

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, №2, 2017.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 44, No.2, 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, № 2, 2017 г.**

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели

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

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

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

Члены редакционного совета

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес учредителя: 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/>

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, №2
Махачкала, 2017 – 224с.

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

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕХАНИКА 8

Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Осадчий А.С., Труфанова Е.В.

РАСЧЕТ ЗДАНИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ВЕТРОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ 8

Ахриев А.С., Гайтукиева З.Х., Кунижев Б.И., Тхакахов Р.Б.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЕЙ АЛЮМИНИЯ И САЖИ 18

Кушнер Г.А., Мамонтов В.А., Халявкин А.А.

МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРЕБНОГО ВАЛА С ДЕЙДУДНЫМ ПОДШИПНИКОМ ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ 28

Пайзулаев М.М., Рашидова Е.В., Соболев Б.В.

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНАХ РАДИАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ В СТЕНКЕ ТРУБЫ С ТОНКИМ ПОКРЫТИЕМ 37

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ 46

Дмитриев А.И.

ФИЗИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПИНОВЫХ УСТРОЙСТВ 46

Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкин Д.А.

УСТРОЙСТВО КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ 55

Кадирова Д.К.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА 68

Магомедова П.А.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ БИПОЛЯРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ 77

Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ШКАФА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 87

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 97

Аликов А.Ю., Ковалева М.А., Рутковский А.Л., Тедеева Н.В.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО КРИВЫМ РАЗГОНА 97

Аристова Е.М. УСТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ И МЕТРИКИ	107
Асланов Т.Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА	118
Лобанов И.Е. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПРЯМЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛАХ, А ТАКЖЕ В ПРЯМЫХ КРУГЛЫХ ТРУБАХ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ	126
Магомедова М.Р. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА МЕЖДУ ПОТОКОМ И РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ	142
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	151
Апкаргов Ш.И., Батаев Д. К.-С., Газиев М.А., Мажиев Х.Н. ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВЛАЖНОСТНЫХ И КАРБОНИЗАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ	151
Дибиргаджиев А.М., Муртазалиев Г.М., Чикаев М.А. РАЗНОВИДНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИИ	162
Курбацкий Е.Н., Купчикова Н.В. СПОСОБЫ УСТРОЙСТВА ТОННЕЛЕЙ ИЗ ОПУСКНЫХ СЕКЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ДОННЫХ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТАХ	173
Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ	184
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	197
Левицкий Т.Ю. АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ИННОВАЦИОННОЙ ОСНОВЕ	197
Мейланов И.М. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	210
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	220

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 . 2 , 2 0 1 7 .

<p>Editor- in-Chief: Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Editorial Board: Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science , Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gasan M. Abakarov, Doctor of Chemical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Abdulgalim M. Abdulgalimov, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science , Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Bilal A. Bilalov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Viktor M. Volodin, Doctor of Economics, Professor, Dean, Penza State University, Penza, Russia. Mushfig E. Guliev, Doctor of Economics, Associate Professor, Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan; Rasul V. Guseynov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Marzhanat N. Isalova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Elder Sh. Ismailov, Doctor of Biology, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science , Professor, Head of the department of the development of perspective researches of National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science , Professor, Rector of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia; Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center "Strategy ", Moscow, Russia. Arbuli.G.Magomedov, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir B. Melekhin Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Rizwan G. Mitarov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Elena I. Pavlyuchenko, Doctor of Economics, Professor, Vice Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science , Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific director of the «Microelectronics and Nanotechnology» research institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, Doctor of Technical Science, Professor, Dean, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia.</p>	<p>Research areas</p> <p>Physical-mathematical science Mechanics</p> <p>Technical science Power, Metallurgical and Chemical Mechanical Engineering</p> <p>Computer science, Computer Engineering and Management</p> <p>Building and architecture</p> <p>Economic science</p>
<p>Editorial council</p> <p style="text-align: center;">Chairman of the editorial council:</p> <p>Boris A.Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, rector, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p style="text-align: center;">The co-chairs of the editorial council:</p> <p>Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, rector, Ustinov Baltic State Technical University "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, Rector of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Members of the editorial Board</p> <p>Mustafa B.-O. Babanly, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan. Alexey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC "SIC Construction", Moscow, Russia. Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, corresponding member, SRA RK, academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan. Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus. Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director. Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung - Dr., Friedrichstrasse 106 b, D-10117 Berlin, Germany /Deutschland. Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia. Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia. Vladimir D. Raizer, Ph.D., Professor, California, San Diego, USA. Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia. Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia. Yousuf N. Emirov, Doctor of Mathematics and Physics, research associate, Nanotechnology Research and Education Center, University of South Florida, USA. Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, head of the department, Computing Systems and Information Security", Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p>	<p style="text-align: center;">Herald of Daghestan State Technical University.</p> <p>Technical Science Volume 44, No.2 Makhachkala, 2017 –224p.</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

MECHANICS8

Elifkhan K. Agakhanov, Galina M. Kravchenko, Artem S. Osadchiy, Elena V. Trufanova

CALCULATION OF BUILDINGS WITH COMPLEX GEOMETRIC SHAPES
FOR WITHSTANDING WIND IMPACT 8

Alikhan S. Akhriev, Zareta Kh. Gaytukieva, Boris I. Kunizhev, Ruslan B. Tkhakakhov

THE DEPENDENCE OF DIELECTRIC PERMEABILITY AND SPECIFIC VOLUME
RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITES ON THE CONCENTRATION
OF NANO-DIMENSIONAL ALUMINIUM PARTICLES AND CARBON
BLACK FILLERS18

Guriy A. Kushner, Viktor A. Mamontov, Aleksey A. Khalyavkin

MECHANICS OF CONTACT INTERACTION BETWEEN PROPELLER SHAFT AND STERN
BEARING UNDER THE TRANSVERSE VIBRATIONS28

Magomed M. Payzulaev, Elena V. Rashidova, Boris V. Sobol'

STRAIN CONCENTRATION IN APICES OF RADIAL CRACKS IN A THIN COATED
PIPE WALL37

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING46

Aleksey I. Dmitriev

PHYSICAL DATA CODING USING POLARISING SPIN DEVICES46

Tagir A. Ismailov, Khadzhimurat M. Gajiyev, Dmitriy A. Chelushkin

DEVICE OF PIECEWISE-LINEAR APPROXIMATION OF TRANSIENT
RESPONSE OF CONTROLLED ELECTRONIC COMPONENTS55

Djamilia K. Kadirova

FLOW TYPE THERMOELECTRIC HEAT TRANSFER INTENSIFIER68

Patimat A. Magomedova

THERMOELECTRIC EVENTS IN LIGHT-EMITTING BIPOLAR SEMICONDUCTOR STRUC-
TURES77

Arip T. Rashidkhanov, Shirali A. Yusufov

DEVELOPMENT OF PROTOTYPE SYSTEM FOR REGULATING THERMAL
CONDITIONS OF TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT CABINETS87

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT97

Alan Yu. Alikov, Mariya A. Kovaleva, Aleksandr L. Rutkovskiy, Nadya V. Tedeeva

AUTOMATION OF OPTIMAL IDENTIFICATION OF DYNAMIC ELEMENT
TRANSFER FUNCTIONS IN COMPLEX TECHNICAL OBJECTS BASED
ON ACCELERATION CURVES97

Ekaterina M. Aristova

REGULATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ADDITIVE REDUCTION
AND METRICS METHODS107

Tagirbek G. Aslanov DEFINITION OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATES USING A COMBINED METHOD.....	118
Igor' E.Lobanov MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN DIRECT FLAT CHANNELS AND DIRECT ROUND PIPES WITH ROUGH WALLS UNDER THE SYMMETRIC HEAT SUPPLY	126
Milada R. Magomedova MATHEMATICAL MODELLING OF MASS EXCHANGE PROCESSES BETWEEN FLOW AND ALLUVIAL SEDIMENTS	142
BUILDING AND ARCHITECTURE	151
Shamil' I.Apkarov, Dena K.-S.Bataev, Gaziev M.A., Khasan N.Mazhiev ASSESSMENT OF CRACKING RESISTANCE OF CELLULAR CONCRETE PRODUCTS UNDER MOISTURE AND CARBONISATION DEFORMATIONS WITH STRESS RELAXATION.....	151
Anvar M. Dibirgadzhiyev, Gelani M.Murtazaliev, Magomed A.Chikaev VARIATIONS OF THE ENERGY METHOD FOR STUDYING CONSTRUCTION STABILITY	162
Evgeniy N. Kurbatskiy, Natalia V. Kupchikova METHODS FOR THE ARRANGEMENT OF IMMERSSED TUBE TUNNELS DURING CONSTRUCTION BASED ON STRUCTURALLY UNSTABLE SOILS	173
Khairulla M. Muselemov, Osman M. Ustarkhanov, Abusupyan K.Yusupov STRESS-DEFORMED STATE OF A STRUT-FRAMED CRANE GIRDER.....	184
ECONOMIC SCIENCE	197
Timur Yu. Levitskiy RELEVANT DIRECTIONS FOR THE PRODUCTION OF COMPETITIVE CONSTRUCTION PRODUCTS ON THE BASIS OF INNOVATION	197
Izmet M. Meylanov IMPROVING THE QUALITY OF INVESTMENT DESIGN IN INDUSTRIAL CONSTRUCTION	210
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS.....	220

Для цитирования: Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Осадчий А.С., Труфанова Е.В. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):8-17. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-8-17

For citation: Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchiy A.S., Trufanova E.V. Calculation of buildings with complex geometric shapes for withstanding wind impact. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):8-17. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-8-17

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 531.25. 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-8-17

РАСЧЕТ ЗДАНИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА ВЕТРОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Агаханов Э.К.¹, Кравченко Г.М.², Осадчий А.С.³, Труфанова Е.В.⁴

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

²⁻⁴Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, Россия

¹e-mail: elifhan@bk.ru; ²e-mail: Galina.907@mail.ru,

³e-mail: Osadch96@mail.ru, ⁴e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Резюме. Цель. В статье рассматривается возможность моделирования ветрового потока при расчете зданий сложной геометрической формы с целью определения параметров и зон комфортности. **Метод.** Проведены исследования влияния ветрового воздействия на здание цилиндрической формы с использованием программного комплекса Ansys 15.0. **Результат.** Для расчета ветрового потока и определения зон комфортности разработана конечно-элементная модель здания музея современного искусства сложной геометрической формы. Расчетная область выбрана таким образом, чтобы ее границы не оказывали влияние на результаты счета. Максимальная скорость ветра принята 44 м/с на высоте 10 м от уровня земли, как максимальная в районе г. Новороссийска. Геометрия земной поверхности вокруг модели считалась плоской. Поверхность здания предполагалась гладкой, поверхность окружающей местности принята шероховатой с параметром шероховатости 0,1 м. При численном моделировании варьировались параметры ориентирования здания относительно розы ветров. Разработаны три варианта расчетных моделей с варьированием расположения здания и его геометрических характеристик. Первый вариант - модель здания вытянута вдоль оси X, второй вариант - модель здания ориентирована вдоль оси Y острым углом контура, третий вариант - модель здания располагается вдоль оси Y и ориентирована тупым углом внешнего контура здания. Результаты расчета здания цилиндрической формы на ветровое воздействие соответствуют СП 20.13330.2011. Применяя численное моделирование ветрового потока, определены параметры и зоны комфортности здания сложной геометрической формы. Выявлено несоответствие нормативных характеристик объекта при расчете на ветровую нагрузку с результатами исследований. **Вывод.** Даны рекомендации по выбору наиболее оптимального расположения здания музея с учетом параметров комфортности и наибольшего давления ветра: геометрическая форма наружного контура влияет на расположение зон пониженной комфортности; резкое изменение границ наружного контура приводит к возникновению повышенного давления и скорости ветра и, как следствие, изменение направления вихревых потоков; при моделировании ветрового воздействия для зданий сложной геометрической формы необходимо применять метод конечных элементов; при проектировании зданий и сооружений следует избегать резкого изменения контура объекта.

Ключевые слова: метод конечных элементов, конечно-элементная модель, ветровая нагрузка, ветровое воздействие, ветровые потоки, параметры комфортности, зоны комфортности

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE MECHANICS

*Elifkhan K. Agakhanov*¹, *Galina M. Kravchenko*², *Artem S. Osadchiy*³, *Elena V. Trufanova*⁴

¹Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave, Makhachkala 367026, Russia,

²⁻⁴Don State Technical University,
1 Gagarina square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

¹e-mail: elifhan@bk.ru; ²e-mail: Galina.907@mail.ru,

³e-mail: Osadch96@mail.ru; ⁴e-mail: El.Trufanova@mail.ru

CALCULATION OF BUILDINGS WITH COMPLEX GEOMETRIC SHAPES FOR WITHSTANDING WIND IMPACT

Abstract Objectives The possibility of modeling wind flow during the design of buildings with complex geometric shapes in order to determine comfort parameters and zones is considered. **Methods** The investigation of the impact of wind on a cylindrical building was carried out using Ansys 15.0 software. **Results** A finite element model of a modern art museum building having a complex geometric shape is developed for the calculation of the wind flow and the definition of comfort zones. The computational region is chosen such that its borders do not affect the calculation results. The maximum wind speed is assumed to be 44 m/s at an altitude of 10 m from the ground level, this being the maximum in the region of Novorossiysk. The topography of the earth's surface around the model was considered flat. The surface of the building was assumed to be smooth while the surface of the surrounding terrain was assumed to be rough with a roughness parameter of 0,1 m. The parameters of the building orientation relative to the wind rise were varied during the numerical modeling. Three variants of computational models with varying building location and its geometric characteristics are developed. In the first variant, the building model is stretched along the X-axis; in the second variant, the acute angle of the building model's contour is oriented along the Y-axis; in the third variant, the building model is located and oriented along the Y-axis with its obtuse angle of the external contour of the building. The calculation results of a cylindrical building for wind impact correspond to SP 20.13330.2011. The comfort parameters and zones of a building having complex geometric shape are defined by means of numerical modeling of the wind flow. The discrepancy between the object's normative characteristics and the research results is revealed during the calculation of the wind load. **Conclusion** The recommendations are given for choosing the optimal location of the museum building, taking into account the comfort parameters and the greatest wind pressure; the geometric shape of the outer contour affects the location of the zones of reduced comfort; a sharp change in the boundaries of the outer contour leads to the appearance of increased pressure and wind speed and, as a consequence, a change in the direction of the vortex flows; it is necessary to apply the finite element method when modeling the wind impact for buildings of complex geometric shapes; sudden changes in the object's contour should be avoided when designing buildings and structures.

Keywords: finite element method, finite element model, wind load, wind impact, wind flows, comfort parameters, comfort zones

Введение. В современном строительстве редко проектируются здания простых архитектурных форм. При моделировании ветровых воздействий на здания сложной геометрической формы невозможно использовать стандартные расчетные формулы из СП 20.13330.2011. Расчет высотных зданий необходимо выполнять на ветровые воздействия и определять параметры

комфортности [1-4]. Однако даже при небольшой высоте зданий, в силу геометрических характеристик конструкций, параметры ветровых воздействий могут значительно меняться.

Постановка задачи. Постановка задачи заключается в моделировании ветрового потока при расчете зданий сложной геометрической формы, исследовании параметров и зон комфортности [5-7]. Для решения поставленной задачи необходимо предварительно провести исследование ветрового воздействия на здание цилиндрической формы [8]. При этом расчетная область выбрана таким образом, чтобы ее границы не оказывали влияния на результаты счета. При численном моделировании варьировались параметры ориентирования здания относительно розы ветров.

Методы исследования. Выполнено исследование влияния ветрового потока на здание цилиндрической формы в программном комплексе Ansys 15.0 [9-10] (рис. 1).

Исходные данные: диаметр исследуемого здания цилиндрической формы 30 м; скорость ветра 44 м/с на высоте 10 м от уровня земли; поверхность здания гладкая; параметр шероховатости земли 0,1 м.

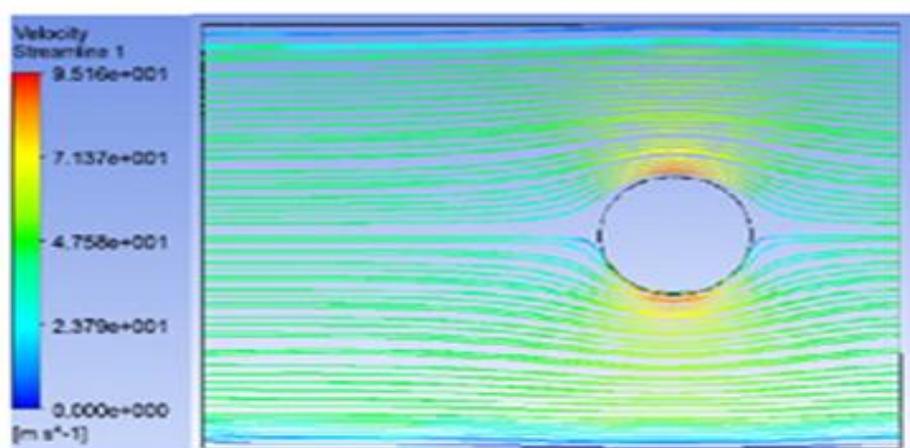


Рис.1. Изолинии ветрового потока при расчете здания цилиндрической формы
Fig.1. The isolines of the wind flow in the calculation of a building of cylindrical shape

Анализ расчета здания цилиндрической формы на ветровое воздействие показал, что расчетные значения давления и скорости ветра составляют соответственно 0,99 кПа и 46 м/с (рис.2).

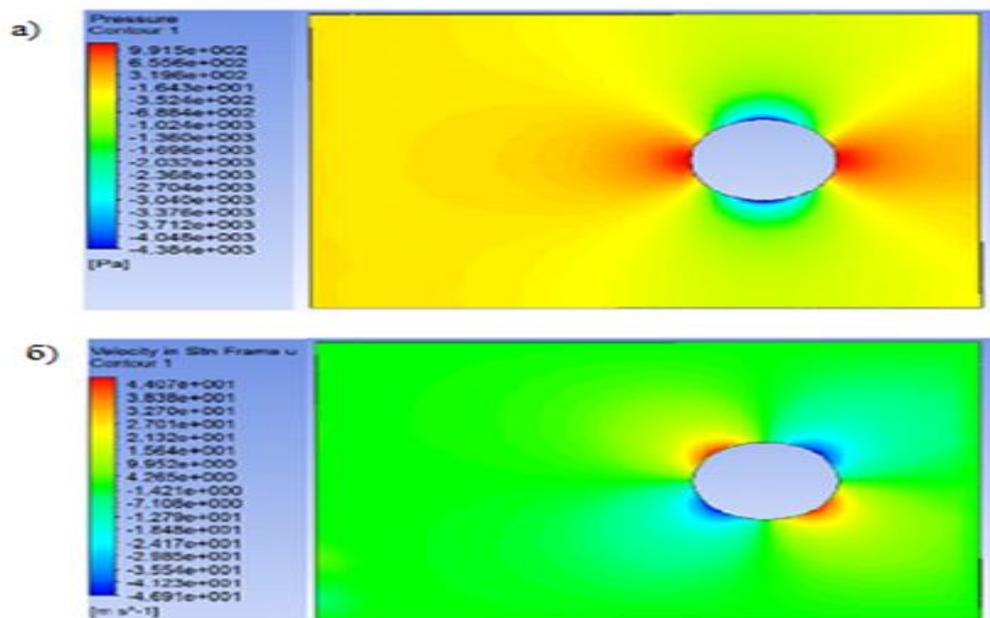


Рис.2. а) изополя давления ветра; б) изополя скорости ветра
Fig.2. a) isopole of wind pressure; b) isosphere of wind speed

В соответствии с СНКК и СП 20.13330.2011 выполнены расчеты ветрового потока на цилиндрическое здание. Полученные результаты давления 1 кПа и 0,85 кПа, скорости ветра 44 м/с и 37,5 м/с хорошо коррелируются с результатами численного эксперимента. Для исследования влияния ветрового потока на здание сложной геометрической формы выполнено моделирование здания музея современного искусства в г.Новороссийск [11-12].

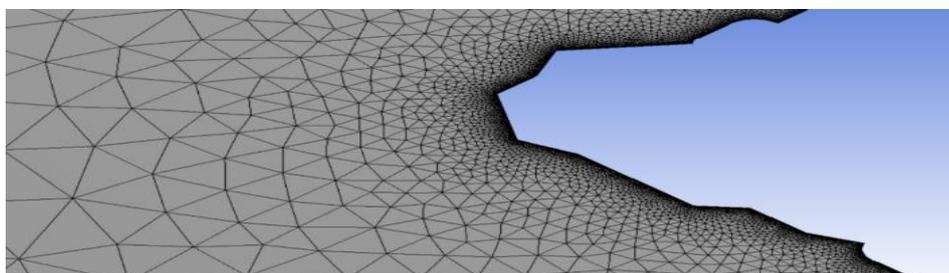


Рис.3. Фрагмент конечно-элементной схемы
Fig.3. Fragment of the finite element circuit

Разработана объемно-пространственная модель здания в Revit 17, которая была интегрирована в один объект и экспортирована в модуль Geometry комплекса Ansys 15.0.

В результате получена контурная плоская модель здания, окруженная сплошной воздушной средой размерами 240x100м. После перенесения в модуль Mesh, авторами была построена конечно-элементная схема, представленная графически на рисунке 3.

Исходный контур здания перестроен путем сглаживания острых углов и изломов. Создан логарифмический профиль здания, соответствующий исходному профилю в приземном слое атмосферы [13-16].

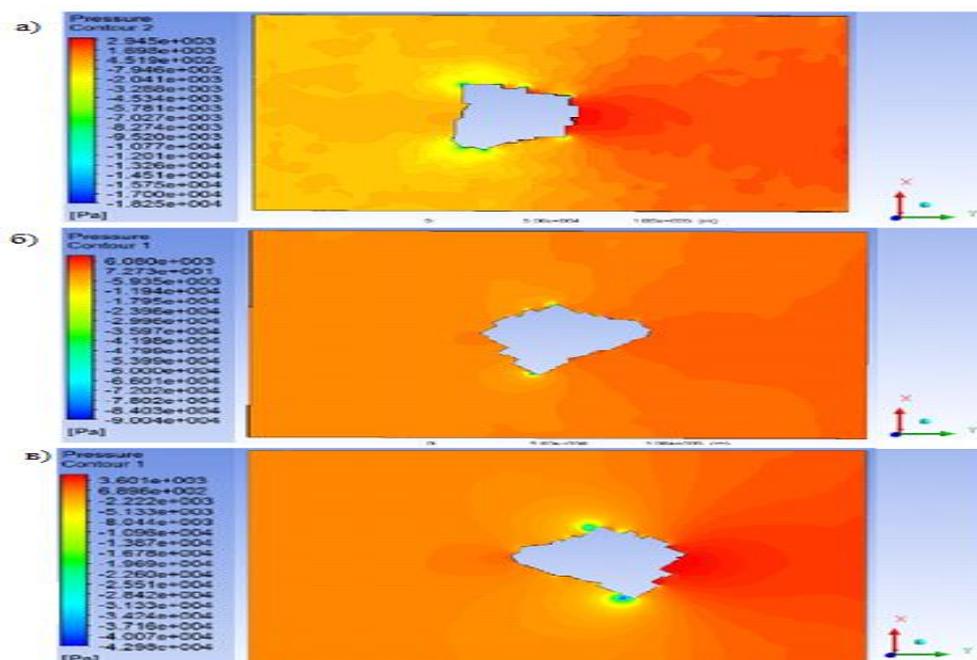


Рис.4. Изополя давлений ветра для трех вариантов моделей здания:

а) вдоль оси X; б) вдоль оси Y острым углом контура; в) вдоль оси Y тупым углом контура

Fig.4. Wind pressure isoforms for three versions of building models:

а) along the X axis, б) along the Y axis with an acute angle of the contour; в) along the Y axis by the angle of the contour

В расчетной схеме выполнено сгущение конечно-элементной сетки вблизи здания с целью повышения точности исследования. Типовым конечным элементом расчетной схемы выбран изопараметрический треугольный конечный элемент. Разработаны три варианта расчетных моделей с варьированием расположения здания и его геометрических характеристик. Первый вариант - модель здания вытянута вдоль оси X, второй вариант - модель здания ориентиро-

вана вдоль оси Y острым углом контура, третий вариант - модель здания располагается вдоль оси Y и ориентирована тупым углом внешнего контура здания.

Обсуждение результатов. На рисунке 4 представлены изополя давлений ветра для трех вариантов моделей здания.

Максимальные значения давления ветра 6,1 кПа соответствуют расчету второго варианта модели здания. Концентрация зон появляется в сечениях резкого изменения границы внешнего контура, остальная область соответствует давлению ветра 2,6 кПа. В первом и третьем варианте наблюдается резкое изменение давления фронтальной поверхности.

Изополя скоростей ветра для трех вариантов моделей здания представлены на рисунке 5.

