономика и предпринимательство. 2013. №11(40).
15. Павлов А.С. Экономика строительства. В 2-х томах. Т.1: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры. - М.: Издательство Юрайт, 2016. - 314 с. - Серия: Бакалавр и магистр. Академический курс
16. The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets. – Bedford MA: McGraw Hill Constructions, Smart Market Report, 2014.
17. Maryam Parsi Creating Distinct Strategies for Marketing Campaigns Enterprise Dadevarzan Virtual Corp. Indian Journal of Science and Technology. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i27/97588.
18. Черников А.В. Современные инновационные инструменты повышения конкурентоспособности компании / А.В. Черников, В.А. Редько // Вестник Моск. ун-та. Сер. 6. Экономика. 2011. N 5. С.41-62.
19. Кониная Н.Ю. Конкурентоспособность фирмы в глобальном мире; Проспект - Москва, 2012. 368 с.

20. Günhan, S., Arditi, D., Factors affecting international construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131, 3, 273-282, 2005.
21. Korkmaz, S. and Messner, J. I., Competitive Positioning and Continuity of Construction Firms in International Markets, *Journal of Management in Engineering*, 24,4, 207-216, 2008.
22. Strategy for the Sustainable Competitiveness of the Construction Sector and its Enterprises // Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. COM(2012) 433 final. – Brussels, 31.7.2012.
23. Новиков А.В. Оценка эффективности инвестиций// А.В Новиков// Журнал «Экономический анализ: теория и практика» - № 8. 2014. с.77-80
24. Левицкий Т.Ю. Актуальные направления производства конкурентоспособной строительной продукции на инновационной основе. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2017;44 (2):197-209. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-197-209.
25. Мейланов И.М., Эсетова А.М. Основные направления повышения инвестиционной привлекательности промышленного строительства. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2015;38(3):192-202. DOI:10.21822/2073-6185-2015-38-3-192-202.

References:

1. О промышленной политике в Российской Федерации. Федеральный закон от 31.12.2014 N 488-FZ (ред. от 13.07.2015) [On industrial policy in the Russian Federation. Federal Law No. 488-FZ of December 31, 2014 (as amended on July 13, 2015) (In Russ.)].
2. http://www.tatre.ru/articles_id10067
3. Stroitel'stvo v Rossii - 2016. [Электронный ресурс] Режим доступа URL http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_46/Main.htm [Construction in Russia – 2016. [Electronic resource] Access mode – URL http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_46/Main.htm (In Russ.)]
4. Prognoz dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii naperiod do 2030 goda (razrabotan Minekonomrazvitiya Rossii) [The forecast of long-term social and economic development of the Russian Federation for the period up to 2030 (developed by Ministry of Economic Development of Russia)]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/c591369a5bf9f37a79bf770075d-b7f025b27b9/ (In Russ.)].
5. Strategiya razvitiya promyshlennosti stroitel'nykh materialov na period do 2020 goda i dal'neyshuyu perspektivu do 2030 goda (utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva RF ot 10 maya 2016 g. № 868-r). [Strategy for the development of the building materials industry for the period until 2020 and a further perspective until 2030 (approved by the decree of the Government of the Russian Federation of May 10, 2016 No. 868-r) (In Russ.)]
6. Ob utverzhdenii plana meropriyatiy po importozameshcheniyu v promyshlennosti stroitel'nykh materialov (izdeliy) i stroitel'nykh konstruksiy Rossiyskoy Federatsii. Prikaz Ministerstva promyshlennosti i torgovli Rossiyskoy Federatsii ot 13 iyulya 2016g. № 2380) [On the approval of the plan of measures for import substitution in the industry of building materials (products) and building structures of the Russian Federation. Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation of July 13, 2016. No. 2380 (In Russ.)].
7. Levy S.M. Project Management in Construction. 6th Edition. N.Y.; 2012
8. Alekseeva T.R. Razvitie instrumentov modernizatsii stroitel'nogo kompleksa. Biblioteka nauchnykh razrabotok i proektov NIU MGSU, 978-5-7264-1280-1. 2016. 96 s. [Alekseeva T.R. Development of tools for the modernization of the building complex. Library of scientific developments and projects of NIU MSSU, 978-5-7264-1280-1. 2016. 96 p. (In Russ.)]
9. Berezin A.A. Vliyanie strategii izderzhkek na konkurentosposobnost' kompanii. Mikroekonomika. 2012;5. [Berezin A.A. The impact of cost strategies on the company's competitiveness. Microeconomics. 2012;5. (In Russ.)]
10. Kheifets B.A. Importozameshchenie i konkurentosposobnost'. Rossiya i sovremennyyimир. 2016;2:12-29. [Kheifets B.A. Import substitution and competitiveness. Russia and the Contemporary World. 2016;2:12-29. (In Russ.)]
11. <https://www.fedstat.ru/indicator/31450> Edinaya mezhdodomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema [https://www.fedstat.ru/indicator/31450 Unified interdepartmental information and statistical system (In Russ.)]
12. <http://www.cmpro.ru/>
13. Kara A. Otsenka konkurentosposobnosti spetsialistov na osnove kompleksnoi sistemy pokazatelei. Problemyteorii i praktikiupravleniya. 2011; 7:36-44. [Kara A. Evaluation of competitiveness of specialists on the basis of an integrated system of indicators. Theoretical and Practical Aspects of Management. 2011;7:36-44. (In Russ.)]
14. Kaminskii M.A. Issledovanie trebovaniy k deyatelnosti stroitel'nykh predpriyatiy v usloviyakh novoi modeli ekonomicheskogo rosta. Ekonomika i predprinimatel'stvo. 2013;11(40). [Kaminskii M.A. Research requirements for the activities of construction companies in the new model of economic growth. JournalofEconomyandentrepreneurship. 2013;11(40). (In Russ.)]
15. Pavlov A.S. Ekonomika stroitel'stva. V 2-kh tomakh. T.1: uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i magistratury. Seriya: Bakalavr i magistr. Akademicheskii kurs. M.: Izdatel'stvoYurait; 2016. 314 s. [Pavlov A.S. Economy of construction. In 2 volumes. V.1: A textbook and a workshop for undergraduate and graduate students. Series: Bachelor and Master. Academic course. M.: Publishing House Yurait; 2016. 314 p. (In Russ.)]
16. The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets. Bedford MA: McGraw Hill Constructions, Smart Market Report; 2014.