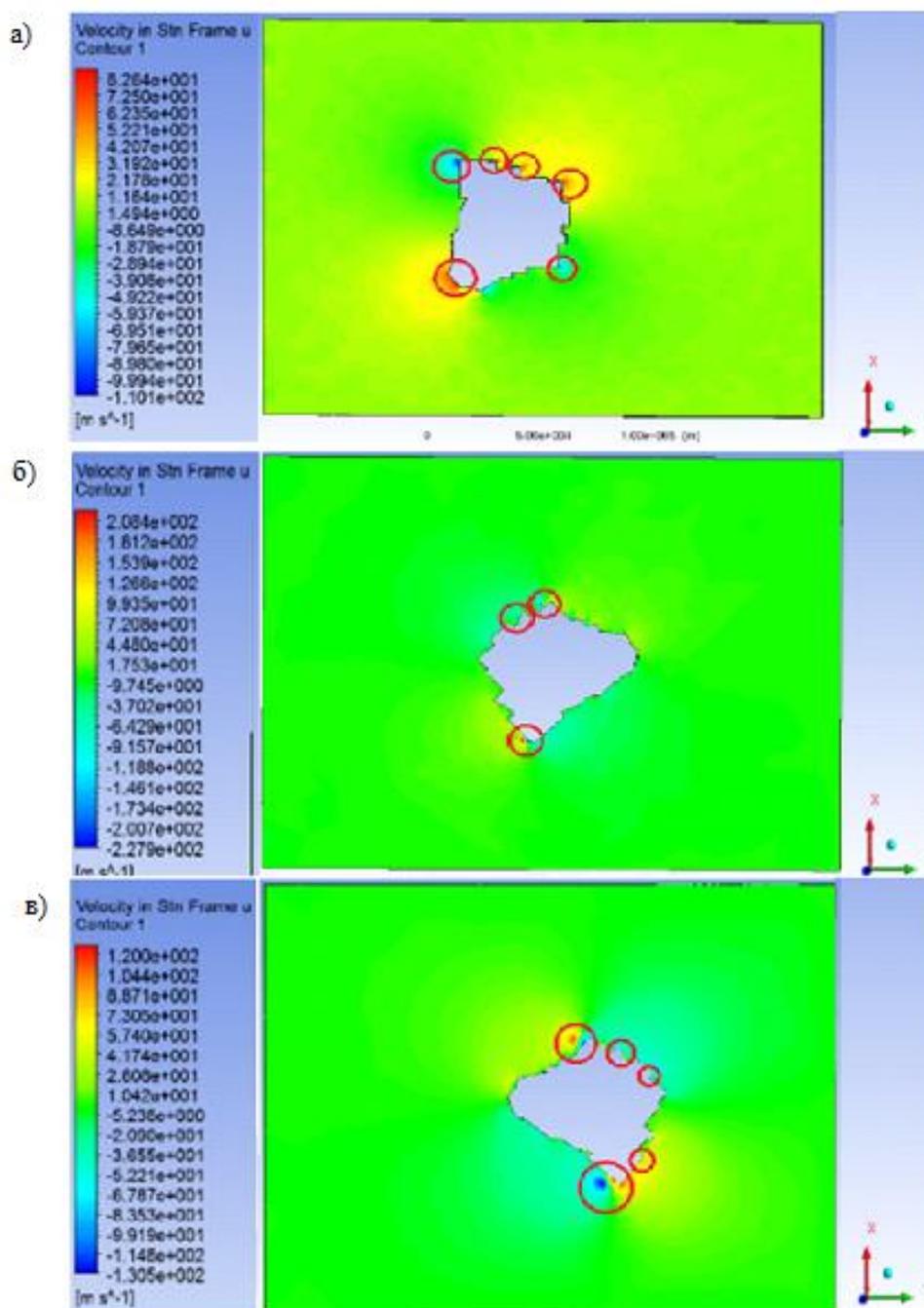


Рис.5. Изополя скоростей ветра для трех вариантов моделей здания:

а) вдоль оси X; б) вдоль оси Y острым углом контура; в) вдоль оси Y тупым углом контура

Fig.5. Wind speed isoforms for three variants of building models:

а) along the X axis; б) along the axis of the acute angle of the contour; в) along the Y axis by the angle of the contour

Максимальные значения скорости ветра составляют соответственно 83 м/с, 208 м/с и 120 м/с. На рисунке 5 выделены особенные точки, в которых происходит резкое изменение скорости ветра, так называемые «завихрения» - зоны пониженной комфортности.

В первом варианте модели здания ветровой поток меняет не только значение, но и направление практически в противоположную сторону. Зоны пониженной комфортности совпадают с резким изменением геометрии наружного контура здания [17-19].

Во втором варианте наблюдается равномерное распределение ветрового потока.

Наименее благоприятным вариантом комфортности является третий. Зоны пониженной комфортности расположены на противоположных границах здания, скорость завихрений увеличивается на 20%.

Результаты исследования ветровых потоков показаны на рисунке 6.

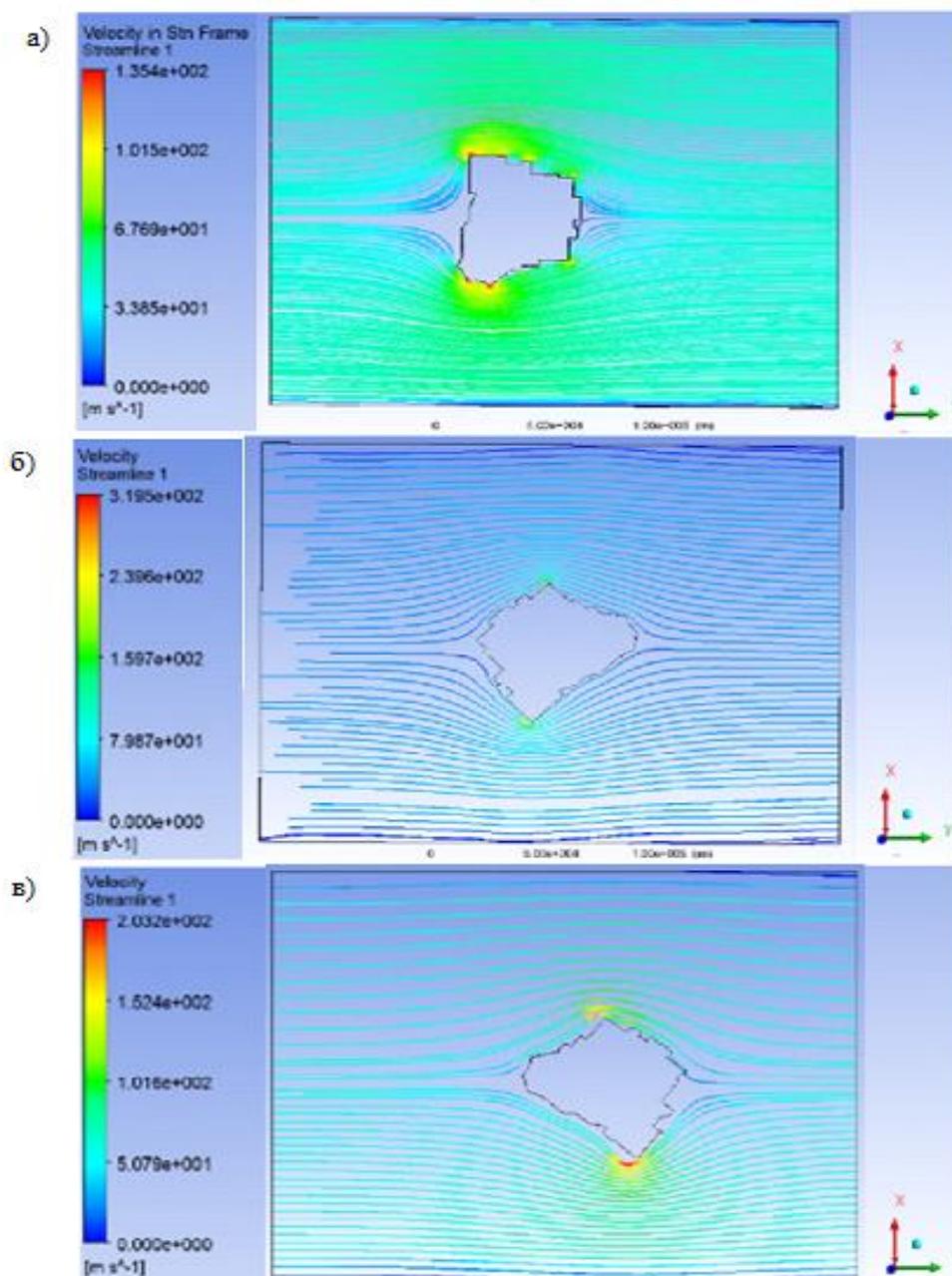


Рис. 6. Ветровые потоки для разных вариантов моделей здания:

а) вдоль оси X; б) вдоль оси Y острым углом контура; в) вдоль оси Y тупым углом контура

Fig.6. Wind flows for different building model variants:

a) along the X axis; b) along the axis of the acute angle of the contour; c) along the Y axis by the angle of the contour

Наиболее неблагоприятные зоны образуются в местах пересечения и неравномерного наложения воздушных потоков в исследуемой области.

Анализ результатов численного эксперимента позволяет сделать вывод о том, что при моделировании внешнего контура здания необходимо избегать резкого изменения геометрической формы сооружения [20]. С учетом результатов численного моделирования разработана наиболее оптимальная геометрическая форма наружного контура здания для уменьшения негативных воздействия ветрового потока (рис. 7).

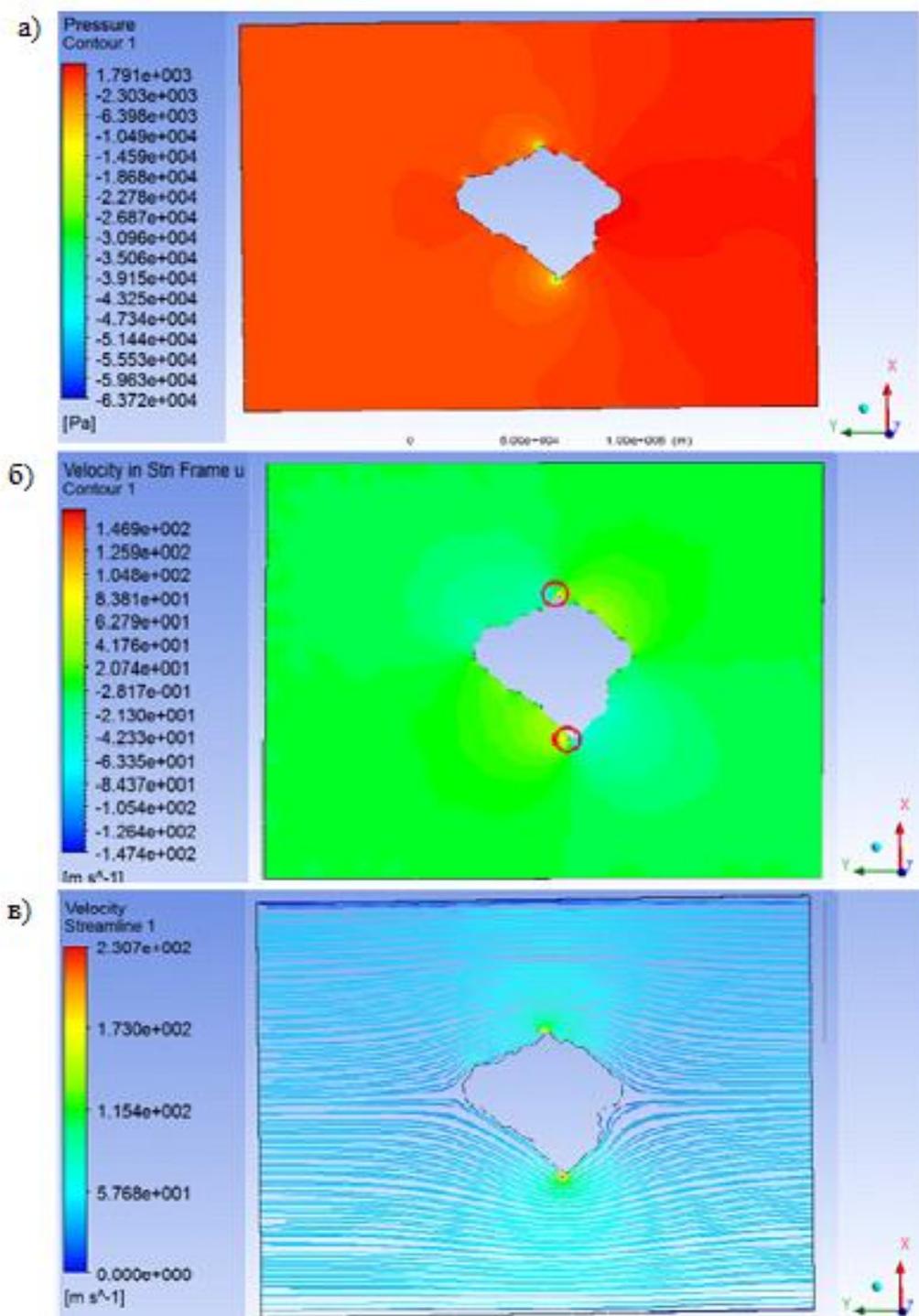


Рис.7. Оптимальная геометрическая форма наружного контура здания:
а) изополя давлений; б) изополя скоростей ветра; в) ветровые потоки
Fig.7. Optimal geometric shape of the external contour of the building:
a) isopole of pressures; b) the isosphere of wind speeds; c) wind currents

Для оптимальной модели максимальные значения давления ветра 1,8 кПа, скорость ветра уменьшается на 25% по сравнению со вторым вариантом модели здания.

Анализ полученных данных показал, что в связи с улучшением геометрической формы наружного контура здания давление на конструкцию распределяется равномерно, линии ветрового потока плавно идут вокруг здания, не создавая наслоений и завихрений.

Вывод. Результаты численного моделирования ветрового потока при расчете зданий сложной геометрической формы позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Расчет здания цилиндрической формы на ветровое воздействие совпадает с результатами счета по нормативным требованиям.
2. Геометрическая форма наружного контура влияет на расположение зон пониженной комфортности. Резкое изменение границ наружного контура приводит к возникновению повышенного давления ветра, скорости ветра и, как следствие, к изменению направления вихревых потоков.
3. При моделировании ветрового воздействия для зданий сложной геометрической формы необходимо применять метод конечных элементов. При проектировании зданий и сооружений по возможности следует избегать резкого изменения контура объекта.
4. Рекомендуется ориентировать здание по розе ветров, создавая обтекаемость объема воздушными потоками.

Библиографический список:

1. Леденев В.В. Высотные здания: учеб. пособие / В.В. Леденев; Тамбовск. гос. техн. ун-т. - Тамбов, 2014. – С. 67-89.
2. Николас П.И. Определение влияния ветровых нагрузок на антенное сооружение. Инженерный вестник Дона. – №2 2008 г.
3. Ретгер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984. - С. 113-141
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М., 1984.- С. 25-37.
5. Агаханов Г.Э. Решение задач механики деформируемого твердого тела с использованием фиктивных расчетных схем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Т.38 – №3 – 2015. –С. 8-15.
6. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Труфанова Е.В. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Т.42 – № 3. – 2016. – С. 8-15.
7. Агаханов Э.К. Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Т.28 – № 2. – 2013. - С. 39-45.
8. Fedorov A.V., Fedorova N.N., Danilov M.N., Valger S.A. Computations of wind environment and shock wave impact on the civil engineering constructions with computer Aid engineering methods // Proc. of 2012 Joint Symp. NSC — SB RAS. Taiwan — Russia Bilateral Symp. on Civil Eng. Taipei, Taiwan: R.O.C., 2012. P. 2–30.
9. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М. Издательство «ДМКПресс». 2014.- С. 124-133.
10. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М. Издательство «ДМК Пресс». 2016. – С. 96-118.
11. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1967, pp. 23-24.
12. Сидоров В.Н., Ахметов В.К. Математическое моделирование в строительстве. М.: Издательство «Издательство Ассоциации строительных вузов». 2007.- С.21-25.
13. Nguyen D.T.et al. Finite element methods. Parallel-Sparse Statics and Eigen-Solutions Springer, 2008 – 554 pp.147-153.
14. Yakushev Vladimir. Analysis of numerical methods for building structures in STARK ES. ABSE-IASS-2011 Symposium, London, 20 - 23 September, 2011, pp.54-56.
15. P.Solin. Partial Differential Equations and the Finite Element Method (A JOHN WILEY & SONS, INC, 2007 Т 499 pp.109-111.
16. Трушин С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи. М. Издательство «Издательство Ассоциации строительных вузов». 2008.– С. 52-61.

17. Lutz L.A. Analysis of Stress in Concrete Hear a Reinforcing Bar Due To Bond and Trans-verse. ACI Joarnal, 1979, no.10, pp.12-15.
18. Nilsen A.H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method. ACI Joarnal, 1968, vol.65, no.9, pp.6-70.
19. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Build-ings. Modern Building Materials, Structures and Techniques. CD-ROM Proceedings of the 8th Inter-national Conference, Vilnius, May 19-21, 2004, pp.98-99.
20. Акаев А. И., Магомедов М.Г., Ханмагомедов М.А. Принципы оптимального планирования экспериментально-теоретических исследований строительных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Т.37 – №2. – 2015. – С. 92-98.

References:

1. Ledenev V.V. Vysotnye zdaniya: ucheb.posobie. Tambov: Tambovsk. gos. tekhn. un-t; 2014. S. 67-89. [Ledenev V.V. High-rise Buildings: A Tutorial. Tambov: Tambov State Technical University; 2014. P. 67-89. (in Russ.)]
2. Nikolas P.I. Opredelenie vliyaniya vetrovykh nagruzok na antennoe sooruzhenie. Inzhenernyy vestnik Dona. 2008; 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/67>. [Nikolas P.I. Definition of wind load influence onto antenna buildings. Engineering journal of Don. 2008; 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/67>. (in Russ.)]
3. Retter E.I. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika. M: Stroyizdat; 1984. S. 113-141. [Retter E.I. Architectural – building aerodynamics. Moscow: Stroyizdat; 1984. P. 113-141. (in Russ.)]
4. Simiu E., Skanlan R. Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya. M.; 1984. S. 25-37. [Simiu E., Skanlan R. Wind impact onto buildings and constructions. Moscow; 1984. P. 25-37. (in Russ.)]
5. Agakhanov G.E. Reshenie zadach mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela s ispol'zovaniem fiktivnykh raschetnykh skhem. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015; 38(3): 8-15. [Agakhanov G.E. Solving problems of deforming solid state mechanics using fictitious computational schemes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015; 38(3): 8-15. (in Russ.)]
6. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennykh kolebaniy prostranstvennogo karkasa zdaniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016; 42(3): 8-15. [Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulation of self-induced vibration parameters of building space framework. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016; 42(3): 8-15. (in Russ.)]
7. Agakhanov E.K. Razvitie kompleksnykh metodov v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013; 28(2):39-45. [Agakhanov E.K. Development of combined methods for deforming solid state mechanics. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013; 28(2):39-45. (in Russ.)]
8. Fedorov A.V., Fedorova N.N., Danilov M.N., Valger S.A. Computations of wind environment and shock wave impact on the civil engineering constructions with computer Aid engineering methods. Proc. of 2012 Joint Symp. NSC — SB RAS. Taiwan — Russia Bilateral Symp. on Civil Eng. Taipei, Taiwan: R.O.C. 2012. P. 2–30.
9. Basov K.A. ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya. M.: Izdatel'stvo “DMKPress”; 2014. S. 124-133. [Basov K.A. ANSYS. User guide. Moscow: “DMKPress”; 2014. P. 124-133 (in Russ.)]
10. Basov K.A. ANSYS dlya konstruktorov. M.: Izdatel'stvo “DMK Press”; 2016. S. 96-118. [Basov K.A. ANSYS for designers. Moscow: Izdatel'stvo “DMK Press”; 2016. P. 96-118. (in Russ.)]
11. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt; 1967. P. 23-24.
12. Sidorov V.N., Akhmetov V.K. Matematicheskoe modelirovanie v stroitel'stve. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2007. S.21-25. [Sidorov V.N., Akhmetov V.K. Mathematical modeling in construction. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2007. P.21-25. (in Russ.)]
13. Nguyen D.T.et al. Finite element methods. Parallel-Sparse Statics and Eigen-Solutions. Springer; 2008. P. 147-153.
14. Yakushev V. Analysis of numerical methods for building structures in STARK ES. ABSE-IASS-2011 Symposium. London; 2011. P.54-56.
15. Solin P. Partial Differential Equations and the Finite Element Method. A JOHN WILEY & SONS, INC; 2007. Vol. 499 P.109-111.

16. Trushin S.I. Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachi. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov: 2008. S. 52-61. [Trushin S.I. Finite Element Method. Theory and problems. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov: 2008. P. 52-61. (in Russ.)]
17. Lutz L.A. Analysis of Stress in Concrete Hear a Reinforcing Bar Due To Bond and Trans-verse. ACI Journal. 1979; 10:12-15.
18. Nilsen A.H. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method. ACI Journal. 1968; 65(9): 6-70.
19. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques. CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference. Vilnius: 2004. P.98-99.
20. Akaev A. I., Magomedov M. G., Khanmagomedov M. A. Printsipy optimal'nogo planirovaniya eksperimental'no-teoreticheskikh issledovaniy stroitel'nykh konstruksiy. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015; 37(2):92-98. [Akaev A. I., Magomedov M. G., Khanmagomedov M. A. Optimized planning principles of experimental-theoretic investigations of building constructions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015; 37(2):92-98. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович - профессор кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, доктор технических наук, профессор.

Кравченко Галина Михайловна - профессор кафедры технической механики, кандидат технических наук, доцент, академия строительства и архитектуры.

Труфанова Елена Васильевна - доцент кафедры технической механики, кандидат технических наук, академия строительства и архитектуры.

Осадчий Артем Сергеевич – студент, академия строительства и архитектуры.

Information about the authors:

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

Galina M.Kravchenko – Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Technical Mechanics, Academy of Building and Architecture.

Elena V. Trufanova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics, Academy of Building and Architecture.

Artem S.Osadchiy – Student, Academy of Building and Architecture.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 30.05.2017.

Received 30.05.2017.

Принята в печать 18.06.2017.

Accepted for publication 18.06.2017.

Для цитирования: Ахриев А.С., Гайтукиева З.Х., Кунижев Б.И., Тхакахов Р.Б. Зависимость диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления полимерных композитов от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):18-27. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

For citation: Akhriev A.S., Gaytukieva Z.Kh., Kunizhev B.I., Tkhakakhov R.B. The dependence of dielectric permeability and specific volume resistance of polymer composites on the concentration of nano-dimensional aluminium particles and carbon black fillers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):18-27. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 532.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-18-27

ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЕЙ АЛЮМИНИЯ И САЖИ

Ахриев А.С.¹, Гайтукиева З.Х.², Кунижев Б.И.³, Тхакахов Р.Б.⁴

^{1,2}Ингушский государственный университет,
386001, РИ, г. Магас, пр. И.Б. Зязикова, 7, Россия

^{3,4}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 175, Россия

¹e-mail: ing_gu@mail.ru; ²e-mail: zareta.amatxanova@mail.ru

³e-mail: mathdean@kbsu.ru; ⁴e-mail: rbt50@mail.ru

Резюме. Цель. Основной идеей настоящего исследования было получение полимерных композитов на основе синтетического изопренового эластомера и полиэтилена низкой плотности, в которых содержатся наночастицы сажи и алюминия в различных количествах. **Метод.** В ходе исследования применялся экспоненциальный подход, позволяющий лучше контролировать область малых добавок, что исключается при линейном распределении нанонаполнителей при малых добавках. Композиты наполнялись наноразмерными частицами алюминия и сажи ДГ-100 с удельной адсорбционной поверхностью $100 \text{ м}^2/\text{г}$ средним размером частиц 20-30 нм. Измерение электрофизических параметров производились по стандартным методам: электронной микроскопии, электронного теневого микроскопа и гидростатического взвешивания. Применена теория и модель Максвелл-Вагнеровской поляризации. **Результат.** Экспериментально исследованы зависимости и построены графики диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления композита 80 % изопренового синтетического каучука (СКИ-3)+20% полиэтилена низкой плотности от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи. Рассмотрены особенности этих кривых. Показано, что при малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\epsilon' = \epsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации. Наблюдалось распределение частиц технического углерода для некоторых гетерогенных полимерных смесей, которое приводило к сверхаддитивному электрическому сопротивлению. **Вывод.** При малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\epsilon' = \epsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации.

Ключевые слова: синтетический изопреновый каучук, полиэтилен, диэлектрическая проницаемость, удельное сопротивление

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

THE DEPENDENCE OF DIELECTRIC PERMEABILITY AND SPECIFIC VOLUME
RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITES ON THE CONCENTRATION
OF NANO-DIMENSIONAL ALUMINIUM PARTICLES AND CARBON BLACK FILLERS

Alikhan S. Akhriev¹, Zareta Kh. Gaytukieva², Boris I. Kunizhev³, Ruslan B. Tkhakakhov⁴

^{1,2} Ingush State University,

7 I. Zyazikova Ave., Magas 386001, Republic of Ingushetia, Russia,

^{3,4} H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

175 Chernyshevskogo Str., Nal'chik 360004, Kabardino-Balkar Republic, Russia,

¹e-mail: ing_gu@mail.ru, ²e-mail: zareta.amatxanova@mail.ru,

³e-mail: mathdean@kbsu.ru, ⁴e-mail: rbt50@mail.ru

Abstract Objectives The main idea of the present study was the production of polymer composites based on synthetic isoprene elastomer and low-density polyethylene containing nanoparticles of carbon black and aluminium in various amounts. **Methods** An exponential approach was used throughout the study to better control the region of small additives; this control was impossible to achieve using a linear distribution of nanofillers among the small additives. The composites were filled with nanosized aluminium and DG-100 carbon black particles with a specific adsorption surface of 100 m²/g and having an average particle size of 20-30 nm. Electrophysical parameters were measured by conventional techniques of electron microscopy, electron shadow microscopy and hydrostatic weighing. Maxwell-Wagner theory and polarisation model were applied. **Results** For a composite containing 80% of isoprene synthetic rubber (SCI-3) and 20% of low-density polyethylene, the dielectric permeability and specific volume resistivity dependences were studied experimentally and their graphs were plotted against the concentration of nanosized particles of aluminium and carbon black fillers. The features of these curves were considered. It is shown that, for small amounts of Al and carbon black nanoparticles in the composite, significant changes (extrema) take place on the curves $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ and $\rho_v = \rho_v(C)$, which do not conform to the Maxwell-Wagner polarisation model. For some heterogeneous polymer mixtures, a distribution of carbon black particles was observed that led to a superadditive electrical resistance. **Conclusion** It is shown that for small amounts of Al and carbon black nanoparticles in composite materials, significant changes (extrema) take place on the curves $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ and $\rho_v = \rho_v(C)$ that do not fit within the framework of the Maxwell-Wagner polarisation model.

Keywords: synthetic isoprene rubber, polyethylene, dielectric permeability, specific resistivity

Введение. Исследование диэлектрических свойств полимерных систем (композиты, смеси), содержащие наноразмерные частицы в малых количествах, является актуальной задачей физики высокомолекулярных соединений и физики диэлектриков [1-5]. Одной из основных задач проведенных исследований является изучение влияния концентрации наночастиц сажи и алюминия на процесс диэлектрической поляризации и электропроводность полимерных композитов на основе изопренового синтетического каучука (СКИ-3) и полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) [6-9].

Постановка задачи. Основной идеей настоящей работы является получение и исследование полимерных композитов на основе синтетического изопренового эластомера и полиэтилена низкой плотности, в которых содержатся наночастицы сажи и алюминия в различных количествах.

Методы исследования. Композиты наполнялись наноразмерными частицами алюминия и сажи ДГ-100 с удельной адсорбционной поверхностью 100 м²/г средним размером частиц 20-

30 нм. Распределение наночастиц сажи и алюминия по размерам представлены на рисунках 1 и 2.

Из рис.1 видно, что наночастицы алюминия довольно мелкие и большая часть их составляет 20-30 нм.

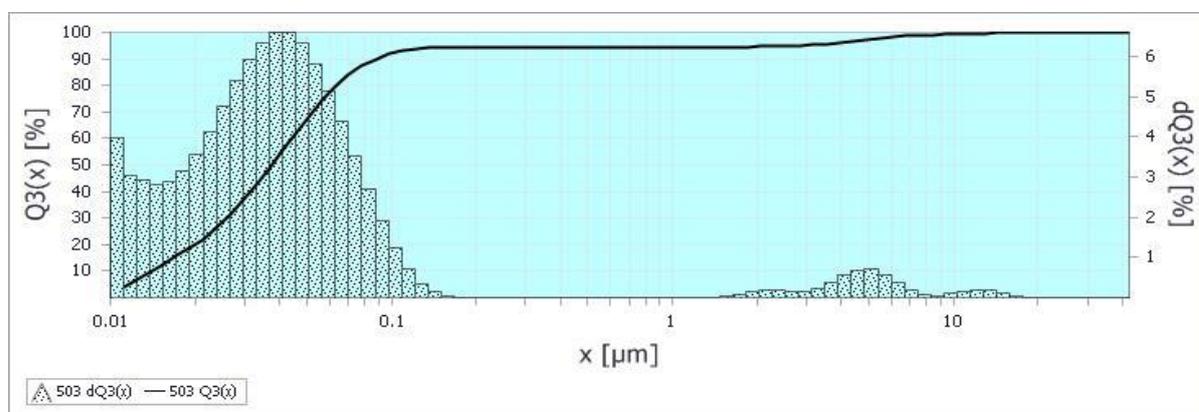


Рис.1. Распределение наночастиц алюминия по размерам
Fig.1. Distribution of aluminum nanoparticles by size

В отличие от инертного алюминия сажа очень активна и наночастицы образуют агломераты размерами от 100 нм до 10 мкм (рис. 2).

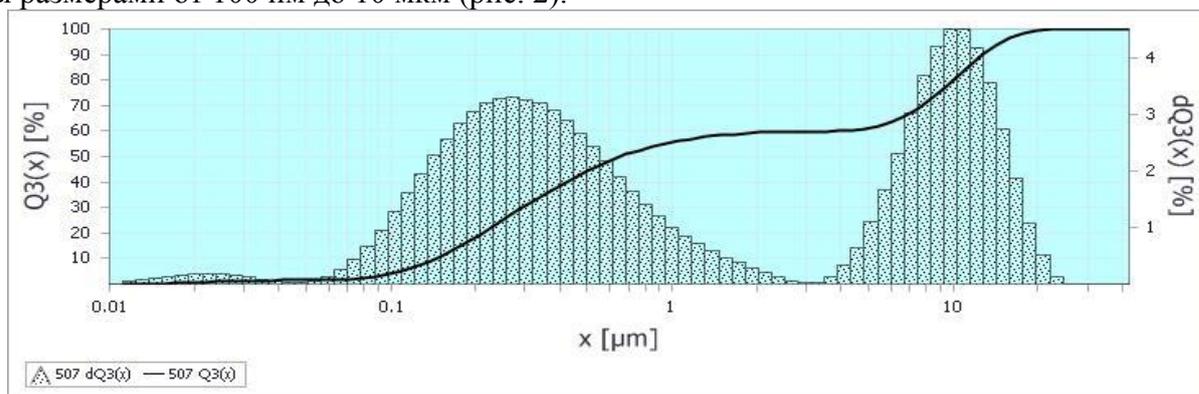


Рис.2. Распределение частиц сажи ДГ-100 по размерам
Fig.2. Distribution of soot particles DG-100 in size

Количество сажи и алюминия рассчитывались по формуле

$$c = 0,1e^n \quad (1)$$

где, c – содержание наполнителя, в масс.%,

n – целые числа от 0 до 4 включительно,

e – основание натуральных логарифмов, равное примерно 2,71.

Экспоненциальный подход позволяет лучше контролировать область малых добавок, что исключается при линейном распределении нанонаполнителей при малых добавках. В этом случае изменяя концентрацию нанонаполнителей (проводники), легко изменить сопротивление исследуемых композитов в широких пределах. Измерение электрофизических параметров производились по стандартным методикам. Следует учитывать, что эффективная диэлектрическая проницаемость – это комплексная величина, определяемая по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon' + j'\varepsilon'' \quad (2)$$

Действительная часть диэлектрической проницаемости определялась как отношение емкостей

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} \quad (3)$$

где C_0 – емкость пустой ячейки (воздушное заполнение); C_x – емкость образца из композита. Мнимая часть диэлектрической проницаемости определялась как величина

$$\varepsilon'' = \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon' = \frac{1}{Q} \cdot \varepsilon' \quad (4)$$

где, Q – добротность конденсатора.

Добротность конденсатора определялась для схемы параллельного соединения конденсатора и сопротивления по стандартной методике. Замеры емкости и добротности производились на частоте 1 кГц.

Обсуждение результатов. Основные результаты экспериментальных исследований электрических свойств композитов 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащего наночастицы алюминия и сажи в различных количествах представлены на рисунках 3-7.

Из рис. 3 (кривая 2) и рис. 4 видно, что диэлектрическая проницаемость композита с увеличением содержания наночастиц Al до 0,73 масс % падает почти на 2 единицы, затем при дальнейшем увеличении содержания Al до 5,37 масс % значение действительной части диэлектрической проницаемости начинает увеличиваться и достигает величины $\varepsilon'=4,10$, что немного выше ε' исходного (чистого) композита.

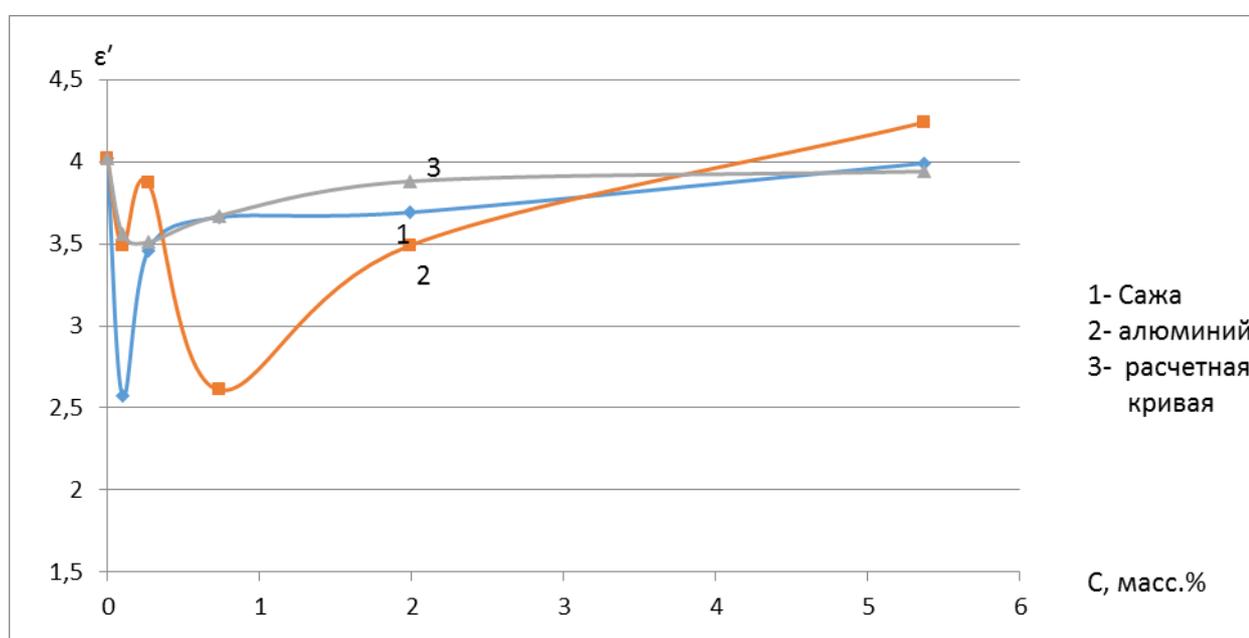


Рис. 3. Концентрационные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости: 1 - 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа; 2 – 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al; 3 – расчетная кривая, по методу контактных групп для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al

Fig. 3. Concentration dependences of the real part of the dielectric constant: 1 - 80% SCI-3 + 20% LDPE + soot; 2 - 80% of SKI-3 + 20% of LDPE + Al; 3 - calculated curve, according to the contact group method for a composite of 80% SCI-3 + 20% LDPE + Al

Из рис.4 видно, что с увеличением содержания наночастиц Al до 0,73 масс % удельное объемное электрическое сопротивление ρ'_v уменьшается на порядок, а электрическая проводимость композита увеличивается в 10 раз. При дальнейшем увеличении содержания наночастиц Al зависимость $\rho_v(c)$ приводит к насыщению.

Из рисунка (кривая 1) видно, что в исследуемом композите 80% СКИ-3+20% ПЭНП при содержании 0,1% сажи значение диэлектрической проницаемости падает на 1,5 единицы, затем при дальнейшем увеличении нанодобавок сажи достигает значения $\varepsilon'=3,8$. Если сравнить зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$ для композитов, содержащих наночастицы сажи (рис.1, кривая 1) и Al (рис.3, кривая 2), видно, что они существенно различаются.

У первого композита падение значения ε' наблюдается только в области добавок 0,1%, а затем начинается резкое возрастание значения ε' , а у второго падения ε' наблюдается при концентрации Al 0,73%, а затем постепенный рост ε' до 4 единиц.

Сравнение данных на зависимостях $\rho_v = \rho_v(C)$ для композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащих наночастицы сажи (рис.5) и Al (рис.4), показывает, что ход этих кривых также сильно различается.

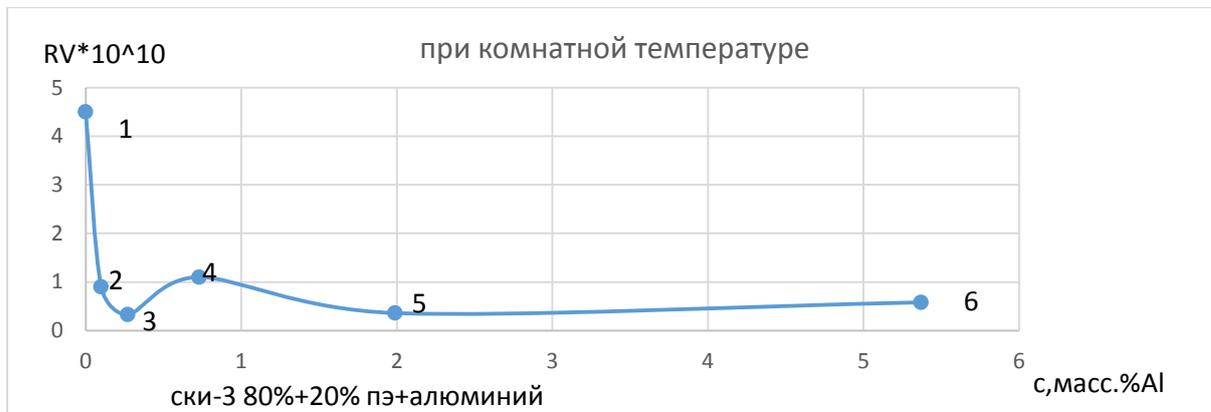


Рис.4. Концентрационные зависимости удельного сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al

Fig.4. Concentration dependencies of the resistivity for the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + Al

Если для композита, содержащего наночастицы Al 0,1%, 0,27% и 0,73%, как описано выше, значения ρ_v падает на 1,5 порядка, а затем приходит к насыщению, то для того же композита, содержащего наночастицы сажи, при таких концентрациях, значение ρ_v возрастает почти на 2 порядка, затем при дальнейшем увеличении содержания сажи, значения ρ_v приближаются к значениям ρ_v чистого композита.



Рис.5. Концентрационные зависимости удельного объемного электрического сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа

Fig.5. Concentration dependencies of the specific volumetric electrical resistivity for the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + carbon black

Обычно при рассмотрении полимерного диэлектрика, содержащего электропроводящие примеси (частицы) используется теория и модель Максвелл-Вагнеровской поляризации, которая приводит к следующим отношениям:

$$\varepsilon' = \varepsilon'_{\infty} \left(1 + \frac{k}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon'_{\infty} k \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{\infty} = \varepsilon'_1 \left[1 + \frac{3C(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1)}{2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2} \right] \quad (7)$$

$$k = \frac{9C(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1)}{2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\varepsilon'_\infty(2\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2)}{\sigma_2} = \varepsilon'_\infty(2\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2)\rho^2 \quad (9)$$

где, ε'_1 и ε'_2 - действительная часть диэлектрической проницаемости композита и включения, σ_1 и σ_2 - удельная проводимость соответственно композита и включения, ρ - удельное электрическое сопротивление, ε'_∞ - диэлектрическая проницаемость при высоких частотах, τ - время релаксации, ω - частота.

Из (9) следует, что время релаксации обратно пропорционально удельной проводимости включений, а ε' и ε'' композита и включений зависят от времени релаксации τ .

На рис. 6 и рис. 7 представлены логарифмические зависимости диэлектрической проницаемости от удельного объемного сопротивления композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП, содержащего наночастицы Al и сажи. Отсюда видно, что концентрационная зависимость $\varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ имеет сложнейший характер.

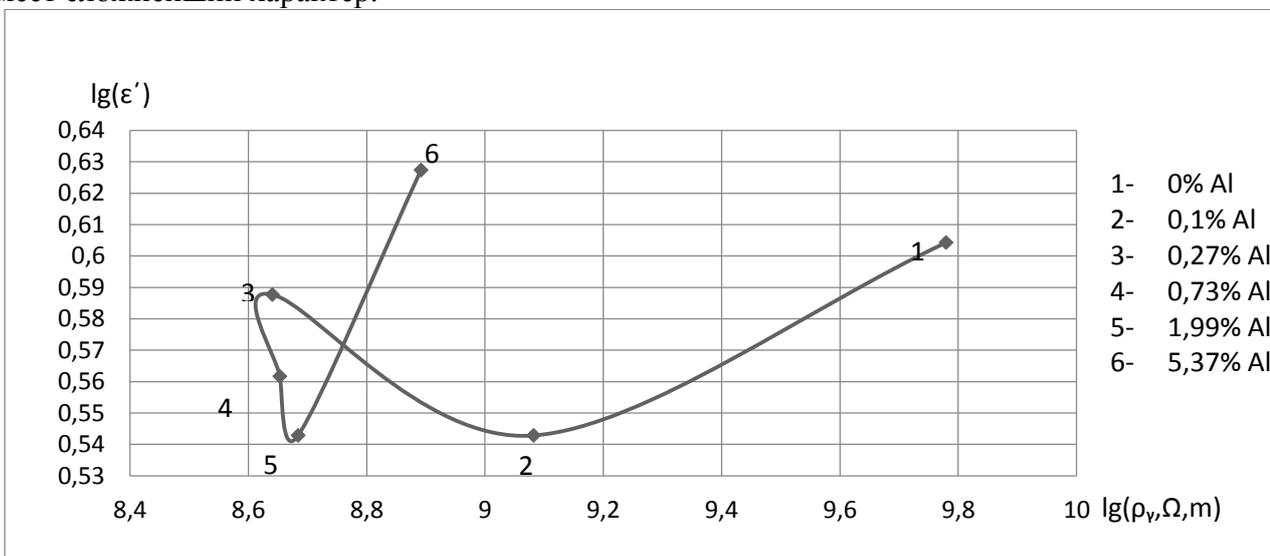


Рис.6. Логарифмическая зависимость диэлектрической проницаемости от объемного сопротивления композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + Al при температуре 300 К
Fig.6. Logarithmic dependence of the dielectric constant on the specific volume resistance of the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE + Al at a temperature of 300 K

До концентрации 0,27 масс% Al, ρ_v падает на полтора порядка, а диэлектрическая проницаемость практически не меняется. А при содержании в композите 0,73 масс% ε' уменьшается почти на 2 единицы.

При дальнейшем увеличении содержания Al величины ρ_v и ε' принимают среднестатистические значения, соответствующие исследуемому композиту, содержащему включения в виде наночастиц алюминия.

Подобное парадоксальное падение или рост различных физических параметров исследуемого композита при малых добавках наночастиц Al и сажи можно назвать - наноэффектом, который и наблюдается при исследовании механической прочности композита, при изучении плотности композита и количества частиц алюминия и сажи на поверхности композита.

Исходя из вышеизложенного, полученные концентрационные зависимости $\rho_v(C)$ и $\varepsilon'(C)$ и функция $\lg \varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ для исследуемого композита не представляется возможным объяснить в рамках модели Максвелл-Вагнеровской поляризации. Из рисунков 3-7 видно, что зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, $\lg \varepsilon' = f(\lg \rho_v)$ претерпевают существенные изменения в области малых добавок наночастиц Al и сажи в композите СКИ-3 80 масс. % + 20 масс. % ПЭНП. Причем природа наночастиц (Al или сажи) определяет, иногда при одинаковых концентрациях, диаметрально противоположное изменение некоторых электрических параметров исследуемого композита.

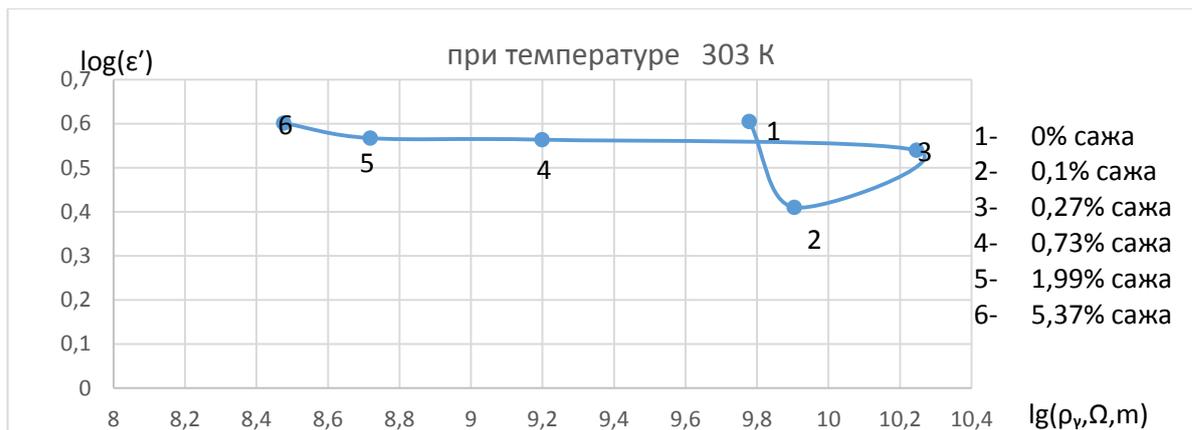


Рис.7. Логарифмические зависимости диэлектрической проницаемости от удельного объемного электрического сопротивления для композита 80% СКИ-3 + 20% ПЭНП + сажа
Fig.7. Logarithmic dependences of the dielectric constant on the specific volumetric electrical resistance for the composite 80% SKI-3 + 20% LDPE + soot

Эти результаты, как отмечено выше, невозможно объяснить ни Максвелл-Вагнеровской поляризацией диэлектриков с проводящими включениями, ни репационной моделью Хохлова-Гроссберга [6]. С целью объяснения полученных экспериментальных данных-диэлектрических параметров и удельной электрической проводимости нами проводились исследования структуры и морфологии, изменение плотности композита СКИ-380%+ ПЭНП 20%, с нано добавками Al и сажи методами электронной микроскопии, электронного теневого микроскопа и гидростатического взвешивания. Эти данные представлены на рис.8 и рис. 9 соответственно.

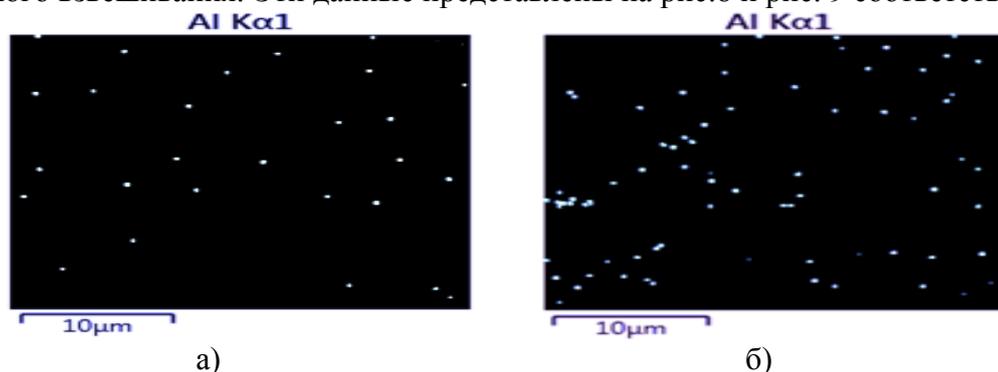


Рис.8. Распределение алюминия по поверхности СКИ-3, содержащего:
а) 0,1 масс. %; б) 5,37 масс. % частиц наполнителя
Fig.8. Aluminum distribution over the surface of SKI-3, containing:
а) 0.1 wt. %; б) 5.37 wt. % of the filler particles

Данные элементного сканирования поверхности, полученные на электронном микроскопе показывают (рис.8 а), что частицы алюминия при малых добавках равномерно распределяются в матрице композита. Однако при повышении содержания алюминия до 5,37 масс % определенная часть наночастиц выстраивается в линии 2-го порядка, возможно располагаясь на границах или очерчивая формы надмолекулярных образований в композите.

Такое расположение наночастиц Al в композите, по-видимому, связано с тем, что они занимают наиболее энергетически выгодные положения при смешении ингредиентов композита в расплаве. Авторы работы [10] наблюдали аналогичное распределение частиц технического углерода для некоторых гетерогенных полимерных смесей, которое приводило к сверхаддитивному электрическому сопротивлению. В работе [11] показано, что такое перераспределение частиц наполнителя обусловлено термодинамической выгодностью этого процесса и в подавляющем большинстве случаев наполнитель (выше 5масс %) локализуется на границе раздела фаз.

В отличие от инертного алюминия (из-за того, что частицы имеют оксидную пленку (Al_2O_3) сажа достаточно активна и ее наночастицы образуют агломераты размерами от 100 нм до 10 микрон (рис.9).



Рис.9. Снимок, полученный электронным теневым микроскопом для композита 80 масс. % СКИ-3 + 20 масс. % ПЭНП + 0,1 масс. % сажа

Fig.9. A photograph obtained by an electronic shadow microscope for a composite of 80 wt. % SCI-3 + 20 wt. % LDPE + 0.1 wt. % carbon black

Однако в процессе приготовления композита сажевые ассоциаты разрушаются до нанометров [12]. Авторы этой работы показали, что агломераты сажи дробятся на части под действием напряжений, возникающих при перемешивании. Другой подход состоит в том, что эти агломераты испытывают «коррозию», при которой из их поверхностей выламываются маленькие кусочки [13]. Авторы [13-14] показали, что работают оба механизма последовательно. На первых стадиях агломераты в основном разрушаются, а затем следует «коррозия».

Таким образом, наличие наночастиц Al в исследуемом композите выше 2,0 масс. % не оказывает существенного влияния на формирование макроскопических физических свойств и структуры данного композита.

Экспериментальные данные представленные на рис.3 (кривая 1), рис.5 и рис.7 для зависимостей $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$ и $lg \varepsilon' = (lg \rho_v)$, как отмечено выше, не укладываются в рамки известных моделей, что не позволяет объяснить структурными исследованиями. Но можно предположить существование особого эффекта – фрактальной поляризации для композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП+сажа.

В работе [15] показан факт зависимости микроскопических свойств композита от фрактального строения. Установлено, что внутри кластера сохраняется индивидуальность отдельных частиц, хотя со стороны кластер представляется как структурное образование с качественно другими новыми свойствами, которые отсутствуют у отдельных, составляющих частиц.

При исследовании геометрии кластеров возник термин - фрактальный кластер, представляющий ассоциацию связанных между собою частиц, имеющих фрактальное строение [16].

Комплексный характер сопротивления между отдельными кластерами сохраняется. Это означает, что при переменном напряжении на электродах конденсатора перезаряд перколяционного кластера происходит через значительные активные и емкостные сопротивления.

Процесс перезаряда перколяционного кластера вносит свой вклад в изменение обеих частей диэлектрической проницаемости. Описанный механизм подтверждается ходом кривых $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$ и рис.3 и рис. 5 высокими значениями фактора потерь ε'' (табл. 1) для композита, содержащего наночастицы сажи более 2 масс. %

Таблица 1. Значения фактора диэлектрических потерь ε'' , обусловленных электропроводимостью композита 80% СКИ-3+20% ПЭНП содержащих наночастицы Al и сажи

Table 1. Values of the dielectric loss factor ε'' , due to the electrical conductivity of the composite 80% of the SKI-3 + 20% LDPE containing Al and carbon black nanoparticles

№	Al , С.масс%	$\varepsilon'' \cdot 10^3$	Сажа, С. масс. %	$\varepsilon'' \cdot 10^3$
1	0	2,74	0	2,74
2	0,10	13,84	0,10	2,25
3	0,27	4,50	0,27	1,00
4	0,73	1,12	0,73	9,00
5	1,99	4,50	1,99	18,00
6	5,37	3,60	5,37	3,00

Вывод. Экспериментально исследованы зависимости диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления композита 80 масс% СКИ-3+20%масс% ПЭНП от концентрации наноразмерных частиц наполнителей алюминия и сажи.

Рассмотрены особенности этих кривых. Показано, что при малых содержаниях в композите наночастиц Al и сажи наблюдаются существенные изменения - экстремумы - на кривых зависимости $\varepsilon' = \varepsilon'(C)$, $\rho_v = \rho_v(C)$, не укладывающиеся в рамки модели Максвелл-Вагнеровской поляризации.