17. Maryam Parsi Creating Distinct Strategies for Marketing Campaigns Enterprise Dadevarzan Virtual Corp. Indian Journal of Science and Technology. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i27/97588.
18. Chernikov A.V., Red'ko V.A. Sovremennye innovatsionnye instrument povysheniya konkurentosposobnosti kompanii. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika. 2011;5:41-62. [Chernikov A.V., Red'ko V.A. Modern innovative tools to enhance the company's competitiveness. Moscow University Economics Bulletin. 2011;5:41-62. (In Russ.)]
19. Konina N.Yu. Konkurentosposobnost' firmy v global'nom mire. Prospekt – Moskva; 2012. 368 s. [Konina N.Yu. Competitiveness of the company in the global world. Prospekt – Moskva; 2012. 368 p. (In Russ.)]
20. Günhan S., Arditi D. Factors affecting international construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2005;131(3):273-282.
21. Korkmaz S., Messner J.I. Competitive Positioning and Continuity of Construction Firms in International Markets. Journal of Management in Engineering. 2008;24(4):207-216.
22. Strategy for the Sustainable Competitiveness of the Construction Sector and its Enterprises. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. COM (2012) 433 final. Brussels, 31.7.2012.
23. Novikov A.V. Otsenka effektivnosti investitsii. Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2014;8:77-80. [Novikov A.V. Evaluation of investment efficiency. Economic analysis: theory and practice. 2014;8:77-80. (In Russ.)]
24. Levitskii T.Yu. Aktual'nye napravleniya proizvodstva konkurentosposobnoi stroitel'noi produktsii na innovatsionnoi osnove. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017;44(2):197-209. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-197-209. [Levitskii T.Yu. Actual directions of production of competitive construction products on an innovative basis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44(2):197-209. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-197-209. (In Russ.)]
25. Meilanov I.M., Esetova A.M. Osnovnye napravleniya povysheniya investitsionnoi privlekatel'nostipromyshlennogo stroitel'stva. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;38(3):192-202. DOI:10.21822/2073-6185-2015-38-3-192-202. [Meilanov I.M., Esetova A.M. The main directions of increasing the investment attractiveness of industrial construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015; 38(3):192-202. DOI:10.21822/2073-6185-2015-38-3-192-202. (In Russ.)]

Сведения об авторе:

Разаханова Фатима Мирземагомедовна – аспирант.

Information about the author:

Fatima M. Razakhanova – Graduate student.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.08.2017.

Принята в печать 30.09.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 27.08.2017.

Accepted for publication 30.09.2017.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст

Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом **«Библиографический список»**. Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников

литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок.

Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер».

Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, а также правилам оформления.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;
- electronic copy (e-mail is acceptable);
- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);
- Information about authors.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: «**Introduction**», «**Background**», «**Methods**», «**Results and Discussion**», «**Conclusion**». The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text

Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the journal, and formatting guidelines.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts

and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 Imama Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64.

Министерство образования и науки РФ



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 44– №4 – 2017.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 44, No.4, 2017.

Верстка: Шагина С.Б.

Адрес редакции:

367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет»

Тел./факс(8722)623715

(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Shagina C.B

Editorial address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 30.12.2017 г. Сдано в печать 30.12. 2017 г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 27,99 Уч. изд.л. 27,58

Заказ № 173.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.