Библиографический список:

1. Wegner F. Classical electrodynamics (lecture notes). Franz Wegner. Institut für Theoretische Physik. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. 2003; 112: XV-XX.
2. Lopez-Ramos A., Menendez J.R. and Pique C. Conditions for the validity of Faraday's law of induction and their experimental confirmation. Eur. J. Phys. 2008; 29(5): 1069-1076.
3. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. IEE Electromagnetic Wave Series, 47. London: IEE, 1999; 284 p.
4. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Phys. Rev. Lett. 2000; 84 (18): 4184-4187.
5. Fenouillot F. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends. F. Fenouillot, P. Cassagnau, J.-C. Majeste. Polymer. 2009; 50 (6):1333–1350.
6. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров/ Пер с англ. М: Физматлит, 2008, 376с.
7. Сушко М.Я., Крискив С.К. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем// Журнал технической физики, 2009. - Т.79. - Вып.3. - с 97-101.
8. Соцков В.А. Экспериментальное исследование проводящих фронтальных фаз на диэлектрическую проницаемость композитов // Журнал технической физики, 2013. - Т.83 - Вып.10.- с.85-89.
9. Зайкин А.Е., Жаринова Е.А., Бикмуллин Р.С., Особенности локализации технического углерода на границе раздела полимерных фаз// Высокомолек. соед. А. 2007.- Т.49 - № 3- с. 499-509.
10. Адамсон А. Физическая химия поверхности. М.: Мир 1979.
11. Manas-Zloczower I., Nir A., Tadmor Z. /Depressive mixing in rubber and plastics// Rubber Chem. Tech. 1984 V. 57. № 3. P. 583-619.
12. Qi Li, Feki D.L., Manas-Zloczower I. Influence of aggregate structure and matrix infiltration on the dispersion behavior of carbon black agglomerates. Rubber.Chem.Technol., 1995, v.68, N.5, p.836-841.
13. Функциональные наполнители для пластмасс. / Под ред. М. Ксантоса. Пер. с англ. Кулезнева В.Н. – СПб: Научные основы и технологии, 2010 – 462 с.
14. Hong, S.M., Kim, J., Jana, S.C., 2003. The effects of shear-induced migration of conductive fillers on conductivity of injection molded articles. SPE ANTEC, 61, 1625-1629.
15. Смирнов Б.М. Физика фронтальных кластеров. М.:Наука, 1991. 136 с.
16. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982 с.58.

References:

1. Wegner F. Classical electrodynamics (lecture notes). Franz Wegner. Institut für Theoretische Physik. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. 2003; 112: XV-XX.
2. Lopez-Ramos A., Menendez J.R. and Pique C. Conditions for the validity of Faraday's law of induction and their experimental confirmation. Eur. J. Phys. 2008; 29(5): 1069-1076.
3. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. IEE Electromagnetic Wave Series, 47. London: IEE, 1999; 284 p.
4. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Phys. Rev. Lett. 2000; 84 (18): 4184-4187.
5. Fenouillot F. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends. F. Fenouillot, P. Cassagnau, J.-C. Majeste. Polymer. 2009; 50 (6):1333–1350.
6. Blayt E.R., Blur D. Elektricheskie svoystva polimerov. Per s angl. M.: Fizmatlit; 2008. 376 s. [Blayt E.R., Blur D. Polymer electrical properties. Translated from English. Moscow: Fizmatlit; 2008. 376 p. (in Russ.)]
7. Sushko M.Ya., Kris'kiv S.K. Metod kompaknykh grupp v teorii dielektricheskoy pronitsaemosti geterogennykh sistem. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2009;79(3):97-101. [Sushko M.Ya., Kris'kiv S.K.

- Compact group method in theory of dielectric permeability of heterogeneous systems. Technical physics. The Russian journal of applied physics. 2009;79(3):97-101. (in Russ.)]
8. Sotskov V.A. Eksperimental'noe issledovanie provodyashchikh frontal'nykh faz na dielektricheskuyu pronitsaemost' kompozitov. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2013; 83(10):85-89. [Sotskov V.A. Experimental investigation of frontal conductive phases onto dielectric permeability of composites. Technical physics. The Russian journal of applied physics. 2013; 83(10):85-89. (in Russ.)]
 9. Zaykin A.E., Zharinova E.A., Bikmullin R.S. Osobennosti lokalizatsii tekhnicheskogo ugleroda na granitse razdela polimernykh faz. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A - Fizika polimerov. 2007;49(3):499-509. [Zaykin A.E., Zharinova E.A., Bikmullin R.S. Features of technical carbon localisation on the polymer phase interface. Polymer Science Series A - Polymer Physics. 2007; 49(3):499-509. (in Russ.)]
 10. Adamson A. Fizicheskaya khimiya poverkhnosti. M.: Mir; 1979. 568 s. [Adamson A. Physical Chemistry of surface. Moscow: Mir; 1979. 568 p. (in Russ.)]
 11. Manas-Zloczower I., Nir A., Tadmor Z. Depressive mixing in rubber and plastics. Rubber Chem. Tech. 1984; 57(3): 583-619.
 12. Qi Li, Feke D.L., Manas-Zloczower I. Influence of aggregate structure and matrix infiltration on the dispersion behavior of carbon black agglomerates. Rubber.Chem.Technol. 1995; 68(5):836-841.
 13. Funktsional'nye napolniteli dlya plastmass. Pod red. M. Ksantosa. Per. s angl. Kulezneva V.N. SPb: Nauchnye osnovy i tekhnologii; 2010. 462 s. [Functional fillers for plastmasses. Ed. M. Ksantos. Translated from English by Kuleznev V.N. Saint-Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii; 2010. 462 p. (in Russ.)]
 14. Hong C.M., Kim J., Jana S.C. The effects of shear-induced migration of conductive fillers on conductivity of injection molded articles. SPE ANTEC. 2003; 61:1625-1629.
 15. Smirnov B.M. Fizika frontal'nykh klasterov. M: Nauka; 1991. 136 s. [Smirnov B.M. Physics of frontal clusters. Moscow: Nauka; 1991. 136 p. (in Russ.)]
 16. Landau L.D., Livshits E.M. Elektrodinamika sploshnykh sred. M.: Nauka; 1982. s.58. [Landau L.D., Livshits E.M. Electrodynamics of continuous media. Moscow: Nauka; 1982. p.58. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Ахриев Алихан Султанович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики.

Гайтукиева Зарета Хизировна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра теоретической физики.

Кунижев Борис Иналович – и.о. директора института физики и математики, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Тхакахов Руслан Баширович - доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики наносистем.

Information about the authors.

Alikhan S. Akhriev - Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics.

Zareta Kh. Gaytukieva - Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Theoretical Physics.

Boris I. Kunizhev - Dr. Sci. (Physics and Mathematical), Prof. Department of Theoretical Physics, Institute of Physics and Mathematics.

Ruslan B. Tkhakakhov - Dr. Sci. (Physics and Mathematical), Prof., Department of Nanosystem Physics, Institute of Physics and Mathematics

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 10.05.2017.

Принята в печать 08.06.2017.

Conflict of interest.

Received 10.05.2017.

Accepted for publication 08.06.2017.

Для цитирования: Кушнер Г.А., Мамонтов В.А., Халявкин А.А. Механика контактного взаимодействия гребного вала с дейдвудным подшипником при поперечных колебаниях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):28-36. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-28-36

For citation: Kushner G.A., Mamontov V.A., Khalyavkin A.A. Mechanics of contact interaction between propeller shaft and stern bearing under the transverse vibrations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):28-36. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-28-36

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-28-36

МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРЕБНОГО ВАЛА С ДЕЙДВУДНЫМ ПОДШИПНИКОМ ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Кушнер Г.А., Мамонтов В.А., Халявкин А.А.

Астраханский государственный технический университет,

414056, г. Астрахань, ул. Татищевая, 16, Россия,

¹e-mail: dinalt_13@mail.ru, ²e-mail: v.a.mamontov@bk.ru,

³e-mail: sopromat112@mail.ru

Резюме. Цель. В целях повышения точности расчетов при проектировании системы судового валопровода поставлена задача определения коэффициента жесткости материала дейдвудного подшипника с учетом его геометрических размеров. **Метод.** Рассмотрена контактная задача взаимодействия гребного вала с дейдвудным подшипником. Расчеты сводятся к решению контактной задачи балки на упругом основании, моделирующей в расчетной схеме гребной вал и дейдвудный подшипник. **Результат.** Приведена характеристика механических и упругих свойств основания Винклера. Составлены формулы для определения составляющих сил упругости и величин деформации. Проведено исследование на специальном приспособлении для определения коэффициента жесткости образцов из капролона. Получена зависимость для определения коэффициента жесткости дейдвудного подшипника с учетом его геометрических размеров и формы. Для исследований были изготовлены две партии образцов вкладышей: образцы различной длины (110, 90, 70 мм) толщиной 7 мм и образцы длиной 110 мм различной толщины (6 - 7 мм). Образцы сжимались под действием задаваемой нагрузки лабораторным испытательным гидравлическим прессом 6 тип П-125. Величина смещения образцов при сжатии измерялась нутромером согласно ГОСТ 4651-82. Полученные результаты подверглись статистической обработке при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. По средним значениям результатов исследования построен график зависимости величины сжатия образца от задаваемой нагрузки при различной длине образца. Среднее значение коэффициента жесткости образцов определялось в зоне пропорциональности. При дальнейшем увеличении нагрузки наблюдался нелинейный закон деформации образцов, о чем свидетельствует быстрое изменение длины и формы образцов. **Вывод.** Предложенная методика определения коэффициента жесткости дейдвудного подшипника с учетом его размеров позволяет более точно определить характеристику жесткости системы и может быть использована при проектных расчетах валопровода судна. Достоверность полученного результата гарантируется строгими математическими выкладками.

Ключевые слова: механика контакта, дейдвудный подшипник, коэффициент жесткости, поперечные колебания

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

MECHANICS OF CONTACT INTERACTION BETWEEN PROPELLER SHAFT AND
STERN BEARING UNDER THE TRANSVERSE VIBRATIONS

Guriy A. Kushner¹, Viktor A. Mamontov², Aleksey A. Khalyavkin³

¹⁻³Astrakhan State Technical University,

16 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia,

¹e-mail: dinalt_13@mail.ru, ²e-mail: v.a.mamontov@bk.ru,

³e-mail: sopromat112@mail.ru

Abstract Objectives In order to improve the accuracy of calculations in the design of ship shafting systems, the problem was to determine the stiffness coefficient of the stern bearing material taking into account its geometric dimensions. **Methods** The contact problem of interaction between a propeller shaft incorporating a stern bearing is considered. The calculations are reduced to solving the contact problem of a beam on an elastic base, which simulates a propeller shaft and a deadwood stern bearing in the design scheme. **Results** The characteristics of the mechanical and elastic properties of the Winkler base are given. Formulas are composed for determining the components of the elastic forces and deformation values. A study was carried out using a special device for determining the stiffness coefficient of samples made of caprolon. Dependency was obtained for the determination of the stern bearing stiffness coefficient, taking into account its geometric dimensions and shape. Two batches of sample inserts were made for the investigations: samples of different lengths (110, 90, 70 mm) with a thickness of 7 mm, and samples 110 mm long with various thicknesses (6-7 mm). The samples were compressed under the impact of a defined load by a test laboratory hydraulic press of P-125 type. The values of sample offset during compression were measured by an alesometer according to GOST 4651-82. The results obtained were statistically processed with a confidence level of $\alpha = 0.95$. Based on the average values of the results obtained, a dependency graph of the sample compression value was plotted against the defined load for different lengths of the sample. The average value of the sample stiffness coefficient was determined in the proportional zone. A nonlinear law of sample deformation was observed during a further load increase, as evidenced by a rapid change in the length and shape of the samples. **Conclusion** The proposed method for determining the stiffness coefficient of the stern bearing, taking into account its dimensions, allows the system's stiffness characteristic to be determined more accurately, and can be used in the design calculations of the ship's shaft. The reliability of the result is assured by rigorous mathematical calculations.

Keywords: contact mechanics, stern bearing, stiffness coefficient, transversal vibrations

Введение. Проблема повышения и долговечности валопроводов судов является актуальной для судостроения. Нарушения работоспособности валопровода приводят к снижению скорости хода судна или полной потере хода. Отказы системы валопровода судна стоят на втором месте по количеству отказов [1] и составляют около четверти всех отказов оборудования на судне (рис. 1).

Согласно требованиям мировых классификационных обществ, при проектировании судового валопровода обязательным является его расчет на колебания.

Особое внимание уделено требованиям к расчету поперечных колебаний, в которых судостроители должны обеспечить, чтобы характеристики поперечных колебаний были удовлетворительными во всем диапазоне рабочих частот вращения валопровода [2 -3].

Точность расчета поперечных колебаний обусловлена возникающим неустойчивым состоянием валопровода, при котором даже на малых рабочих частотах возможно возникновение явления резонанса, приводящего к поломке системы [4].

Несмотря на наличие большого опыта в области проектирования и эксплуатации судовых валопроводов, причины и случаи их аварии еще не изжиты [5, 6].

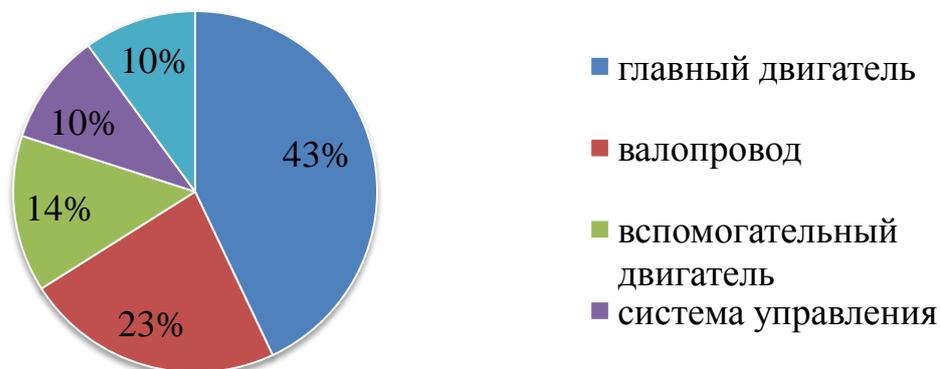


Рис.1. Статистические данные возникновения отказов
Fig.1. Statistics of the occurrence of failures

Постановка задачи. В целях повышения точности расчетов при проектировании системы судового валопровода, необходимо рассмотреть задачу контактного взаимодействия гребного вала с дейдвудным подшипником.

Для расчета поперечных колебаний валопровода судна составляются расчетные схемы, где дейдвудный подшипник моделируется упругим основанием Винклера [7-9]. Расчеты сводятся к решению контактной задачи балки на упругом основании, моделирующей в расчетной схеме гребной вал и дейдвудный подшипник.

В большинстве расчетных схем, реакция действия нагрузки на упругое основание рассчитывается по формуле, согласно гипотезе основания Винклера:

$$q = -ky, \quad (1)$$

где, $k = k_{\text{п}} \cdot b$ – коэффициент пропорциональности величины деформации и реакции основания;

$k_{\text{п}}$ – коэффициент жесткости размерностью Н/м³;

b – ширина балки, м.

Механические и упругие свойства основания Винклера характеризуются параметром $k_{\text{п}}$, который называется коэффициентом жёсткости или коэффициентом постели основания.

Коэффициент постели упругого основания определяется по формуле [10]:

$$k_{\text{п}} = \frac{p}{l}, \quad (2)$$

где, p – давление, прикладываемое к упругому основанию, Н/м²;

l – осадка упругого основания от приложенной нагрузки, м.

Одним из главных предпосылок для повышения степени достоверности расчета конструкций на упругом основании является правильный выбор коэффициента жесткости $k_{\text{п}}$.

Обзор работ по расчетам валопровода показал, что во многих работах приводится только численное значение коэффициента жесткости материала k дейдвудных подшипников без ссылки на источники. Значение коэффициента жесткости k для капролона в работах [11 -12] принято равным 1 Па , в других работах [13 -14] коэффициент жесткости для капролона принимается равным $0,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Используемые методы расчета не предусматривают корректировку коэффициента жесткости материала дейдвудного подшипника с учетом его геометрических размеров.

Методы исследования. Для определения коэффициента жесткости материала дейдвудного подшипника рассмотрим контактную задачу. Пересечем подшипник с находящимся внут-

ри него валом двумя плоскостями, перпендикулярными оси вала, находящимися на расстоянии $\Delta\xi$ друг от друга.

Рассмотрим цилиндрический элемент системы «подшипник–вал», заключенный между этими плоскостями (рис.2).

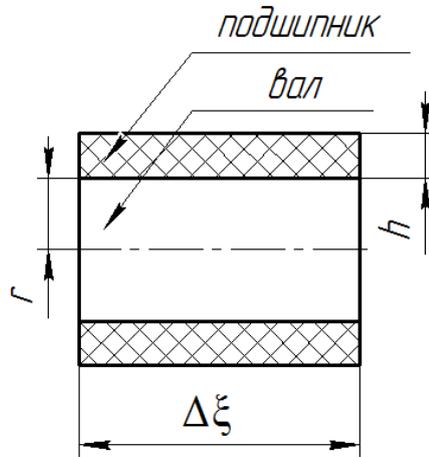


Рис.2. Цилиндрический элемент: r – радиус гребного вала; h – толщина дейдвудного подшипника

Fig.2. Cylindrical element: r - radius of the propeller shaft; h is the thickness of the stern bearing

Считая подшипник неизношенным, сместим вал на расстояние δ , то есть расстояние между центром вала и центром подшипника будет равно:

$$|OO'| = \delta. \quad (3)$$

Без ограничения общности можно принять, что вал сместился по вертикали вниз.

Несмещенное и смещенное сечение вала обозначим через S и соответственно S' (рис.3).

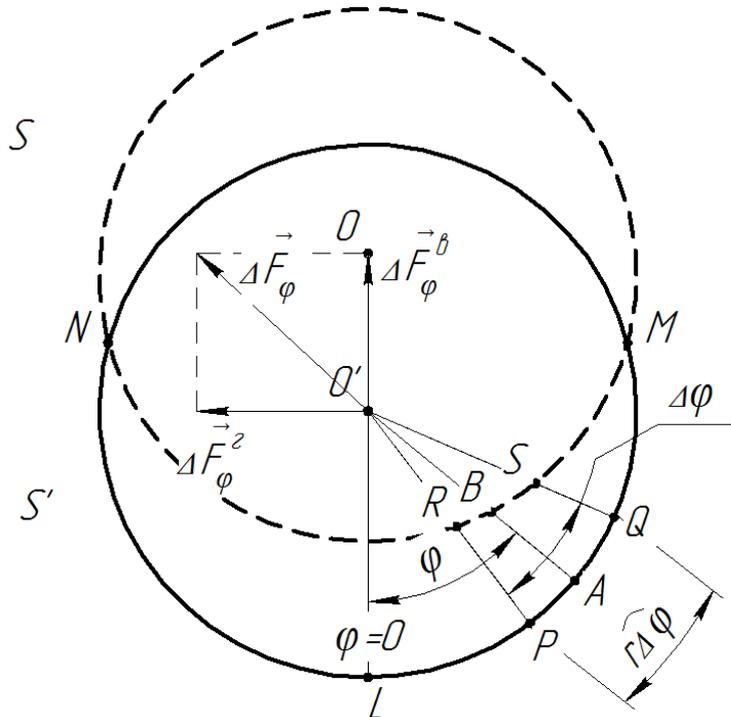


Рис.3. Схема реакции упругого основания
Fig.3. Scheme of the reaction of the elastic base

На окружности выберем малую дугу PAQ с угловой координатой φ и радианной мерой центрального угла $\Delta\varphi$.

Отсчет угла ведем от вертикального луча OL . За положительное направление примем поворот против часовой стрелки. Угловая длина дуги PAQ равна $r\Delta\varphi$.

Сила упругости $\Delta\vec{F}_\varphi$, создаваемая малым элементом объема подшипника $PRSQP_1R_1S_1Q_1$ (рис.4), приложена к центру смещенного вала O' и направлена по прямой AO' . Эта сила раскладывается на горизонтальную и вертикальную составляющие:

$$\Delta\vec{F}_\varphi = \Delta\vec{F}_\varphi^B + \Delta\vec{F}_\varphi^G. \quad (4)$$

Найдем модуль вертикальной составляющей $\Delta\vec{F}_\varphi^B$. Согласно закону Гука, нормальное напряжение в поперечном сечении элемента подшипника RR_1S_1S равно:

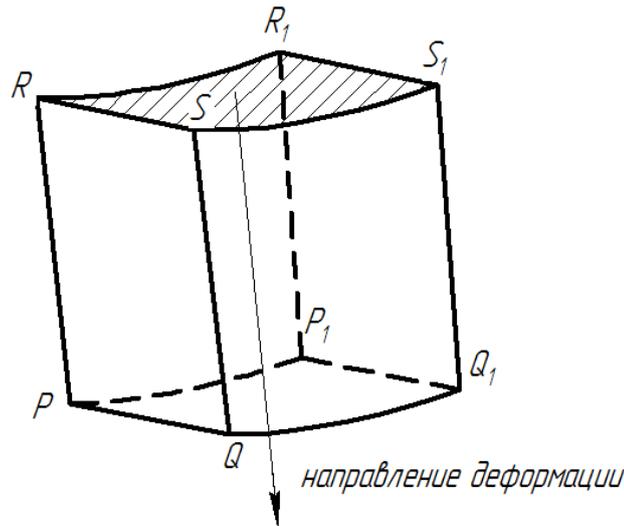


Рис.4.Элемент подшипника
 Fig.4. Bearing element

С другой стороны,

$$\sigma_\varphi = E_\Pi \frac{\Delta h}{h}, \quad (5)$$

где: E_Π – модуль Юнга материала подшипника;

h – толщина стенки недеформированного подшипника;

$\Delta h = |AB|$ – величина деформации малого элемента подшипника.

Поэтому модуль силы $\Delta\vec{F}_\varphi$ равен:

$$|\Delta\vec{F}_\varphi| = \frac{E_\Pi r \Delta\varphi \Delta\xi \Delta h}{h} \quad (6)$$

Найдем величину деформации Δh . Рассмотрим треугольник $OO'B$ (рис.2):

$$\angle OO'B = \pi - \varphi, |OB| = r, |OO'| = \delta.$$

Применив теорему косинусов, получим квадратное уравнение:

$$x^2 + 2\delta\cos\varphi \cdot x + \delta^2 - r^2 = 0,$$

где $x = |O'B|$.

Его дискриминант:

$$D = 4(r^2 - \delta^2\sin^2\varphi) > 0,$$

так как мы считаем смещение малым $\delta < r$.

Поэтому $x = \sqrt{r^2 - \delta^2\sin^2\varphi} - \delta\cos\varphi$, тогда $|AB| = |O'A| - |O'B| = r - x = r + \delta\cos\varphi - \sqrt{r^2 - \delta^2\sin^2\varphi}$.

Получим выражение искомой величины деформации:

$$\Delta h = r + \delta \cos \varphi - \sqrt{r^2 - \delta^2 \sin^2 \varphi}. \quad (7)$$

Тогда:

$$|\Delta \vec{F}_\varphi| = \frac{1}{h} \left(E_{\text{п}} r \Delta \varphi \Delta \xi (r + \delta \cos \varphi - \sqrt{r^2 - \delta^2 \sin^2 \varphi}) \right). \quad (8)$$

Модуль вертикальной составляющей этой силы равен:

$$|\Delta \vec{F}_\varphi^{\text{В}}| = |\Delta F_\varphi| \cos \varphi = \frac{E_{\text{п}} r}{h} (r + \delta \cos \varphi - \sqrt{r^2 - \delta^2 \sin^2 \varphi}) \cos \varphi \cdot \Delta \varphi \Delta \xi. \quad (9)$$

Суммируя силы $\Delta F_\varphi^{\text{В}}$ по дуге $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$ и переходя к пределу, при $\Delta \varphi \rightarrow 0$, получим выражение для вертикальной составляющей силы упругости, действующей на вал со стороны подшипника:

$$F_{\text{упр}}^{\text{В}} = \frac{E_{\text{п}} r \Delta \xi}{h} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (r + \delta \cos \varphi - \sqrt{r^2 - \delta^2 \sin^2 \varphi}) \cos \varphi d\varphi = \frac{E_{\text{п}} r \Delta \xi}{h} \left(\frac{\pi}{2} \delta - r^2 \frac{1}{\delta} \arcsin \frac{\delta}{r} - \sqrt{r^2 - \delta^2} + 2r \right) \quad (10)$$

Полагая величину смещения δ малой, и раскладывая правую часть последней формулы в степенной ряд в окрестности точки $\delta = 0$, получим значение силы упругости

$$F_{\text{упр}}^{\text{В}} = \frac{E_{\text{п}} r \Delta \xi}{h} \left(\frac{\pi}{2} \delta + \frac{1}{3r} \delta^2 + \frac{1}{20r^3} \delta^4 + \sigma(\delta^6) \right) \quad (11)$$

Пренебрегая членами второго порядка относительно δ , получим приближенное выражение для силы упругости, действующей со стороны подшипника на элемент $\Delta \xi$:

$$F_{\text{упр}} = \frac{\pi E_{\text{п}} r \Delta \xi}{2h} \delta \quad (12)$$

Таким образом, коэффициент жесткости дейдвудного подшипника с учетом его геометрических размеров и формы будет равен:

$$k = \frac{\pi E_{\text{п}} r}{2h} \quad (13)$$

Обсуждение результатов. Для оценки влияния геометрических размеров и формы подшипника на коэффициент постели основания было проведено исследование на специальном приспособлении для определения коэффициента жесткости образцов из капролона (рис.5).

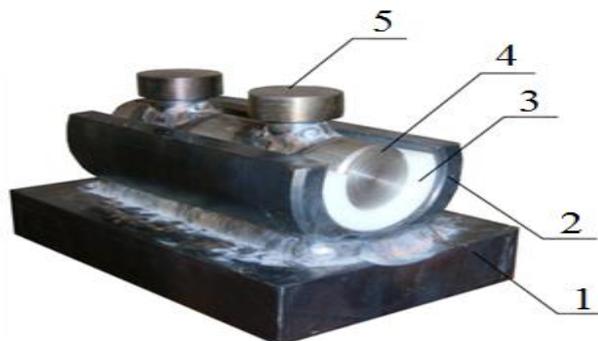


Рис.5. Общий вид специального приспособления
Fig.5. General view of the special device

Методика эксперимента заключалась в следующем. Приспособление состоит из основания 1, усеченного цилиндра 2, в который устанавливается капролоновый вкладыш 3, нажимной втулки 4 и пяток 5.

Для исследований были изготовлены две партии образцов вкладышей: образцы различной длины (110, 90, 70 мм) толщиной 7 мм и образцы длиной 110 мм различной толщины (6, 6.5, 7 мм). Образцы сжимались под действием задаваемой нагрузки лабораторным испытательным гидравлическим прессом 6 тип П-125. Величина смещения образцов при сжатии измерялась нутромером согласно ГОСТ 4651-82. Согласно требованиям проведения измерений при малой выборке, в эксперименте использовано небольшое число параллельных измерений.

Полученные результаты подверглись статистической обработке при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

По средним значениям результатов исследования построен график зависимости величины сжатия образца δ от задаваемой нагрузки P при различной длине образца l (рис. 6).

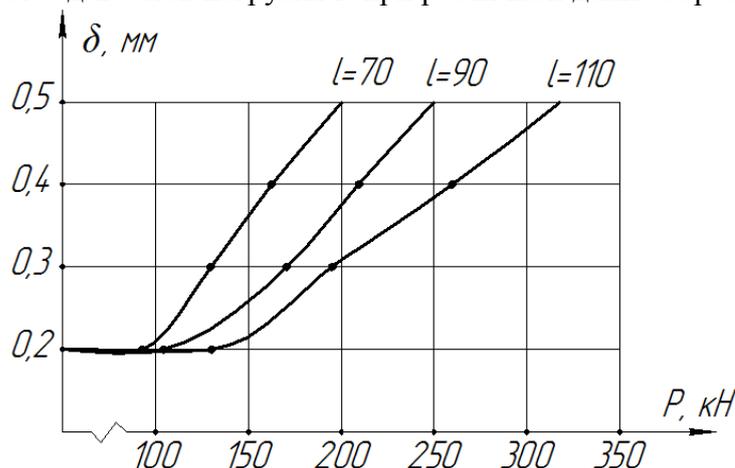


Рис.6. Зависимость сжатия образца от задаваемой нагрузки
Fig.6. Dependence of the sample compression on the specified load

Среднее значение коэффициента жесткости образцов определялось в зоне пропорциональности, поскольку при дальнейшем увеличении нагрузки наблюдается нелинейный закон деформации образцов, о чем свидетельствует быстрое изменение длины и формы образцов (рис. 7).

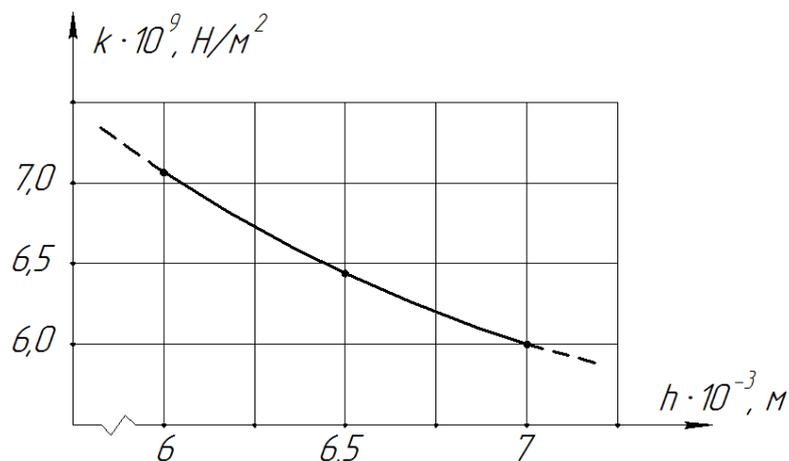


Рис.7. Зависимость коэффициента жесткости основания от толщины подшипника
Fig.7. Dependence of the rigidity of the base on the thickness of the bearing

Среднее значение коэффициента жесткости подшипника длиной 110 мм, полученного при эксперименте, составляет $k_{\text{эксп}} = 6,73 \cdot 10^9$ (Н/м²) от значения коэффициента жесткости $k_{\text{теор}} = 6,4 \cdot 10^9$ (Н/м²), полученного по предлагаемой методике составляет:

$$\left| \frac{k_{\text{теор}} - k_{\text{эксп}}}{k_{\text{теор}}} \right| \cdot 100\% = 5,2\% \quad (14)$$

Вывод. Полученный результат позволяет сделать вывод, что предложенная методика определения коэффициента жесткости дейдвудного подшипника с учетом его размеров позволяет более точно определить характеристику жесткости системы и может быть использована при проектировочных расчетах валопровода судна.

Библиографический список:

1. Henderson K. Analysing the causes of propulsion shaft failure. Marine Propulsion & auxiliary machinery. August/September 2010. – p. 67-68.
2. Kozousek V. M., Davies P. Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems: Shaft Alignment //Lloyd's Register's Technical Association, Paper. – 2000. – Т. 5.
3. Лобастов В. П. Особенности проектирования транспортных систем смешанного (река-море) сообщения //Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – №. 3. – С. 180.
4. Рассказов Е. В. Оценка технического состояния судового валопровода без его разборки. – Владивосток : Дальрыбвтуз (ТУ), 1996.
5. Besnier F. et al. Evaluation of main engine and propeller excitations of ship hull and superstructure vibration //International shipbuilding progress. – 2008. – Т. 55. – №. 1-2. – С. 3-27.
6. Чура М. Н., Файвисович А. В. Эксплуатационные повреждения гребных валов //Транспортное дело России. – 2011. – №. 11.
7. Бобовский В.А. Исследование влияния коэффициента жесткости дейдвудного подшипника на изгибные характеристики гребного вала / В.А. Бобовский, Б.В. Гольцев, Г.А. Лаврушин, Д.А. Митюгов// Труды Дальневосточного государственного технического университета.- 2001.- № 129.- С. 237- 240.
8. Миронов А.И. О возможности возникновения параметрических колебаний в системе валопровода / А.И. Миронов, А.А. Халявкин // Вестник Астраханского государственного технического университета, серия «Морская техника и технология».- 2010.- № 1.- С.131-135.
9. Batrak Y. Lateral Vibration Prediction Issues [J] //Shaft Designer. – 2011.
10. Красюк А.Г. Расчет балок на сплошном упругом основании со ступенчатым изменением жесткости / А.Г. Красюк // Залізничний транспорт України.- 2003.- №5.- С. 12-14.
11. Денисова Л.М. Исследование поперечных колебаний гребных валов / Л.М. Денисова, А.И. Миронов // Вестник Астраханского государственного технического университета.- 2005.- № 2 (25).- С. 98-103.
12. Денисова Л.М. К исследованию поперечных колебаний валопроводов судов / Денисова Л.М., А.И. Миронов, А.А. Халявкин // Вестник Астраханского государственного технического университета, серия «Морская техника и технология».- 2010.- № 1.- С. 95-99.
13. Проников А.С. Надёжность машин / А.С. Проников - М.: Машиностроение, 1978.- 592 с.
14. Рубин М.Б. Подшипники в судовой технике: Справочник / М.Б. Рубин, В.Е. Бахарева.- Л.: Судостроение, 1987.- 344 с.

References:

1. Henderson K. Analysing the causes of propulsion shaft failure. Marine Propulsion & auxiliary machinery. August/September 2010;67-68.
2. Kozousek V. M., Davies P. Analysis and Survey Procedures of Propulsion Systems: Shaft Alignment. Lloyd's Register's Technical Association, Paper. 2000. Vol. 5.
3. Lobastov V. P. Osobennosti proektirovaniya transportnykh sistem smeshannogo (reka-more) soobshcheniya. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. 2010;3. p. 180. [Lobastov V. P. Features of transport system design of mixed (river-sea) connection. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2010;3. p. 180. (in Russ.)]
4. Rasskazov E. V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo valoprovoda bez ego razborki. Vladivostok: Dal'rybvuz (TU); 1996. [Rasskazov E. V. Ship's propeller shaft technical state assessment without disassembling it. Vladivostok: Dal'rybvuz (TU); 1996. (in Russ.)]
5. Besnier F. et al. Evaluation of main engine and propeller excitations of ship hull and superstructure vibration. International shipbuilding progress. 2008; 55(1-2):3-27.
6. Chura M. N., Fayvisovich A. V. Ekspluatatsionnye povrezhdeniya grebnykh valov. Transportnoe delo Rossii. 2011;11. [Chura M. N., Fayvisovich A. V. Propeller shaft damage during exploitation. Transport business of Russia. 2011;11. (in Russ.)]

7. Bobovskiy V.A., Gol'tsev B.V., Lavrushin G.A., Mityugov D.A. Issledovanie vliyaniya koeffitsienta zhestkosti deydvnogo podshipnika na izgibnye kharakteristiki grebnogo vala. Trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2001;129:237- 240. [Bobovskiy V.A., Gol'tsev B.V., Lavrushin G.A., Mityugov D.A. Investigation of stern bearing stiffness coefficient influence on bending features of propeller shaft. Proceedings of the Far Eastern Federal University. 2001;129:237- 240. (in Russ.)]

8. Mironov A.I., Khalyavkin A.A. O vozmozhnosti vzniknoveniya parametricheskikh kolebaniy v sisteme valoprovoda. Vestnik AGTU, seriya "Morskaya tekhnika i tekhnologiya". 2010;1:131-135. [Mironov A.I., Khalyavkin A.A. On the possibility of parametric vibrations emerging in the propeller shaft system. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2010;1:131-135. (in Russ.)]

9. Batrak Y. Lateral Vibration Prediction Issues. Shaft Designer. 2011.

10. Krasnyuk A.G. Raschet balok na sploshnom uprugom osnovanii so stupenchatym izmeneniyem zhestkosti. Zaliznichniy transport Ukraïni. 2003;5:12-14. [Krasnyuk A.G. Calculation of beam with sheer elastic base with stepwise stiffness alteration. Zaliznichniy transport Ukraïni. 2003;5:12-14. (in Russ.)]

11. Denisova L.M., Mironov A.I. Issledovanie poperechnykh kolebaniy grebnykh valov. Vestnik AGTU. 2005;2(25):98-103. [Denisova L.M., Mironov A.I. Investigation of transversal vibrations of propeller shafts. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2005;2(25):98-103. (in Russ.)]

12. Denisova L.M., Mironov A.I., Khalyavkin A.A. K issledovaniyu poperechnykh kolebaniy valoprovodov sudov. Vestnik AGTU, seriya "Morskaya tekhnika i tekhnologiya". 2010;1: 95-99. [Denisova L.M., Mironov A.I., Khalyavkin A.A. On the investigation of transversal vibrations of ship propeller shafts. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2010;1:95-99. (in Russ.)]

13. Pronikov A.S. Nadezhnost' mashin. M.: Mashinostroenie; 1978. 592 s. [Pronikov A.S. Machine reliability. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 592 p. (in Russ.)]

14. Rubin M.B., Bakhareva V.E. Podshipniki v sudovoy tekhnike: Spravochnik.L.: Sudostroenie; 1987. 344 s. [Rubin M.B., Bakhareva V.E. Bearings in ship engineering: reference book. Leningrad: Sudostroenie; 1987. 344 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Гурий Алексеевич Кушнер - ассистент, кафедра «Судостроение и энергетические комплексы морской техники».

Виктор Андреевич Мамонтов – доктор технических наук, профессор, кафедра «Судостроение и энергетические комплексы морской техники».

Алексей Александрович Халывкин - кандидат технических наук, кафедра «Судостроение и энергетические комплексы морской техники».

Information about the authors.

Guriy A. Kushner - Assistant, Department of Ship-building and Energetic Complexes of Marine Engineering.

Viktor A. Mamontov - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Ship-building and Energetic Complexes of Marine Engineering.

Aleksey A. Khalyavkin - Cand. Sci. (Technical), Department of Ship-building and Energetic Complexes of Marine Engineering.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 30.05.2017.

Received 30.05.2017.

Принята в печать 17.06.2017.

Accepted for publication 17.06.2017.

Для цитирования: Пайзулаев М.М., Рашидова Е.В., Соболев Б.В. Концентрация напряжений в вершинах радиальной трещины в стенке трубы с тонким покрытием. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):37-45. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-37-45

For citation: Sobol' B.V., Payzulaev M.M., Rashidova E.V. Strain concentration in apices of radial cracks in a thin coated pipe wall. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):37-45. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-37-45

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 531, 539.4, 539.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-37-45

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНАХ РАДИАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ В СТЕНКЕ ТРУБЫ С ТОНКИМ ПОКРЫТИЕМ

Пайзулаев М.М.³, Рашидова Е.В.², Соболев Б.В.¹

^{1,2}Донской государственный технический университет,
344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

³Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

¹e-mail: b.sobol@mail.ru, ²e-mail: el.rash@mail.ru, ³e-mail: smdstu@mail.ru

Резюме. Цель. Известный метод разрывных решений, применяемый при исследовании бесконечных и полубесконечных областей, обобщен при построении решений в рядах Фурье. Это позволяет свести задачу механики деформируемого твердого тела для ограниченной области, содержащей разрез или включения, к решению интегрального уравнения (или системы) относительно разрывов определяемых функций. **Метод.** Метод реализован в применении к решению задачи теории упругости для сечения трубы (плоская деформация), ослабленного внутренней радиальной трещиной. Труба нагружена гидростатическим давлением; на ее внутреннюю поверхность нанесено тонкое покрытие, улучшающее ее физико-механические свойства. Применяемый метод, в сочетании со стандартным интегральным преобразованием, может быть эффективно использован при построении разрывных решений трехмерных задач теории упругости. **Результат.** В качестве модели покрытия использованы специальным образом сформулированные граничные условия. С целью проверки адекватности принятой модели, проведен цикл численных экспериментов. В одних случаях, проведены расчеты сечения трубы с покрытием в конечно-элементных пакетах ANSYS и COMSOL. В других, с использованием широких возможностей пакета FlexPDE, была построена модель трубы без покрытия, но с применением специальных граничных условий. Сравнение полученных результатов позволило удостовериться в адекватности построенных моделей в определенном диапазоне геометрических и физических параметров. **Вывод.** Задача сведена к решению сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши относительно производной скачка тангенциальной компоненты вектора перемещений на берегах трещины. Его решение строится методом коллокаций с заранее выделенной особенностью. Конечной целью исследования является определение значений коэффициента интенсивности напряжений в вершинах трещины.

Ключевые слова: ряд Фурье, трещина, труба, теория упругости, плоская деформация, напряжения, метод малого параметра, метод коллокаций

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

STRAIN CONCENTRATION IN APICES OF RADIAL CRACKS IN A THIN
COATED PIPE WALL

Magomed M. Payzulaev³, Elena V. Rashidova², Boris V. Sobol'¹

^{1,2}Don State Technical University,

1 Gagarina square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

³Dagestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave, Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: b.sobol@mail.ru, ²e-mail: el.rash@mail.ru, ³e-mail: smdstu@mail.ru

Abstract Objectives The well-known discontinuous solution method, used in the study of infinite and semi-infinite domains, is generalised during the construction of solutions in Fourier series. This makes it possible to reduce the problem of the mechanics of a deformable solid for a limited region containing cuts or inclusions to the solution of an integral equation (or system) with respect to discontinuities of the functions being defined. **Methods** The method was implemented through the application to the solution of the theoretical elasticity problem for a pipe section (plane deformation) weakened by an internal radial crack. The pipe was loaded with hydrostatic pressure and a thin coating is applied on its inner surface, improving its physical and mechanical properties. The applied method, combined with the conventional integral transformation, can be effectively used in the construction of discontinuous solutions of three-dimensional problems of the theory of elasticity. **Results** Specially formulated boundary conditions were used as a coating model. In order to verify the adequacy of the adopted model, a series of numerical experiments was carried out. In some cases, calculations were carried out for the cross-section of a coated pipe in finite-element ANSYS and COMSOL software packages. In others, benefiting from the extensive capabilities of the FlexPDE software package, an uncoated pipe model was constructed, although using special boundary conditions. Comparison of the results obtained made it possible to ascertain the adequacy of the models constructed across a certain range of geometric and physical parameters. **Conclusion** The problem is reduced to the solution of a singular integral equation with a Cauchy kernel with respect to the derivative of the jump in the tangential component of the displacement vector on the crack edges. Its solution is determined by the collocation method with a pre-selected feature. The ultimate goal of the study is to determine the values of the strain intensity coefficient at the apices of the crack.

Keywords: Fourier series, crack, pipe, theory of elasticity, plane deformation, strains, small parameter and collocation methods

Введение. Анализ мирового опыта расчета элементов с дефектами подтверждает обоснованность поиска эффективных методов расчета материалов с трещинами [1-16].

Постановка задачи Метод разрывных решений, применяемый при исследовании бесконечных и полубесконечных областей, обобщен при построении решений в рядах Фурье. Это позволяет свести задачу механики деформируемого твердого тела для ограниченной области, содержащей разрез или включения, к решению интегрального уравнения (или системы) относительно разрывов определяемых функций.

Метод реализован в применении к решению задачи теории упругости для сечения трубы (плоская деформация), ослабленного внутренней радиальной трещиной. Труба нагружена гидростатическим давлением; на ее внутреннюю поверхность нанесено тонкое покрытие, улучшающее ее физико-механические свойства. В качестве модели покрытия использованы специальным образом сформулированные граничные условия.

С целью проверки адекватности принятой модели, проведен цикл численных экспериментов. В одних случаях, проведены расчеты сечения трубы с покрытием в конечно-

элементных пакетах ANSYS и COMSOL [6]. В других, с использованием широких возможностей пакета FlexPDE, была построена модель трубы без покрытия, но с применением специальных граничных условий. Сравнение полученных результатов позволило удостовериться в адекватности построенных моделей в определенном диапазоне геометрических и физических параметров.

Методы исследования. Задача сведена к решению сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши относительно производной скачка тангенциальной компоненты вектора перемещений на берегах трещины. Ее решение строится методом коллокаций с заранее выделенной особенностью. Конечной целью исследования является определение значений коэффициента интенсивности напряжений в вершинах трещины.

Рассмотрим плоскую задачу теории упругости для ограниченной области $|\xi| \leq l$, $l_1 \leq \eta \leq l_2$ в произвольной ортогональной системе координат. Предположим, что компоненты вектора перемещений и их нормальные производные терпят разрыв на некотором отрезке вдоль одной из координатных линий

$$u_i(\xi^* - 0, \eta) - u_i(\xi^* + 0, \eta) = X_i(\eta) \quad (i = 1, 2)$$

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \right|_{(\xi^* - 0, \eta)} - \left. \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \right|_{(\xi^* + 0, \eta)} = \Psi_i(\eta) \quad (\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2) \quad (1)$$

причем, две из этих четырех функций предполагаются известными, а две другие – подлежащими определению.

Решение задачи строится в виде ($\lambda_k = k\pi l^{-1}$):

$$u_i(\xi, \eta) = \frac{a_{0i}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_{ki}(\eta) \cos \lambda_k \xi + b_{ki}(\eta) \sin \lambda_k \xi$$

$$a_{ki} = \frac{1}{l} \int_{-l}^l u_i(\xi, \eta) \cos \lambda_k \xi d\xi, \quad b_{ki} = \frac{1}{l} \int_{-l}^l u_i(\xi, \eta) \sin \lambda_k \xi d\xi \quad (2)$$

При реализации разложений вида (2) в уравнениях равновесия (или движения) необходимо предварительно определить вид разложений

$$\frac{\partial u_i}{\partial \xi} = \frac{c_{0i}(\eta)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_{ki}(\eta) \cos \lambda_k \xi + d_{ki}(\eta) \sin \lambda_k \xi$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi^2} = \frac{e_{0i}(\eta)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} e_{ki}(\eta) \cos \lambda_k \xi + g_{ki}(\eta) \sin \lambda_k \xi \quad (3)$$

При построении разрывных решений в тригонометрических рядах воспользуемся идеей обобщенного метода интегральных преобразований [1]. Если при определении коэффициентов разложений (3) разбить отрезок интегрирования на два $\xi \in [-l, \xi^* - 0) \cup (\xi^* + 0, l]$ и применить формулу интегрирования по частям, то, с учетом введенных обозначений (1.1), непосредственные вычисления позволяют выразить коэффициенты разложений (3) через a_{ki}, b_{ki}, X_i и Ψ_i ($k=0, 1, 2, \dots; i=1, 2$):

$$c_{ki}(\eta) = \lambda_k b_{ki}(\eta) + l^{-1} \cos \lambda_k \xi^* X_i(\eta) + (-1)^k l^{-1} u_i \Big|_{(-l, \eta)}^{(l, \eta)}$$

$$d_{ki}(\eta) = -\lambda_k a_{ki}(\eta) + l^{-1} \sin \lambda_k \xi^* X_i(\eta)$$

$$e_{ki}(\eta) = \lambda_k d_{ki}(\eta) + l^{-1} \cos \lambda_k \xi^* \Psi_i(\eta) + (-1)^k l^{-1} \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \Big|_{(-l, \eta)}^{(l, \eta)}$$

$$g_{ki}(\eta) = -\lambda_k c_{ki}(\eta) + l^{-1} \sin \lambda_k \xi^* \Psi_i(\eta) \quad (4)$$

В результате система уравнений равновесия (или движения) распадается на бесконечную последовательность систем обыкновенных дифференциальных уравнений для каждой из гармоник. Очевидно, граничные условия задачи на координатных линиях $\eta = l_1$, $\eta = l_2$ предварительно должны быть представлены в виде соответствующих разложений.

Полученные частные решения краевых задач для каждой из гармоник суммируются в ряды, после чего представляется возможным удовлетворить двум заданным условиям вдоль линий разрыва. Описанный алгоритм позволяет в общем случае свести задачу к системе пары интегральных уравнений второго рода относительно двух функций из (1), подлежащих определению. Очевидно, в случае симметрии задачи относительно координатной линии $\xi = \xi^*$, между двумя неизвестными функциями из (1) можно установить простую связь и одну из них исключить из рассмотрения, а каждое из разложений (2), (3) будет содержать только четные (или нечетные) гармоники. Заметим, что описанный метод, в сочетании со стандартным интегральным преобразованием, может быть эффективно использован при построении разрывных решений трехмерных задач теории упругости. В качестве примера подобного сочетания можно назвать работу [2], где вдоль оси, пересекающей разрез, применяется обобщенное интегральное преобразование Фурье, а вдоль оси, где все определяемые функции являются гладкими – стандартное интегральное преобразование Фурье.

Кольцевая область с покрытием, ослабленная радиальным разрезом. Рассмотрим задачу о плоской деформации упругого кольца $a \leq r \leq b$, содержащего разрез вдоль луча $\varphi = 0$ на интервале $c \leq r \leq d$. На внутренней границе кольца, усиленной тонким гибким покрытием толщины h , действует гидростатическое давление интенсивности p ; внешняя граница ($r = b$) свободна от внешних воздействий. Очевидно, при такой нагрузке трещина будет находиться в раскрытом состоянии, и ее берега предполагаются свободными от напряжений (рис.1).

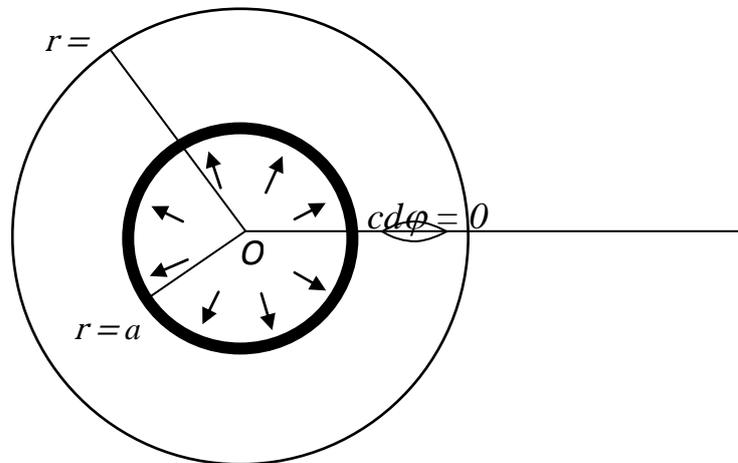


Рис. 1. Кольцевая область с покрытием, ослабленная радиальным разрезом

Fig. 1. Coated ring region, weakened by radial incision

В качестве математической модели тонкого покрытия, сформулируем специальные граничные условия на внутренней границе кольца, при $r = a$ [3]:

$$\sigma_r^{(1)} = 0, \quad \frac{h}{a} \frac{d\sigma_\varphi^{(1)}}{d\varphi} = \tau_{r\varphi}^{(2)} \quad (5)$$

На внутренней границе кольца, при $r = b$, имеем:

$$\sigma_r^{(1)} = -p, \quad \tau_{r\varphi}^{(2)} = 0 \quad (6)$$

Верхний индекс соответствует основному материалу кольца (1) и покрытию (2). В дальнейшем, отсутствие верхнего индекса соответствует материалу кольца. Решение уравнений равновесия в цилиндрической системе координат, в силу симметрии задачи относительно луча $\varphi = 0$, будем строить в виде

$$u(r, \varphi) = \frac{a_0(r)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k(r) \cos k\varphi, \quad v(r, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k(r) \sin k\varphi \quad (7)$$

Здесь $u(r, \varphi)$ и $v(r, \varphi)$ – соответственно, радиальная и тангенциальная составляющие вектора перемещений в полярной системе координат. Коэффициенты разложений (5) имеют обычный вид:

$$a_k(r) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(r, \varphi) \cos k\varphi d\varphi, \quad b_k(r) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v(r, \varphi) \sin k\varphi d\varphi$$

Здесь задача сводится к определению функций

$$v|_{(r,+0)}^{(r,-0)} = X(r), \quad \partial u / \partial \varphi|_{(r,+0)}^{(r,-0)} = \Psi(r) \quad (8)$$

на интервале $c \leq r \leq d$, $\varphi = 0$. Будем считать, что вне этого интервала функции X и Ψ тождественно обращаются в нуль.

Компонента $\tau_{r\varphi}$ тензора напряжений на берегах трещины обращается в нуль. Этот факт позволяет установить зависимость между скачками (6) и исключить функцию Ψ из рассмотрения $\Psi = -r^2(X/r)'$.

Коэффициенты разложений Фурье функций

$$\frac{\partial v}{\partial \varphi} = \frac{c_0(r)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(r) \cos k\varphi, \quad \frac{\partial u}{\partial \varphi} = \sum_{k=1}^{\infty} e_k(r) \sin k\varphi$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} = \frac{d_0(r)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} d_k(r) \cos k\varphi, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} = \sum_{k=1}^{\infty} g_k(r) \sin k\varphi$$

в силу рассуждений, приведенных выше, будет иметь вид

$$c_k = X\pi^{-1} + kb_k, \quad e_k = -ka_k \quad (9)$$

$$d_k = r^2\pi^{-1}(r^{-1}X)' - k^2a_k, \quad g_k = -k\pi^{-1}X - k^2b_k$$

В результате получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для каждой гармонике разложений (5):

$$\begin{cases} a_k'' + \frac{a_k'}{r} - (1 + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}k^2) \frac{a_k}{r^2} + \frac{k}{2(1-\nu)} \frac{b_k'}{r} - \frac{3-4\nu}{2(1-\nu)} \frac{k}{r^2} b_k = f_1(r) \\ b_k'' + \frac{b_k'}{r} - (1 + \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}k^2) \frac{b_k}{r^2} + \frac{k}{1-2\nu} \frac{a_k'}{r} - \frac{3-4\nu}{1-2\nu} \frac{k}{r^2} a_k = f_2(r) \end{cases}$$

$$f_1(r) = \frac{1}{\pi r} (X - \frac{\nu}{1-\nu} X'), \quad f_2(r) = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \frac{k}{\pi r^2} X \quad (10)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$, $b_0=0$; здесь и далее ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости основного материала кольца.

Общее решение системы (8) строится методом вариации произвольных постоянных и имеет вид:

$$a_k(r) = \frac{1}{8} r \pi^{-1} (1-\nu)^{-1} [-(k-2)t_{k-2}(r) + (k+2(1-2\nu))t_k(r) - (k-2(1-2\nu))t_k(r) - (k+2)t_{-k-2}(r)] + C_{1k} r^{k-1} + C_{2k} r^{1-k} + C_{3k} r^{k+1} + C_{4k} r^{-k-1}$$

$$b_k(r) = \frac{1}{8} r \pi^{-1} (1-\nu)^{-1} [-(k-2)t_{k-2}(r) + (k-4(1-\nu))t_{-k}(r) + (k+4(1-\nu))t_k(r) - (k+2)t_{-k-2}(r)] - C_{1k} r^{k-1} + C_{2k} \frac{k-4(1-\nu)}{k+2(1-2\nu)} r^{-k+1} - C_{3k} \frac{k+4(1-\nu)}{k-2(1-2\nu)} r^{k+1} + C_{4k} r^{-k-1} \quad (11)$$

$$t_{\alpha}(r) = r^{\alpha} \int_c^r \rho^{-\alpha-2} X(\rho) d\rho$$

Постоянные C_{ik} ($i=1, \dots, 4$) определяются в результате выполнения граничных условий (5), (6). Отметим, что аналогичная постановка задачи без учета покрытия была исследована ранее в [4-5] на основе описанного подхода. Удовлетворение граничному условию свободных берегов трещины позволяет свести задачу к решению сингулярного интегрального уравнения I рода с ядром Коши:

$$\int_c^d \chi' \frac{d\rho}{r-\rho} + \frac{1}{r} \int_c^d \left\{ \frac{\rho}{r-\rho} + \frac{2r}{\rho} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[(k+2) \left(\frac{r}{\rho}\right)^{k+1} - (k-2) \left(\frac{r}{\rho}\right)^{k-1} \right] \right\} \chi' d\rho -$$

$$- \frac{2b^2(a^2+r^2)}{r^2(b^2-a^2)} [s(-2) + s(0)] + \sum_{k=2}^{\infty} \left\{ -D_1 \left(\frac{r}{b}\right)^{k-2} + (k-2) D_2 \left(\frac{a}{r}\right)^k \left(\frac{a}{b}\right)^{k-2} - \right.$$

$$\left. -(2+k) D_3 \left(\frac{r}{b}\right)^k + D_4 \left(\frac{a}{r}\right)^k \left(\frac{a}{b}\right)^k \left(\frac{b}{r}\right)^2 \right\} = -\frac{a^2(b^2+r^2)}{r^2(b^2-a^2)} \frac{4\pi(1-\nu^2)}{E} p, \quad (12)$$

$$\text{где, } s(\alpha) = b^{\alpha} \int_c^d \rho^{-\alpha-2} \chi(\rho) d\rho,$$

$$y(\alpha, \beta) = \varepsilon^{\alpha} + (k^2 - 1)\varepsilon^{-2\beta} - k^2\varepsilon^{-2k-2-\alpha}, \quad \varepsilon = \frac{b}{a} > 1 \quad d(\alpha, \beta) = \varepsilon^{\alpha} - \varepsilon^{\beta},$$

$$D = ag \left((\varepsilon^{-2k} - 1)^2 - k^2 \frac{(\varepsilon^2 - 1)^2}{\varepsilon^{2k+2}} \right) + hk(1 + \gamma) \left(2k \frac{\varepsilon^2 - 1}{\varepsilon^{2k+2}} - (1 - \varepsilon^{-4k}) \right),$$

$$\gamma = (1 - 2\nu) / (1 - 2\nu^{(1)}),$$

$$D_1 = \{ ag(k-1)[k^2(1+k)d(-2k, -2k-2)s(k) + k^2d(0, -2k-2)s(-k) -$$

$$-(1+k)(2+k)d(0, -2k)s(-k-2) - (k-2)y(0, k)s(k-2)] +$$

$$+ hk(1+\gamma)[k(k+1)(k\varepsilon^{-2k} - 2(k-1)\varepsilon^{-2-2k})s(k) +$$

$$+(k-2)(k-1)(2k\varepsilon^{-2-2k} - (1+k)\varepsilon^{-2k} + 1)s(k-2) +$$

$$+(1+k)(2+k)(\varepsilon^{-2k} + k-1)s(-k-2) -$$

$$-(k-1)k(2\varepsilon^{-2-2k} + k)s(-k)] \} / D,$$

$$D_2 = \{ ag(k-1)[(k+1)d(-2, -2k-2)s(k) - (k-2)d(0, -2k-2) \times$$

$$s(k-2) - (k+1)(k+2)d(0, -2)s(-k-2) - y(-2k-2, 1)s(-k)] +$$

$$+ hk(1+\gamma) \times [(k-2)(k-1)\varepsilon^{-2-2k}s(k-2) +$$

$$+(1+k)(\varepsilon^{-2} - (k-1)\varepsilon^{-2-2k})s(k) +$$

$$+(1+k)(2+k)\varepsilon^{-2}s(-k-2) - (k-1)(\varepsilon^{-2-2k} + (1+k)\varepsilon^{-2})s(-k)] \} / D,$$

$$D_3 = \{ ag(k+1)[-(k-1)d(0, -2k)s(-k) + (k-2)(k-1) \times$$

$$\times d(-2k-2, -2k)s(k-2) + (k+2)d(0, -2k-2)s(-k-2) +$$

$$+ y(0, k)s(k)] + hk(1+\gamma) \times$$

$$\times [(k-1)(\varepsilon^{-2k} + k+1)s(-k) - (k-2)(k-1)\varepsilon^{-2k}s(k-2) +$$

$$(1+k)((k-1)\varepsilon^{-2k} - 1)s(k) - (1+k)(2+k)s(-k-2)] \} / D,$$

$$D_4 = \{ ag(1+k)[(2+k)y(-2k, 0)s(-k-2) +$$

$$+(k-1)k^2d(-2, 0)s(-k) + (k-2)(k-1)d(0, -2k)s(k-2) +$$

$$+ k^2d(-2k, -2)s(k)] + hk(1+\gamma)[-(k-1)k(k-2(1+k)\varepsilon^{-2})s(-k) +$$

$$+(k-2)(k-1)(1 - (1+k)\varepsilon^{-2k})s(k-2) + k(1+k)(k\varepsilon^{-2k} - 2\varepsilon^{-2})s(k) +$$

$$+(1+k)(2+k)(\varepsilon^{-2k} - 2k\varepsilon^{-2} + k-1)s(-k-2)] \} / D.$$

В предельном случае, когда толщина покрытия h стремится к 0, получаем (12) соответствующие соотношения [4].

Последующее построение решения полученного уравнения реализуется двумя способами: методом малого параметра и методом коллокаций. Это, в свою очередь, позволяет определить значения коэффициента интенсивности напряжений в окрестности вершин трещины – важнейшей характеристики в механике разрушения.

С целью проверки адекватности принятой модели, проведен цикл численных экспериментов. В данном случае, в конечноэлементном пакете ANSYS, строится конечно-элементная модель сечения трубы, усиленной тонким внутренним покрытием.

На внутреннюю поверхность трубы действует гидростатическое давление. Материал трубы – сталь ($\nu=0.28$, $E=210$ ГПа), материал покрытия – вольфрам ($\nu=0.29$, $E=350$ ГПа). Особое внимание уделено детализации сетки конечных элементов в области покрытия.

Тип конечного элемента установлен как Quadrilateral. В пакете COMSOL построена аналогичная конечно-элементная модель. Сетка конечных элементов в области соединения покрытия и трубы значительно детализирована. В данном случае тип конечного элемента установлен как Triangular. Также в пакете FlexPDE была построена модель трубы с покрытием, соответствующая двум предыдущим моделям.

На успех решения задачи с применением метода конечных элементов влияет то, насколько точно геометрия, граничные условия и поведение материала модели соответствует действительности. Ошибки формулировки имеют место, если конечные элементы неточно описывают поведение физической задачи. Выбор подходящего типа элемента и сетки уменьшают ошибки формулировки. При этом, формулировка граничных условий является наиболее критичным шагом анализа. В то же время числовые ошибки обычно более редки по сравнению с ошибками формулировки и дискретизации. Стоит обратить внимание на то, что количество конечных элементов в трех построенных моделях различается незначительно, а их тип в крайне малой степени влияет на полученное решение.

Обсуждение результатов. Проведен ряд расчетов моделей, при этом толщина покрытия варьировалась в пределах от 1 до 10% относительно толщины стенки трубы. Общее количество расчетов моделей составляет 4500. В связи с повышенными требованиями к вычислительным ресурсам было принято решение о применении системы распределенных вычислений (локальной grid-системы).

Для проведения в дальнейшем анализа результатов были получены значения напряжений внутри объекта, а также на его внешней и внутренней поверхностях.

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод о том, что построенные модели средствами FlexPDE, ANSYS и COMSOL идентичны, а уравнения, применяемые при моделировании (FlexPDE), адекватно отражают поставленную задачу. При этом погрешность решений составляет от 0,1% до 2,5%, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов и возможности дальнейшего моделирования граничных условий. Во втором случае, с использованием широких возможностей пакета FlexPDE, была построена модель трубы без покрытия, но с применением специальных граничных условий.

Вывод. Сравнение полученных результатов позволило удостовериться в адекватности построенной модели. При этом погрешность решения составляет от 1% до 2,5% при толщине моделируемого покрытия до 5% относительно толщины стенки трубы.

Библиографический список:

1. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений. М.: Наука, 1982. 382 с.
2. Александров В.М., Сметанин Б.И., Соболев Б.В. Тонкие концентраторы напряжений в упругих телах. М.: Наука, 1993. 224 с.
3. Александров В. М., Мхитарян С. М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М.: Наука 1979. 486 с.
4. Ватульян А.О., Соболев Б.В. Об одном эффективном методе построения разрывных решений в задачах механики для тел конечных размеров// Известия РАН, Механика твердого тела. 1995. №6. с.62–69.
5. Рашидова Е.В., Соболев Б.В. Равновесная поперечная внутренняя трещина в составной упругой полуплоскости. Прикладная математика и механика. 2017. Т. 81. № 3. С. 348-364.
6. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения [Текст] // Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – М. : ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.

7. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. -М.: Физматлит, 2006. - 328 с.
8. Глушков С.В., Скворцов Ю.В., Перов С.Н. Сравнение результатов решения задачи механики разрушения для трубы с несквозной трещиной // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2014. - № 3. - С. 36-49. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03
9. Li C.Q., Yang S.T. Stress intensity factors for high aspect ratio semi-elliptical internal surface cracks in pipes // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. - 2012. - Vol. 96-97. - P. 13-23. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.05.005
10. Yang S.T., Ni Y.L., Li C.Q. Weight function method to determine stress intensity factor for semi-elliptical crack with high aspect ratio in cylindrical vessels // Eng. Fract. Mech. - 2013. - Vol. 109. - P. 138-149. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.05.014
11. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending / Y.M. Zhang, D.K. Yi, Z.M. Xiao, Z.H. Huang, S B. Kumar // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. - 2013. - Vol. 105-106. - P. 90-102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009
12. Chiodo M.S.G., Ruggieri C. J and CTOD estimation procedure for circumferential surface cracks in pipes under bending // Eng. Fract. Mech. - 2010. -Vol. 77(3). - P. 415-436. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.001
13. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. - 2014. - Vol. 119. - P. 19-28. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.004
14. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading // Mathematics and Mechanics of Solids. - 2014. - Vol. 19(3). - P. 289-298. DOI: 10.1177/1081286512463573
15. Predan J., Mocilnik V., Gubelj N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion // Eng. Fract. Mech. - 2013. - Vol. 105. - P. 152-168. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.033
16. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending / B. Mechab, B. Serier, B.B. Bouiadjra, K. Kaddouri, X. Feaugas // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. - 2011. - Vol. 88(1). -P. 57-63. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.11.001

References:

1. Popov G.Ya. Kонтсентратсия uprugikh napryazheniy vozle shtampov, razrezov, tonkikh vkluycheniy i podkrepleny. M.: Nauka; 1982. 382 s. [Popov G.Ya. Concentration of elastic stresses near the stamps, sections, fine inclusions and reinforcements. Moscow: Nauka; 1982. 382 p. (in Russ.)]
2. Aleksandrov V.M., Smetanin B.I., Sobol' B.V. Tonkie kontsentratory napryazheniy v uprugikh telakh. M.: Nauka; 1993. 224 s. [Aleksandrov V.M., Smetanin B.I., Sobol' B.V. Fine stress concentrators in elastic bodies. Moscow: Nauka; 1993. 224 p. (in Russ.)]
3. Aleksandrov V. M., Mkhitarian S. M. Kontaktnye zadachi dlya tel s tonkimi pokrytiyami i prosloykami. M.: Nauka; 1979. 486 s. [Aleksandrov V. M., Mkhitarian S. M. Contact problems for bodies with thin coatings and layers. Moscow: Nauka; 1979. 486 p. (in Russ.)]
4. Vatul'yan A.O., Sobol' B.V. Ob odnom effektivnom metode postroeniya razryvnykh resheniy v zadachakh mekhaniki dlya tel konechnykh razmerov. Izvestiya RAN, Mekhanika tverdogo tela. 1995;6:62–69. [Vatul'yan A.O., Sobol' B.V. About the one effective method of discontinuous solution composition in the problems of mechanics of finite dimensional bodies. Mechanics of Solids. 1995;6:62–69. (in Russ.)]
5. Rashidova E.V., Sobol' B.V. Ravnovesnaya poperechnaya vnutrennyaya treshchina v sostavnoy uprugoy poluploskosti. Prikladnaya matematika i mekhanika. 2017;81(3):348-364. [Rashidova E.V., Sobol' B.V. Equilibrium transversal inner crack in combined elastic semi-plane. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2017;81(3):348-364. (in Russ.)]
6. Morozov E.M., Muzyemnek A.Yu., Shadskiy A.S. ANSYS v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya. M.: LENAND; 2010. 456 s. [Morozov E.M., Muzyemnek A.Yu., Shadskiy A.S. ANSYS in the hands of an engineer: mechanics of destruction. Moscow: LENAND; 2010. 456 p. (in Russ.)]

7. Matvienko Yu.G. Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya. M.: Fizmatlit; 2006. 328 s. [Matvienko Yu.G. Models and criteria of mechanics of destruction. Moscow: Fizmatlit; 2006. 328 p. (in Russ.)]
8. Glushkov S.V., Skvortsov Yu.V., Perov S.N. Sravnenie rezul'tatov resheniya zadachi mekhaniki razrusheniya dlya truby s neskvoznoy treshchinoy. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. 2014;3:36-49. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03 [Glushkov S.V., Skvortsov Yu.V., Perov S.N. Comparison of solution results of the problem of mechanics of destruction for a pipe with a blind crack. PNRPU Mechanics Bulletin. 2014;3:36-49. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03 (in Russ.)]
9. Li C.Q., Yang S.T. Stress intensity factors for high aspect ratio semi-elliptical internal surface cracks in pipes. Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2012;96-97:13-23. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.05.005
10. Yang S.T., Ni Y.L., Li C.Q. Weight function method to determine stress intensity factor for semi-elliptical crack with high aspect ratio in cylindrical vessels. Eng. Fract. Mech. 2013;109:138-149. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.05.014
11. Zhang Y.M., Yi D.K., Xiao Z.M., Huang Z.H., Kumar S.B. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending. Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2013;105-106:90-102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009
12. Chiodo M.S.G., Ruggieri C. J and CTOD estimation procedure for circumferential surface cracks in pipes under bending. Eng. Fract. Mech. 2010; 77(3):415-436. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.001
13. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading. Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2014;119:19-28. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.004
14. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading. Mathematics and Mechanics of Solids. 2014;19(3):289-298. DOI: 10.1177/1081286512463573
15. Predan J., Mocilnik V., Gubeljak N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion. Eng. Fract. Mech. 2013;105:152-168. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.033
16. Mechab B., Serier B., Bouiadjra B.B., Kaddouri K., Feaugas X. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending. Int. J. of Pressure Vessels and Piping. 2011;88(1):57-63. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.11.001

Сведения об авторах:

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич - кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики.

Рашидова Елена Викторовна - кандидат физико-математических наук, профессор, кафедра информационных технологий.

Соболь Борис Владимирович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий.

Information about the authors.

Magomed M. Payzulaev – Cand. Sci. (Technical), Senior lecturer, Department of Resistance of Materials, Theoretical and Building Mechanics.

Elena V. Rashidova – Cand. Sci. (Physics and Mathematical), Prof., Department of Information Technologies.

Boris V. Sobol' – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Information Technologies.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 10.05.2017.

Received 10.05.2017.

Принята в печать 30.05.2017.

Accepted for publication 30.05.2017.

Для цитирования: Дмитриев А.И. Физическое кодирование данных с помощью поляризационных спиновых устройств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 46-54. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

For citation: Dmitriev A.I. Physical data coding using polarising spin devices. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 46-54. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 004

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-46-54

ФИЗИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПИНОВЫХ УСТРОЙСТВ

Дмитриев А.И.

Российский университет транспорта (МИИТ)

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, Россия

e-mail: alex-dmitriev2005@yandex.ru

Резюме: Цель. Спиновая наноэлектроника позволяет реализовать принципиально новые способы кодирования и шифрования информации при помощи спинов фотонов в волоконно-оптических линиях передачи данных. **Цель.** В статье обсуждается возможность создания спинового светодиода, излучающего циркулярно-поляризованный свет. **Метод.** В спиновом светодиоде спин-поляризованные носители инжектируются из ферромагнитного контакта, объединенного с квантовой ямой. **Результат.** Квантовые правила отбора, описывающие рекомбинацию, устанавливают связь между циркулярной поляризацией света, испускаемого вдоль нормали к поверхности, и спиновой поляризацией электронов. **Вывод.** Сформулированы физические методы кодирования и передачи информации с помощью поляризационных спиновых устройств, использующих спиновую степень свободы. Предложены принципы устройства генератора поляризованного излучения – спинового светодиода. В его основе лежит гетероструктура, содержащая квантовую яму InGaAs/GaAs (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой GaMnAs. Установлено, что линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты, что открывает новые возможности кодирования и передачи информации в волоконно-оптических линиях передачи данных методами поляризационной модуляции. Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs.

Благодарности. Автор признателен сотрудникам НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Ю.А. Данилову и М.В. Дорохину за образцы, сотруднику ИФТТ РАН С.В. Зайцеву за оптические измерения, сотруднику Российского университета транспорта (МИИТ) В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3.

Ключевые слова: гетероструктуры разбавленных магнитных полупроводников GaAs:Mn, спинтроника, спиновый светодиод, циркулярно-поляризованный свет

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
PHYSICAL DATA CODING USING POLARISING SPIN DEVICES

Aleksey I. Dmitriev

Russian University of Transport (RUT - MIIT)
9b9 Obrazcova Str., Moscow 127994, Russia,
e-mail: alex-dmitriev2005@yandex.ru

Abstract Objectives Spin nanoelectronics facilitate fundamentally new ways of encoding and encrypting information implemented using photon spins in fibre-optic data transmission lines. The article discusses the possibility of creating a spin LED emitting circularly polarised light. **Methods** In a spin LED, spin-polarised carriers are injected from a ferromagnetic contact combined with a quantum well. **Results** Quantum selection rules for describing recombination establish a connection between the circular polarisation of light, emitted along the normal to the surface, and the spin polarisation of the electrons. **Conclusion** Physical methods for coding and transmitting information by means of polarised spin devices using the spin degree of freedom are formulated. The configuration principles of a polarised radiation generator (spin LED) are proposed. The approach is based on a heterostructure containing the quantum well InGaAs / GaAs (luminescent layer) and the ferromagnetic layer GaMnAs. It is established that the quantum well emission line is split into two circularly polarised components, which opens up new possibilities for coding and transmission of information in fibre-optic data transmission lines by the methods of polarisation modulation. The circular polarisation of the photoluminescence from the InGaAs / GaAs quantum well is caused by the magnetisation of a nearby ferromagnetic GaMnAs layer.

Acknowledgments The author is grateful to the employees of NIFTI UNN named after N.I. Lobachevsky Yu.A. Danilov and M.V. Dorokhin for samples, the employee of ISSP RAS S.V. Zaitsev for optical measurements, the employee of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT) V.P. Solov'ev for useful discussions. The work is partially supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research No. 16-07-00863a and the RF President's grant MK-5754.2016.3.

Keywords: heterostructures of diluted magnetic GaAs: Mn semiconductors, spintronics, spin LED, circularly polarised light

Введение. В настоящее время одной из основных задач технологии элементов вычислительной электроники является увеличение скорости передачи данных. Пропускная способность современных каналов передачи данных, работающих на традиционных принципах, таких как передача радиочастотных импульсов или электромагнитных волн, сейчас достигает своего теоретического предела. Выходом из сложившейся ситуации является создание каналов передачи данных, основанных на новых принципах, использующих спиновую степень свободы.

Одним из способов решения этой проблемы является создание приборов спинтроники, в которых для управления их свойствами помимо заряда электрона используется его спин.

В основе спинтронных приборов лежат наноструктуры магнитных полупроводников SiMn [1], GeMn [2, 3], GeCo [4], GaMnAs [5] и т.д. В основе спиновых светодиодов могут быть гетероструктуры, содержащие квантовую яму (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой. В спиновом светодиоде спин-поляризованные носители инжектируются из ферромагнитного контакта, объединенного с квантовой ямой. Квантовые правила отбора, описывающие рекомбинацию, а также закон сохранения момента импульса устанавливают связь между циркулярной поляризацией света, испускаемого вдоль нормали к поверхности, и спиновой поляризацией электронов. В условиях поляризованного излучения кодирование информации можно осуществлять не за счет модуляции интенсивности излучения, а модулируя оптическую поляризацию. При этом σ^+ -поляризованному излучению ставится в соответствие «1», σ^- -поляризованному излучению – «1».

Постановка задачи. Гетероструктуру с ферромагнитным слоем и квантовой ямой можно осуществить двумя способами: ферромагнитный слой вырастить непосредственно в квантовой яме (совместное легирование); ферромагнитный слой вырастить на некотором расстоянии от квантовой ямы (раздельное легирование).

В первом случае, при наложении внешнего поля ферромагнитный слой в квантовой яме будет намагничиваться, то есть, в самой яме появится избыток носителей заряда, имеющих ориентацию спина в заданном направлении. Это действительно приведет к тому, что излучение из ямы станет циркулярно-поляризованным (будет иметь ненулевую круговую поляризацию) и поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы действительно будет зависеть от намагничивания магнитного слоя [6]. Однако само по себе введение магнитного слоя в квантовую яму существенно снижает квантовый выход фотолюминесценции из ямы и подвижность носителей заряда в квантовой яме [7]. То есть в гетероструктурах с магнитным слоем внутри квантовой ямы получение магнито-управляемого циркулярно-поляризованного излучения теоретически возможно, но квантовый выход фотолюминесценции из ямы и подвижность носителей заряда в квантовой яме будут очень низкими.

В случае, когда магнитный слой и квантовая яма отделены друг от друга, квантовый выход фотолюминесценции и подвижность носителей заряда в квантовой яме существенно возрастают (из-за отсутствия рассеяния носителей заряда на положительных ионах ферромагнитной примеси).

Таким образом, основным преимуществом раздельного легирования марганцем в гетероструктурах является отсутствие гашения фотолюминесценции квантовой ямы с увеличением концентрации марганца. Это даёт возможность одновременного исследования магнитных и фотолюминесцентных свойств гетероструктур, содержащих квантовую яму и магнитный слой с высокой концентрацией ионов марганца. Однако отсутствие гашения люминесценции – не единственное положительное отличие гетероструктур, полученных методом раздельного легирования.

Как известно, арсенид галлия имеет очень высокую ($\sim 8000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) подвижность электронов по сравнению с кремнием и германием. В то же время ферромагнетизм носителей заряда в квантовой яме определяется косвенным обменным взаимодействием спинов ионов марганца и через спины дырок в квантовой яме. Подвижность дырок в арсениде галлия составляет ($\sim 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), что меньше, чем в кремнии ($\sim 450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Совместное легирование квантовой ямы дельта-слоем марганца приводит к дополнительному уменьшению подвижности дырок в квантовой яме из-за рассеяния носителей заряда на положительных ионах марганца. Это делает гетероструктуры с совместным легированием квантовой ямы магнитной примесью абсолютно непригодными как для оптики, так и для спинтроники. Совсем иная ситуация возникает в случае раздельного легирования марганцем. В этом случае марганец не только не подавляет фотолюминесценцию и не уменьшает подвижность дырок в квантовой яме, но и ещё служит акцептором для электронов в гетероструктуре, а, следовательно, и донором дырок. При раздельном легировании марганец отделён от квантовой ямы слоем чистого арсенида галлия, толщиной 3 нм. Такой толщины достаточно, чтобы полностью исключить процессы диффузии марганца в квантовую яму.

В то же время, дырки, полученные из дельта-слоя марганца, являясь всего лишь вакантными местами для электронов, и не являясь атомами или молекулами, смогут свободно двигаться по гетероструктуре и попадать в квантовую яму, занимая наиболее выгодное положение по энергии. При раздельном легировании марганец не уменьшает подвижность носителей заряда в квантовой яме. Поэтому гетероструктуры, содержащие квантовую яму и магнитный слой, полученные методом раздельного легирования, представляют большой интерес, как с точки зрения магнитных и оптических свойств, так и с точки зрения взаимосвязи между ними.

Методы исследования. В России гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs для поляризационных спиновых кодирующих устройств выращивают комбинированным методом ступенчатого эпитаксиального роста в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского в группе Ю.А. Данилова и

М.В. Дорохина [8-10]. На первом этапе на подложке GaAs (001) методом металл-органической гидридной эпитаксии последовательно выращивают буферный слой GaAs, легированный Si, далее размещается дельта-легированный углеродом слой GaAs, затем идет слой нелегированного GaAs, нелегированная квантовая яма InGaAs и, наконец, разделяющий слой GaAs (рис. 1).

На следующем этапе в том же реакторе методом лазерного распыления Mn и GaAs мишеней последовательно выращивают слой GaMnAs, толщиной около 2 нм, и покровный слой GaAs. Подробно методика изготовления и аттестации гетероструктур описана в работах [8-10].

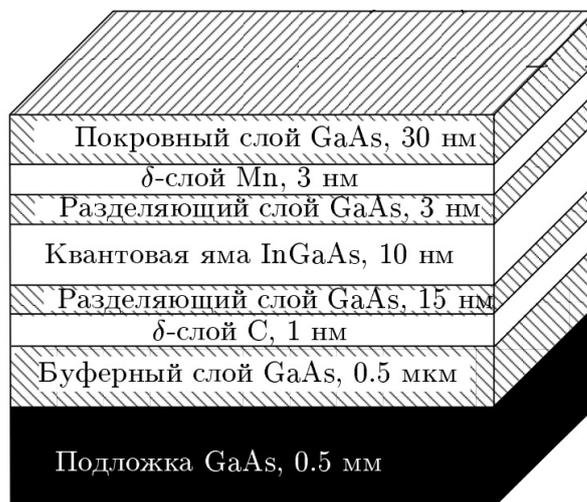


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs

Fig. 1. Schematic representation of the InGaAs / GaAs / GaMnAs heterostructure

Следует заметить, что если для светоизлучающего слоя используется в основном только GaAs, InAs, InGaAs и изредка CdSe, то материалы для ферромагнитного инжектора отличаются большим разнообразием. Из группы магнитных полупроводников помимо GaMnAs используются также ZnMnSe и CdCr₂Se₄ [11]. Также используются ферромагнитные металлы Co, Fe, CoFe, NiFe-CoFe, Ni₈₀Fe₂₀, MnAs, MnSb и сплавы Гейслера Co_{2.4}Mn_{1.6}Ga и Co₂MnGe [11].

Обсудим температурную зависимость магнитного момента гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs, измеренную с помощью СКВИД магнитометра MPMS 5 XL, Quantum Design (рис. 2). Уменьшение намагниченности слоя GaMnAs с ростом температуры, как и в обычных объемных ферромагнетиках, описывается формулой Блоха (рис. 2) при температурах ниже температуры Кюри $T_C = 35$ К [11].

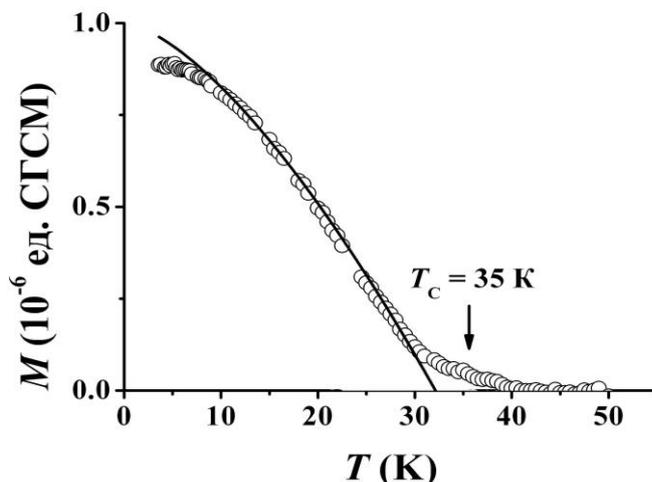


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента гетероструктуры In-

GaAs/GaAs/GaMnAs в магнитном поле 1 кЭ, лежащем в плоскости гетероструктуры
Fig. 2. Temperature dependence of the magnetic moment of the In-GaAs / GaAs / GaMnAs heterostructure in a 1 ke magnetic field lying in the heterostructure plane

Сплошной линией показана аппроксимация формулой Блоха « $T^{3/2}$ ». Справедливость формулы Блоха для температурной зависимости магнитного момента свидетельствует о возможности ее описания с помощью представлений о намагниченности объемных упорядоченных ферромагнетиков.

Анализ температурной зависимости магнитного момента позволили определить микроскопические параметры спиновой системы ферромагнитного слоя GaMnAs: спин-волновой параметр $\sim 5.3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-3/2}$, коэффициент спин-волновой жесткости $\sim 0.36 \cdot 10^{-9} \text{ Э} \cdot \text{см}^2$ и обменный интеграл $\sim 0.18 \text{ мэВ}$. Полученные значения близки к соответствующим значениям в тонких пленках GaMnAs толщиной 50 – 330 нм, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [12-13].

Обсудим методы исследования спин-поляризованной фотолюминесценции. На рис. 3 представлены спектры фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs в магнитном поле 50 кЭ и при температурах 2 К. Измерения циркулярно-поляризованной фотолюминесценции, выполнены в ИФТТ РАН С.В. Зайцевым в криостате со сверхпроводящим магнитом. Измерения проводились в геометрии Фарадея (магнитное поле было приложено перпендикулярно поверхности структур).

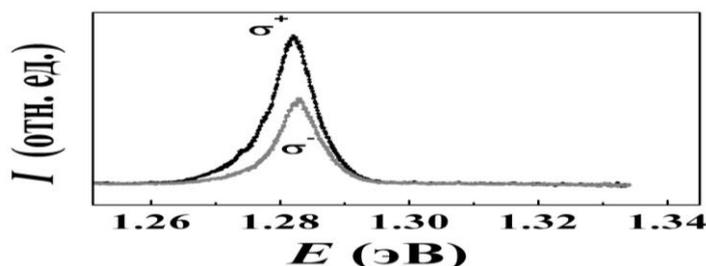


Рис.3. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs/GaMnAs при $T = 2$ К в магнитном поле 50 кЭ

Fig.3. The photoluminescence spectra of the InGaAs / GaAs / GaMnAs heterostructure at $T = 2$ K in a magnetic field of 50 ke

Для возбуждения использовался He-Ne лазер. Оптическая схема состояла из набора оптических элементов (диафрагма и линза), позволяющих создать плоскопараллельный пучок света, а также анализатора (четвертьволновой пластинки и поляризатора).

Анализ σ^+ или σ^- поляризации излучения проводился путем вращения четвертьволновой пластинки, при этом ось поляризации поляризатора всегда была направлена параллельно плоскости дифракционной решетки монохроматора. После анализатора линейно-поляризованное излучение соответствующее либо σ^+ , либо σ^- поляризации фокусировалось на щель монохроматора и затем попадало на Si ПЗС-детектор. Степень циркулярной поляризации люминесценции определялась из соотношения $P_{\phi/L} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$, где $I_+(I_-)$ – интенсивности компонент с правой (левой) поляризацией, полученные путем интегрирования полосы соответствующей части спектра межзонного излучения квантовой ямы. Как и ожидалось линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты (σ^+ и σ^-) вследствие зеемановского расщепления спиновых уровней носителей заряда. Степень циркулярной поляризации имеет положительный знак и превышает 20 %.

Обсуждение результатов. Марганец в чистом виде является парамагнетиком, а арсенид галлия – диамагнетиком. Однако если марганец добавлен в арсенид галлия в качестве примеси, то его магнитные свойства существенно меняются. В частности, тонкий слой сплава арсенида галлия с марганцем GaMnAs при высокой (~ 10 %) концентрации марганца проявляет ферромагнитные свойства [14-15]. Ферромагнетизм в магнитных полупроводниках A^3MnB^5 индуцирован носителями заряда (косвенное обменное взаимодействие). Для описания ферромагнетизма используется модель среднего поля, которая постулирует наличие двух взаимодействующих спиновых подсистем: спины делокализованных носителей заряда; локализованные спины магнитных атомов.

Ферромагнетизм описывается следующим образом. Конечное значение намагниченности создаёт расщепление в валентной зоне и уменьшает энергию носителей. Та же самая намагниченность увеличивает свободную энергию подсистемы локализованных спинов, но этот проигрыш в свободной энергии уменьшается при понижении температуры. При температуре ферромагнитного перехода эти две энергии сравниваются, и дальнейшее уменьшение температуры ведет к спонтанному спиновому расщеплению и к поляризации спинов, т.е. к ферромагнетизму. Что касается параметров тонких пленок (слоев) GaMnAs, при которых удастся наблюдать ферромагнитное взаимодействие между ионами марганца, то в работе [15] было установлено, что существует оптимальное содержание марганца (0.05 – 0.06 атомных долей), при котором формируются пленки, в которых заметная доля атомов Mn замещает Ga, выступая в качестве акцепторов. При большем содержании Mn наблюдаются эффекты образования кластеров MnAs, а главное, заметная часть дополнительно введенных атомов Mn начинает входить в междоузлия, где они выступают в качестве двойных доноров, приводя к уменьшению концентрации дырок и снижению температуры Кюри [15-16]. Связано это с тем, что ферромагнитное упорядочение в обсуждаемых разбавленных магнитных полупроводниках возможно лишь в результате косвенного обмена через свободные дырки (либо дырки примесной зоны). Поэтому уменьшение концентрации носителей приводит к подавлению в них ферромагнетизма [15-16].

Обсудим результаты исследования спин-поляризованной фотолюминесценции. Наиболее вероятными фотолюминесцентными электронными переходами являются переходы из зоны проводимости в валентную подзону тяжелых дырок (рис. 4).

Для описания этих переходов принята следующая модель:

- а) при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону в зоне проводимости InGaAs исчезает 1 электрон, в валентной зоне InGaAs исчезает 1 дырка;
- б) в результате перехода излучается фотон: его спин равен +1 или -1;
- в) при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону (или, что то же самое, рекомбинации электрона и дырки) суммарный спин системы сохраняется.

Циркулярно-поляризованное рекомбинационное излучение возникает, когда изменение магнитного квантового при межзонном переходе $\Delta m_j = \pm 1$. Переходы, для которых $\Delta m_j = -1$, приводят к эмиссии σ^+ -поляризованного света при распространении вдоль направления +z [8].

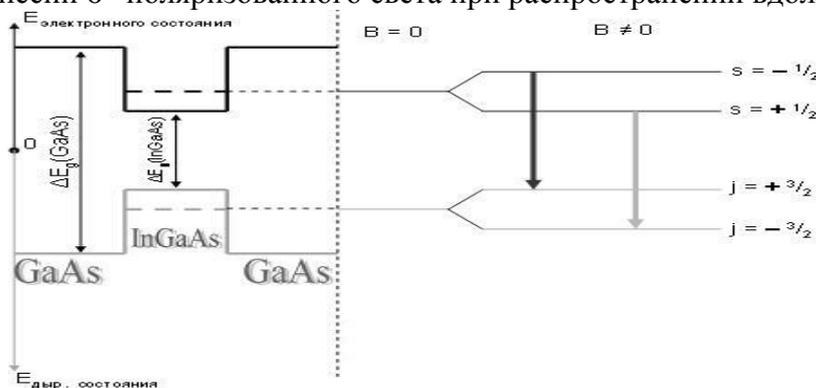


Рис. 4. Зонная диаграмма двойной гетероструктуры GaAs/InGaAs с квантовой ямой и схема возможных излучательных электронных переходов при наложении внешнего магнитного поля

Fig.4. The band diagram of the double GaAs / InGaAs heterostructure with a quantum well and the scheme of possible radiative electronic transitions when an external magnetic field is applied

Спектр излучения гетероструктуры с квантовой ямой, помещенной в магнитное поле, состоит из двух циркулярно-поляризованных компонент, различных по знаку поляризации, но одинаковых по интенсивности. Результат сложения σ^+ и σ^- компонент одинаковой интенсивности – линейно поляризованный свет (с нулевой циркулярной поляризацией).

В гетероструктурах без ферромагнитного слоя GaMnAs циркулярная поляризация излучения из квантовой ямы равна нулю [6]. Для получения циркулярно-поляризованного излучения необходимо изменить соотношение интенсивностей σ^+ и σ^- компонент. Этого можно добиться, введя в гетероструктуру, содержащую квантовую яму, слой ферромагнитного полупро-

водника GaMnAs. Обменное p - d взаимодействие тяжелой дырки с ионами Mn^{2+} в слое GaMnAs пропорционально скалярному произведению магнитного момента дырки \mathbf{j} и макроскопической намагниченности \mathbf{M} слоя GaMnAs [17]. Упругие напряжения в квантовой яме InGaAs/GaAs вытесняют уровень размерного квантования легких дырок значительно выше по энергии, чем уровень тяжелых дырок [18]. Поэтому фотолюминесценция из квантовой ямы определяется оптическими переходами между 2D-подзонами электронов и тяжелых дырок.

Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs (ферромагнетизм в слое GaMnAs приводит к спиновой поляризации дырок в квантовой яме [5]).

Вывод. Сформулированы физические методы кодирования и передачи информации с помощью поляризационных спиновых устройств, использующих спиновую степень свободы. Предложены принципы устройства генератора поляризованного излучения – спинового светодиода. В его основе лежит гетероструктура, содержащая квантовую яму InGaAs/GaAs (люминесцирующий слой) и ферромагнитный слой GaMnAs.

Установлено, что линия излучения квантовой ямы расщеплена на две циркулярно-поляризованные компоненты, что открывает новые возможности кодирования и передачи информации в волоконно-оптических линиях передачи данных методами поляризационной модуляции. Циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы InGaAs/GaAs вызвана намагниченностью близкого ферромагнитного слоя GaMnAs.

Автор признателен сотрудникам НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского Ю.А. Данилову и М.В. Дорохину за образцы, сотруднику ИФТТ РАН С.В. Зайцеву за оптические измерения, сотруднику Российского университета транспорта (МИИТ) В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3.

Библиографический список:

1. Николаев С. Н., Аронзон Б. А., Рыльков В. В., Тугушев В. В., Демидов Е. С., Левчук С. А., Лесников В. П., Подольский В. В., Гареев Р. Р. Аномальный эффект Холла в Si пленках, сильно легированных Mn // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 89. – № 12. – С. 707-712.
2. Дмитриев А. И., Моргунов Р. Б., Казакова О. Л., Танимото И. Спин-волновой резонанс в пленках $Ge_{1-x}Mn_x$, обладающих перколяционным ферромагнетизмом // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 135. – № 5. – С. 1134-1141.
3. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И., Tanimoto Y., Кленина И. Б. Магнитный резонанс в нанопроволоках $Ge_{0.99}Mn_{0.01}$ // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – № 2. – С. 285-290.
4. Моргунов Р. Б., Дмитриев А. И., Tanimoto Y., Kulkarni J. S. Спиновая динамика в ориентированных ферромагнитных нанопроволоках $Ge_{0.99}Co_{0.01}$ // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 1058-1063.
5. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолюминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 140. – № 1. – С. 158-169.
6. Зайцев С. В., Дорохин М. В., Бричкин А. С., Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Звонков Б. Н., Кулаковский В. Д. Ферромагнитное воздействие δ -<Mn>-слоя в GaAs барьере на спиновую поляризацию носителей в InGaAs/GaAs квантовой яме // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 90. – № 10. – С. 730-735.
7. Аронзон Б. А., Грановский А. Б., Давыдов А. Б., Данилов Ю. А., Звонков Б. Н., Рыльков В. В., Ускова Е. А. Свойства InGaAs/GaAs квантовых ям с δ -легированным слоем в GaAs // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – № 1. – С. 165-171.
8. Дорохин М. В., Данилов Ю.А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
9. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дроздов Ю. Н., Звонков Б. Н., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Свойства квантово-размерных структур GaAs/InGaAs, содержащих δ -<Mn>-легированные слои

// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 2. – С. 9-12.

10. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Калентьева И. Л., Кудрин А. В. Ферромагнетизм в GaAs структурах с дельта-легированным Mn слоем // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 35. – № 14. – С. 8-17.
11. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – V. 40. – N 2. – P. R179-R203.
12. Sperl M., Singh A., Wurstbauer U., Das S. K., Sharma A., Hirmer M., Nolting W., Back C. H., Wegscheider W., Bayreuther G. Spin-wave excitations and low-temperature magnetization in the dilute magnetic semiconductor (Ga,Mn)As // Phys. Rev. B. – 2008. – V. 77. – N 12. – P. 125212-1-7.
13. Goennenwein S. T. B., Graf T., Wassner T. Brandt M. S., Stutzmann M., Philipp J. B., Gross R., Krieger M., Zürn K., Ziemann P., Koeder A., Frank S., Schoch W., Waag A. Spin wave resonance in Ga_{1-x}Mn_xAs // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – N 5. – P. 730-732
14. Macdonald A. H., Schiffer P., Samarth N. Ferromagnetic semiconductors: moving beyond (Ga,Mn)As // Nature materials. – 2005. – V. 4. – N 3. – P. 195-202.
15. Ohno H., Matsukura F. A ferromagnetic III-V semiconductor: (Ga,Mn)As // Solid State Commun. – 2001. – V. 117. – N 3. – P. 179-186.
16. Edmonds K. W., Boguslawski P., Wang K. Y., Champion R. P., Novikov S. N., Farley N. R. S., Gallagher B. L., Foxon C. T., Sawicki M., Dietl T., Nardelli M. B., Bernholc J. Mn Interstitial Diffusion in (Ga,Mn)As // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 92. – N 3. – P. 037201-1-4.
17. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71. – N 3. – P. 035338-1-5.
18. Hendorfer G., Schneider J. G-factor and effective mass anisotropies in pseudomorphic strained layers // Sem. Sci. Technol. – 1991. – V. 6. – N 7. – P. 595-601.

References:

1. Nikolaev S.N., Aronzon B.A., Ryl'kov V.V., Tugushev V.V., Demidov E.S., Levchuk S.A., Lesnikov V.P., Podol'skiy V.V., Gareev R.R. Anomal'nyy effekt Kholla v Si plenkakh, sil'no legirovannykh Mn. Pis'ma v ZhTF. 2009;89(12):707-712. [Nikolaev S.N., Aronzon B.A., Ryl'kov V.V., Tugushev V.V., Demidov E.S., Levchuk S.A., Lesnikov V.P., Podol'skiy V.V., Gareev R.R. Abnormal Hall effect in heavily Mn-doped Si films. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;89(12):707-712. (in Russ.)]
2. Dmitriev A.I., Morgunov R.B., Kazakova O.L., Tanimoto I. Spin-volnovoy rezonans v plenkakh Ge_{1-x}Mn_x, obladayushchikh perkolyatsionnym ferromagnetizmom. ZhTF. 2009;135(5):1134-1141. [Dmitriev A. I., Morgunov R. B., Kazakova O. L., Tanimoto I. Spin-wave resonance in percolating ferromagnetic Ge_{1-x}Mn_x films. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;135(5):1134-1141. (in Russ.)]
3. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Klenina I.B. Magnitnyy rezonans v nanoprovodokakh Ge_{0.99}Mn_{0.01}. Fizika tverdogo tela. 2007;49(2):285-290. [Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Klenina I.B. Magnetic resonance in Ge_{0.99}Mn_{0.01} nano-wires. Fizika tverdogo tela. 2007;49(2):285-290. (in Russ.)]
4. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Kulkarni J.S. Spinovaya dinamika v orientirovannykh ferromagnitnykh nanoprovodokakh Ge_{0.99}Co_{0.01}. Fizika tverdogo tela. 2008;50(6):1058-1063. [Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Kulkarni J.S. Spin dynamics in oriented ferromagnetic Ge_{0.99}Co_{0.01} nano-wires. Fizika tverdogo tela. 2008;50(6):1058-1063. (in Russ.)]
5. Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Fotolyuminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmenenie magnitnogo polya δ -sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs. ZhTF. 2011;140(1):158-169. [Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Photoluminescence response of a quantum well onto Mn δ -layer magnetic field alteration in InGaAs/GaAs heterostructures. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP). 2011;140(1):158-169. (in Russ.)]
6. Zaytsev S.V., Dorokhin M.V., Brichkin A.S., Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Kulakovskiy V.D. Ferromagnitnoe vozdeystvie δ -<Mn>-sloya v GaAs bar'ere na spinovuyu polarizatsiyu nositeley v InGaAs/GaAs kvantovoy yame. Pis'ma v ZhTF. 2009;90(10):730-735. [Zaytsev S.V., Dorokhin M.V., Brichkin A.S., Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Kulakovskiy V.D. Ferromagnetic

- impact of δ -Mn-layer in GaAs barrier onto carrier spin polarisation in InGaAs/GaAs quantum well. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;90(10):730-735. (in Russ.)]
7. Aronzon B.A., Granovskiy A.B., Davydov A.B., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Ryl'kov V.V., Uskova E.A. Svoystva InGaAs/GaAs kvantovykh yam s δ -Mn-legirovannym sloem v GaAs. FTT. 2007;49(1):165-171. [Aronzon B.A., Granovskiy A.B., Davydov A.B., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Ryl'kov V.V., Uskova E.A. Properties of InGaAs/GaAs quantum wells with δ -doped layer in GaAs. Fizika tverdogo tela. 2007;49(1):165-171. (in Russ.)]
 8. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Izmerenie polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostruktur: uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet; 2011. [Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Measurement of polarisation features of nanoheterostructure emission: a Tutorial. Nizhniy Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod; 2011. (in Russ.)]
 9. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. Svoystva kvantovo-razmernykh struktur GaAs/InGaAs, sodержashchikh δ -Mn-legirovannye sloi. Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya. 2007;2:9-12. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. The properties of GaAs/InGaAs quantum-dimensional structures, containing δ -Mn-doped layers. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007;2:9-12. (in Russ.)]
 10. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Kalent'eva I.L., Kudrin A.V. Ferromagnetizm v GaAs strukturakh s del'ta-legirovannym Mn sloem. Pis'ma v ZhTF. 2009;35(14):8-17. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Kalent'eva I.L., Kudrin A.V. Ferromagnetism in GaAs structures with delta-doped Mn layer. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2009;35(14):8-17. (in Russ.)]
 11. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. J. Phys. D: Appl. Phys. 2007;40(2):R179-R203.
 12. Sperl M., Singh A., Wurstbauer U., Das S.K., Sharma A., Hirmer M., Nolting W., Back C.H., Wegscheider W., Bayreuther G. Spin-wave excitations and low-temperature magnetization in the dilute magnetic semiconductor (Ga,Mn)As. Phys. Rev. B. 2008;77(12):125212-1-7.
 13. Goennenwein S.T.B., Graf T., Wassner T. Brandt M.S., Stutzmann M., Philipp J.B., Gross R., Krieger M., Zörn K., Ziemann P., Koeder A., Frank S., Schoch W., Waag A. Spin wave resonance in Ga_{1-x}Mn_xAs. Appl. Phys. Lett. 2003;82(5):730-732.
 14. Macdonald A.H., Schiffer P., Samarth N. Ferromagnetic semiconductors: moving beyond (Ga,Mn)As. Nature materials. 2005;4(3):195-202.
 15. Ohno H., Matsukura F. A ferromagnetic III-V semiconductor: (Ga,Mn)As. Solid State Commun. 2001;117(3):179-186.
 16. Edmonds K.W., Boguslawski P., Wang K.Y., Campion R.P., Novikov S.N., Farley N.R.S., Gallagher B.L., Foxon C.T., Sawicki M., Dietl T., Nardelli M.B., Bernholc J. Mn Interstitial Diffusion in (Ga,Mn)As. Phys. Rev. Lett. 2004;92(3):037201-1-4.
 17. Govorov A.O., Kalameitsev A.V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. Phys. Rev. B. 2005;71(3):035338-1-5.
 18. Hendorfer G., Schneider J. G-factor and effective mass anisotropies in pseudomorphic strained layers. Sem. Sci. Technol. 1991;6(7):595-601.

Сведения об авторе:

Дмитриев Алексей Иванович - кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра информационно-математических технологий и информационного права.

Aleksey I. Dmitriev - Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Information and Mathematical Technologies and Information Right.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.06.2017.

Принята в печать 17.06.2017.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 02.06.2017.

Accepted for publication 17.06.2017.

Для цитирования: Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкин Д.А. Устройство кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики контролируемых электрорадиоизделий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):55-67. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

For citation: Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Chelushkin D.A. Device of piecewise-linear approximation of transient response of controlled electronic components. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):55-67. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.2.083

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-55-67

УСТРОЙСТВО КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Исмаилов Т.А.¹, Гаджиев Х.М.², Челушкин Д.А.³

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

¹e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail:gadjiev.xad@mail.ru,

³e-mail:cheluschkindima1975@yandex.ru

Резюме. Цель. Разработка устройства кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики для контроля на автоматизированной системе производственного диагностирования параметров электрорадиоизделий на функциональных ячейках. **Методы.** Для контроля дефектных электрорадиоизделий на функциональных ячейках разработана новая измерительная входная цепь для получения интегральных переходных характеристик, причем параметры цепи могут быть программно изменены. При этом нет необходимости в исключении шунтирующего влияния соседних элементов на функциональных ячейках, т.к. будут учтены параметры всех электрорадиоизделий, подключенных к контролируемым точкам и все они будут оказывать влияние на формирование переходного процесса. **Результат.** Входная измерительная интегрирующая цепь способна контролировать переходные характеристики как отдельных электрорадиоизделий, так и групп, состоящих из разнотипных активных и пассивных электрорадиоизделий. Установлена зависимость между систематической погрешностью при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик электрорадиоизделий на функциональных ячейках и постоянной времени T входной цепи блока измерения. Минимальная величина систематической погрешности будет получена при постоянной времени входной цепи равной 0,001сек. **Вывод.** Преобразователь формы информации в автоматизированной системе производственного диагностирования для контроля переходных характеристик, снимаемых с диагностируемых электрорадиоизделий после подачи стимулирующего перепада напряжения, позволит значительно снизить время на контроль каждой функциональной ячейки за счет более быстрого процесса преобразования и более простого процесса сравнения с эталоном.

Ключевые слова: преобразователь формы информации, диагностирование, электрорадиоизделие, кусочно-линейная аппроксимация, переходные характеристики, функциональная ячейка

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
DEVICE OF PIECEWISE-LINEAR APPROXIMATION OF TRANSIENT RESPONSE
OF CONTROLLED ELECTRONIC COMPONENTS

Tagir A. Ismailov¹, Khadzhimurat M. Gadjiyev², Dmitriy A. Chelushkin³

¹⁻³ *Daghestan State Technical University,*

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

¹*e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail:gadjiev.xad@mail.ru,*

³*e-mail:cheluschkindima1975@yandex.ru*

Abstract Objective The development of a device for the piecewise-linear approximation of a transient response for controlling an automated system of the production diagnosis of electronic component parameters on functional cells. **Methods** A new measuring input circuit was developed for the control of defective electronic components on functional cells in order to obtain the integral transient response, provided that circuit parameters can be programmatically altered. In this case, there is no need to exclude the shunting influence of neighbouring elements on functional cells, since all parameters of all electronic equipment connected to the controlled points are taken into account and will influence the formation of the transient process. **Results** The input measuring integrated circuit is capable of controlling the transient responses of both individual electronic components and their groups, consisting of various types of active and passive electronic components. The dependency between the systematic error in the piecewise-linear approximation of the transient response of the electronic components on functional cells and the time constant (T) of the input circuit of the measurement unit is established. The minimum value of the systematic error will be obtained with a time constant of the input circuit equal to 0.001 sec. **Conclusion.** The information form converter in the automated production diagnostic system for monitoring transient response from the diagnosed electronic components after the stimulating voltage drop has been applied will significantly reduce the time for monitoring each functional cell due to a faster conversion process and a simpler process for comparison with reference.

Keywords: information form converter, diagnostics, electronic component, piecewise-linear approximation, transient response, functional cell

Введение. При контроле на автоматизированной системе производственного диагностирования параметров электрорадиоизделий (ЭРИ) на функциональных ячейках и выходных сигналов ЭРИ возникает задача по вводу в ЭВМ аналоговой информации. На современном этапе широкого внедрения во все области жизни ЭВМ, задача по преобразованию аналоговой информации в цифровую форму является одной из важнейших [1- 3, 10].

Постановка задачи. Перед блоком измерения, применяемом в автоматизированной системе производственного диагностирования, стоят две задачи:

- преобразование в цифровую форму и передача в ЭВМ переходных характеристик, получаемых при контроле реакций ЭРИ на функциональных ячейках после подачи стимулирующего перепада;
- преобразование аналоговых сигналов синусоидальной формы с контролем величины амплитуды частоты несущего и модулирующего колебания.

Методы исследования. Блок измерения состоит из входной цепи для подключения контролируемых ЭРИ к измерительным устройствам и преобразователю формы информации для измерения, преобразования и передачи информации в ЭВМ [8- 9, 13].

В качестве входных измерительных цепей широко используют балансные мосты, цепи типа «треугольник» или непосредственно подключают контролируемое ЭРИ на вход измерителя [2, 4, 5, 14]. Однако, все эти варианты входных цепей имеют тот недостаток, что погреш-

ность измерения зависит от величины шунтирующего влияния соседних ЭРИ и от типа, контролируемого ЭРИ. При этом величина диапазона изменений номинальных значений проверяемых ЭРИ прямо влияет на диапазон изменений выходных значений входной измерительной цепи [18- 20].

Для контроля дефектных ЭРИ на функциональных ячейках была разработана новая измерительная входная цепь для получения интегральных переходных характеристик, причем параметры цепи могут быть программно изменены (рис. 1). При этом нет необходимости в исключении шунтирующего влияния соседних элементов на функциональных ячейках, наоборот, будут учтены параметры всех ЭРИ, подключенных к контролируемым точкам, так как все они будут оказывать влияние на формирование переходного процесса [15-17].

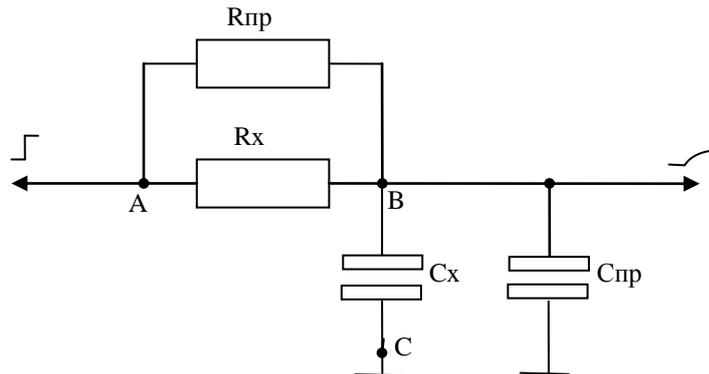


Рис.1. Входная интегрирующая измерительная цепь
Fig.1. Input integrating measuring circuit

Предлагаемая входная измерительная интегрирующая цепь способна контролировать переходные характеристики как отдельных ЭРИ, так и групп, состоящих из разнотипных активных и пассивных ЭРИ [6, 11- 12].

Применение программно-изменяемых резистора и емкости в интегрирующей цепи позволяет сузить динамический диапазон переходных характеристик за счет изменения постоянной времени цепи [7- 8].

Это осуществляется следующим образом:

- если комплексная нагрузка между контролируемыми точками носит резистивный характер, то она подключается последовательно в интегрирующую цепь (между точками А и В, рис. 1);
- если же комплексная нагрузка имеет емкостной характер, то она подключается в интегрирующую цепь параллельно (между точками В и С, рис. 1).

Тип нагрузки может быть определен в результате двукратного подключения.

При подаче положительного перепада уровней сигнала напряжение на выходе будет меняться по формуле:

$$U_c = U_e + (U_a - U_e) \exp(-t/T) \quad (1)$$

где, U_c - напряжение на выходе интегрирующей цепи; U_a - начальное напряжение на емкостях (равно нулю); t - время; T - постоянная времени, которая будет определяться следующим выражением:

$$T = 2\pi(R_{пр} + R_x)(C_{пр} + C_x) \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что для уменьшения значения диапазона возможных значений T необходимо изменять параметры таким образом, чтобы скомпенсировать значение R_x или C_x . Для требуемого диапазона изменений резисторов от 100 Ом до 200 кОм и конденсаторов от 200 пФ до 2000 мкФ (параметры пассивных ЭРИ на функциональных ячейках генератора Г4-176) потребуются аналогичные диапазоны для $C_{пр}$.

В этом случае возможна нормализация значений комплексного сопротивления между контролируруемыми точками.

Возможность по расширению диапазона контролируемых параметров ЭРИ при сохранении выходных параметров (переходных характеристик) контролирующей цепи в узком диапазоне является преимуществом разработанной входной цепи блока измерения по сравнению с существующими. Контролируемые сигналы поступают с функциональных ячеек в виде переходных характеристик, контролируемых ЭРИ.

На рис. 2 изображена дискретизация по времени и квантование по уровню переходной характеристики ЭРИ по традиционной методике.

Для контроля этих переходных характеристик был разработан преобразователь формы информации, использующий метод кусочно-линейной аппроксимации аналоговых сигналов, позволяющий получить выигрыш во времени и количестве преобразуемой информации при контроле, как переходных характеристик, так и других аналоговых сигналов.

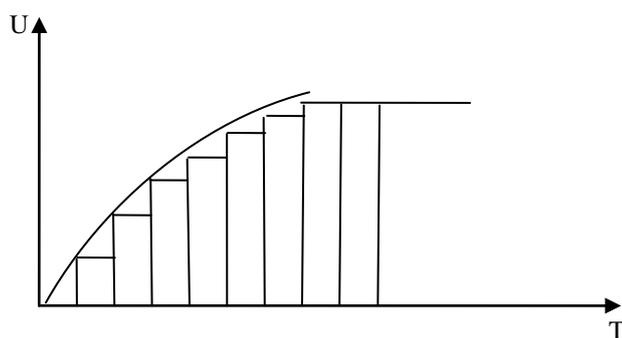


Рис.2. Дискретизация во времени и квантование по уровню переходной характеристики
Fig.2. Time-sampling and quantization by the level of the transient response

Несмотря на погрешности, возникающие при кусочно-линейной аппроксимации, такой подход допустим, так как разработанная автоматизированная система производственного диагностирования контролирует не сам аналоговый сигнал, поступающий с проверяемого ЭРИ в виде переходной характеристики или с выхода генератора, а проводит сравнение результата преобразования аналоговых сигналов, снятых с эталонного ЭРИ на эталонной функциональной ячейке, или эталонного сигнала, поступившего с образцового генератора.

Поэтому систематическая погрешность преобразования при кусочно-линейной аппроксимации не будет влиять на точность контроля, так как систематические погрешности при контроле эталонной и проверяемой функциональной ячейке равны и будут скомпенсированы.

Проведение аппроксимации возможно различными способами.

Наиболее приемлемым является косвенный анализ аппроксимируемой функции, при котором аналоговый сигнал разбивается на ряд линейных отрезков, с определенной погрешностью повторяющих форму аналогового сигнала.

Информацию об отрезке можно представить в различной форме, однако, наиболее целесообразной формой для передачи и хранения в ЭВМ является задание отрезка в виде наклона к оси абсцисс и протяженности по оси абсцисс.

Алгебраически это выглядит в виде задания первой производной и длины проекции отрезка. Физический смысл аппроксимации аналогового сигнала можно отобразить в виде скорости нарастания напряжения и времени, в течение которого величина этой скорости не претерпела значительного изменения.

Значение погрешности аппроксимации в этом случае определяется величиной второй производной от функции изменения аналоговых сигналов.

Способ преобразования будет заключаться в определении величин первой и второй производных от функции изменения аналоговых сигналов с запоминанием величины первой производной и интервала времени, в течение которого вторая производная не изменяла своего значения свыше величины, определяющей погрешность кусочно-линейной аппроксимации.

При этом момент совпадения величин второй производной с заданной погрешностью служит для фиксации уровня первой производной (наклона отрезка аппроксимации) и времени, в течение которого производная не превышала заданной погрешности (рис. 3).

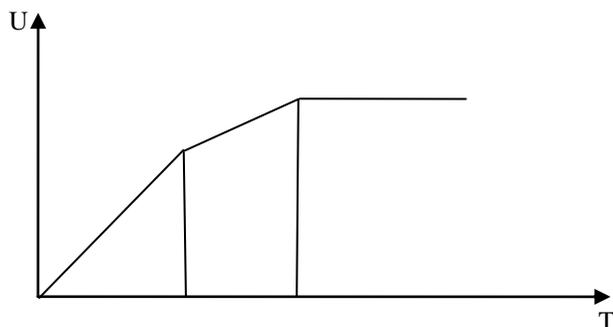


Рис.3. Аппроксимация переходной характеристики при помощи первой и второй производной

Fig.3. Approximation of the transition characteristic by means of the first and second derivatives

Для проведения кусочно-линейной аппроксимации с заданной погрешностью необходимо определить такие характеристики функции, как первую и вторую производные, для этой цели могут служить стандартные схемы дифференцирования на базе операционных усилителей.

Идеальный дифференциатор представлен на рисунке 4.

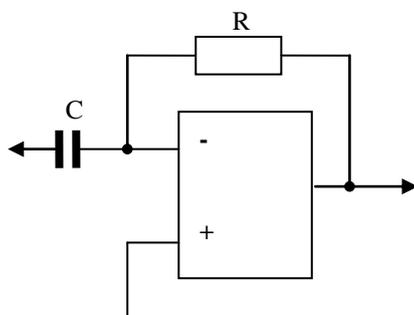


Рис.4. Идеальное дифференцирующее устройство

Fig. 4. The ideal differentiating device

Дифференцирующее устройство выполняет математическую операцию дифференцирования над входным сигналом. Для проведения двойного дифференцирования понадобятся два дифференцирующих устройства, включенных последовательно, для получения первой и второй производных.

Однако их применение для проведения кусочно-линейной аппроксимации неэффективно, так как для преобразования в цифровую форму с последующим вводом в ЭВМ потребуются двойное измерение на АЦП первой и второй производных с последующим запоминанием и анализом большого количества информации. Не меньшее количество информации потребуется и при предварительном аналого-цифровом преобразовании с последующим анализом в ЭВМ значений производных.

С целью уменьшения количества преобразуемой информации, а, соответственно, и повышения быстродействия системы в целом можно для фиксации значений производных контролируемой функции применять преобразователь напряжение - код, однако измерения прово-

дить не непрерывно, а только в те моменты времени, когда вторая производная меняет свое значение, свыше заданного уровня.

Структурная схема разработанного преобразователя формы информации изображена на рис. 5 и работает следующим образом.

По командам устройства управления 7 устройство выборки хранения 1, 4 поочередно дискретизируют преобразуемый сигнал с минимальным шагом дискретизации. Дифференциальный усилитель 2 выделяет текущую разность между двумя выборками, то есть определяет первую производную, которая запоминается устройством выборки-хранения 5 и подается на компаратор 3. Устройство выборки-хранения 5 запоминает начальное значение первой производной и сравнивает его на компараторе 3 со всеми последующими значениями.

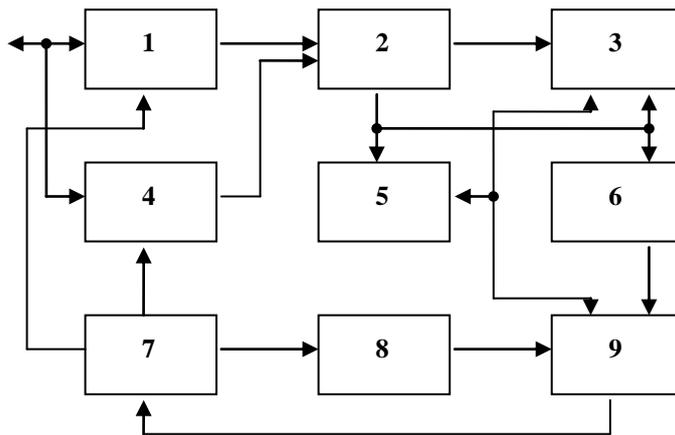


Рис.5. Структурная схема аппроксимирующего преобразователя формы информации:

1, 4, 5 – устройство выборки - хранения; 2 - разностный усилитель; 3 – компаратор; 6 - преобразователь напряжение – код; 7 - устройство управления; 8 – счетчик; 9 - интерфейс

Fig.5. Structural diagram of the approximating converter of the information form:

1, 4, 5 - sampling-storage device; 2 - difference amplifier; 3 - comparator; 6 - pre-stresser - code; 7 - control device; 8 - counter; 9 – interface

До тех пор, пока значение первой производной не будет меняться, на выходе компаратора 3 будет присутствовать ноль, что соответствует нулевому значению второй производной. Если же значение первой производной изменится, то на выходе компаратора появится единица, которая будет сигналом для записи в устройство выборки - хранения 5 нового значения первой производной и записи в интерфейс 9 информации со счетчика 8 и преобразователь напряжение - код 6. Счетчик 8 хранит информацию о количестве шагов дискретизации, в течение которого первая производная не меняла своего значения. Преобразователь напряжение - код 6 содержит информацию о величине первой производной в устройство выборки - хранения 5.

Следовательно, в ЭВМ будет записываться информация об угле наклона функции (первая производная) и времени сохранения этого угла (количество шагов дискретизации). В конце преобразования в ЭВМ будет храниться результат аппроксимации преобразуемой функции в виде прямых отрезков.

Такое представление преобразуемой функции имеет преимущество по сравнению с традиционными формами преобразования.

Во-первых, максимальное быстродействие ограничивается не преобразователем напряжение - код, а устройством выборки - хранения, что значительно более легко достижимо, так как устройство выборки – хранения - это обычная ключевая схема (транзисторный ключ и запоминающая емкость); во-вторых, к преобразователю напряжение - код предъявляются меньшие требования, так как он работает в преобразователе формы информации в щадящем режиме, который обусловлен большим временем, отводимым на преобразование, меньшим динамическим диапазоном преобразуемых сигналов. Так, например, при частоте дискретизации 1мкс традиционный преобразователь формы информации должен содержать преобразователь напряжение

- код способный за 1мкс преобразовать максимально возможный сигнал динамического диапазона.

Разработанный преобразователь формы информации должен преобразовать значение первой производной, то есть разницу между двумя соседними выборками, которая значительно меньше всего динамического диапазона преобразуемого сигнала, причем, за время равное не одной выборке, а нескольким (время, за которое первая производная не меняла своего значения). Систематическая погрешность при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик может быть определена по графику, изображенному на рис. 6.

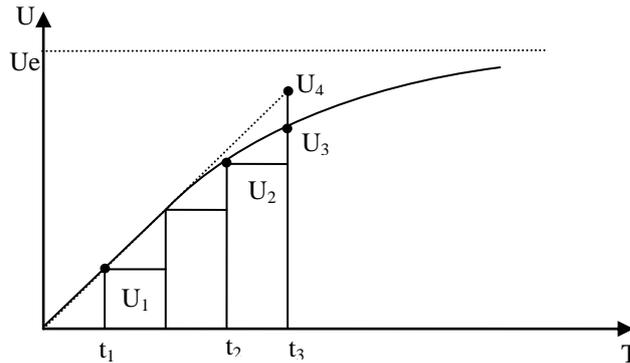


Рис.6. Определение систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации переходной характеристики
Fig.6. Definition of a systematic error in the case of a piecewise linear approximation of the transient characteristic

Напряжение переходного процесса изменяется по закону:

$$U(i) = Ue \left[1 - \exp \left[-\frac{t(i)}{T} \right] \right], \quad (3)$$

где $U(i)$ - напряжение выборки; Ue - напряжение стимулирующего воздействия, подаваемого на ЭРИ; $t(i)$ - время выборки; T - постоянная времени входной измерительной цепи и контролируемой группы ЭРИ.

Время t_1 равно шагу дискретизации. Величина первой производной определяется как U_1/t_1 . В момент времени t_3 значение первой производной будет равно разности напряжений двух соседних выборок, деленных на шаг дискретизации:

$$Y' = \frac{U_3 - U_2}{t_3 - t_2} = \frac{U_3 - U_2}{t_1}. \quad (4)$$

Величина отличия начального значения первой производной U_1/t_1 и первой производной в момент времени t_3 равна величине U_k (напряжение срабатывания компаратора 3, являющееся допустимым уровнем второй производной). Из графика на рис. 6 видно, что расчетное значение напряжения функции U_4 в момент выборки t_3 отличается от реального значения функции U_3 . Напряжение U_4 можно найти по графику, изображенному на рисунке 6. Из подобия треугольников следует, что $U_4 > U_1$ во столько раз, во сколько $t_3 > t_1$. Отсюда:

$$U_4 = (U_1 \cdot t_3) / t_1. \quad (5)$$

Для определения величины систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик необходимо предварительно рассчитать значения напряжений U_1, U_2, U_3 в соответствии с формулой (3), для чего функцию экспоненты разложим в степенной ряд:

$$\exp \left[-\frac{t(i)}{T} \right] = 1 - \frac{t(i)}{T} + \frac{1}{2!} \left[\frac{t(i)}{T} \right]^2 - \frac{1}{3!} \left[\frac{t(i)}{T} \right]^3 + \dots \quad (6)$$

Отбросим члены со степенями больше двух как стремящиеся к нулю при условии, что $t(i) \ll T$ (величина T задается изменением параметров входной цепи по формуле (2)):

$$\exp\left[-\frac{t(i)}{T}\right] = 1 - \frac{t(i)}{T} + \frac{1}{2}\left[\frac{t(i)}{T}\right]^2 \quad (7)$$

Подставив в (3) получим:

$$U(i) = U_e \left[1 - 1 + \frac{t(i)}{T} - \frac{1}{2}\left[\frac{t(i)}{T}\right]^2 \right]. \quad (8)$$

Раскрывая скобки и проводя приведение подобных, можно получить:

$$U(i) = \frac{U_e \cdot t(i)}{T} \left[1 - \frac{t(i)}{2T} \right]. \quad (9)$$

Пользуясь формулой (9), найдем U_1 , U_2 , U_3 :

$$U_1 = \frac{U_e \cdot t_1}{T} \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right], \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{U_e \cdot t_2}{T} \left[1 - \frac{t_2}{2T} \right], \quad (11)$$

$$U_3 = \frac{U_e \cdot t_3}{T} \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right]. \quad (12)$$

Относительную погрешность кусочно-линейной аппроксимации можно определить из графика на рис. 6 по формуле:

$$dU = \frac{U_4 - U_3}{U_3} 100\%, \quad (13)$$

где, dU - относительная погрешность в процентах.

Разделив на U_3 , получим:

$$dU = \left[\frac{U_4}{U_3} - 1 \right] 100\%. \quad (14)$$

Подставляя значения U_4 из формулы (5), получим:

$$dU = \frac{U_1 \cdot t_3}{U_3 \cdot t_1} 100\%. \quad (15)$$

Продолжая подстановку U_1 и U_3 из формул (10) и (12) и, проводя приведение подобных, придем к виду:

$$dU = \left[\frac{2T - t_1}{2T - t_3} - 1 \right] 100\%. \quad (16)$$

Приведа к общему знаменателю, получим:

$$dU = \left[\frac{2T - t_1}{2T - t_3} - \frac{2T - t_3}{2T - t_3} \right] 100\%. \quad (17)$$

Сокращая, найдем значение относительной погрешности:

$$dU = \left[\frac{t_3 - t_1}{2T - t_3} \right] 100\%. \quad (18)$$

Для нахождения времени t_3 , необходимо определить величину порогового напряжения компаратора, влияющего на величину t_3 .

Оно равняется:

$$U_k = U_1 - (U_3 - U_2) = U_1 + U_2 - U_3. \quad (19)$$

После подстановки значений U_1, U_2, U_3 из формул (10) – (12) получим:

$$U(i) = \frac{U_e}{T} \left[t_1 \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right] + t_2 \left[1 - \frac{t_2}{2T} \right] - t_3 \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right] \right]. \quad (20)$$

Из графика на рис. 6 следует, что:

$$t_2 = t_3 - t_1. \quad (21)$$

Поэтому, после подстановки t_2 в уравнение (20), приходим к следующему виду:

$$U(i) = \frac{U_e}{T} \left[t_1 \left[1 - \frac{t_1}{2T} \right] + (t_3 - t_1) \left[1 - \frac{t_3 - t_1}{2T} \right] - t_3 \left[1 - \frac{t_3}{2T} \right] \right]. \quad (22)$$

Раскрывая скобки и, проводя приведение подобных, членов получим:

$$U_k = U_e \cdot t_1 (t_3 - t_1) / T^2. \quad (23)$$

Преобразовав, найдем t_3 :

$$t_3 = \frac{U_k \cdot T^2}{U_e \cdot t_1} + t_1. \quad (24)$$

Подставляя t_3 в формулу (18), получим:

$$dU = \frac{(U_k \cdot T^2 / U_e \cdot t_1) + t_1 - t_1}{2T - (U_k \cdot T^2 / U_e \cdot t_1) - t_1}. \quad (25)$$

Упростив выражение, найдем значение относительной погрешности:

$$dU = \frac{U_k \cdot T^2}{2U_e \cdot T \cdot t_1 - U_k \cdot T^2 - U_e \cdot t_1^2}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что погрешность при кусочно-линейной аппроксимации тем меньше, чем меньше постоянная времени входной цепи T и напряжение срабатывания компаратора U_k . Увеличение стимулирующего перепада напряжения U_e , подаваемого на проверяемые ЭРИ, также уменьшает погрешность кусочно-линейной аппроксимации, но значительное увеличение (свыше 1В) приходит в противоречие с принципом неповреждения компонентов при проверке. Поэтому для повышения точности операций контроля необходимо выбрать компаратор с минимально возможным пороговым напряжением срабатывания и задавать минимальную величину постоянной времени входной цепи при помощи изменяемых программно конденсатора и резистора во входной цепи.

Обсуждение результатов. Количество преобразуемой информации при кусочно-линейной аппроксимации значительно меньше и представлено в доступной для сравнения и хранения форме. Например, при преобразовании интегральной переходной характеристики (рис. 2) существующие преобразователи формы информации выдадут значение функции в дискретные моменты времени, в виде набора напряжений и моментов времени, соответствующих этим напряжениям. Разработанный преобразователь формы информации выдаст только значения наклона интегральной характеристики и времени (рис. 3), в течение которого он держался, поэтому процедура хранения и сравнения с ожидаемыми значениями существенно проще.

Было проведено исследование по установлению зависимости между систематической погрешностью при кусочно-линейной аппроксимации переходных характеристик ЭРИ на функциональных ячейках и постоянной времени T входной цепи блока измерения. Изменением величин параметров входной цепи ($R_{пр}$ и $C_{пр}$) были заданы всевозможные значения постоянной времени T .

Для каждого значения T проводился расчет значения систематической погрешности по формуле (26), при этом уровень стимулирующего напряжения, подаваемого в качестве входного воздействия, равнялся $U_e=1В$. Напряжение срабатывания компаратора принималось равным 5мВ.

Результаты проведенного исследования приведены на графике на рисунке 7. Расхождение между теоретическими и практическими значениями вызваны тем, что при уменьшении значения постоянной времени T до величины шага дискретизации t_1 , возрастает величина погрешности, вносимая отброшенными членами уравнения (6) (члены уравнения со степенями больше двух принимались незначимыми при условии, что $t_1 \ll T$).

Из графика на рис. 7 можно сделать вывод, что минимальная величина систематической погрешности будет получена при постоянной времени входной цепи равной 0,001сек. Поэтому необходимо при контроле параметров ЭРИ на функциональных ячейках задавать параметры входной цепи таким образом, чтобы результирующее значение постоянной времени входной цепи равнялось 0,001 сек.

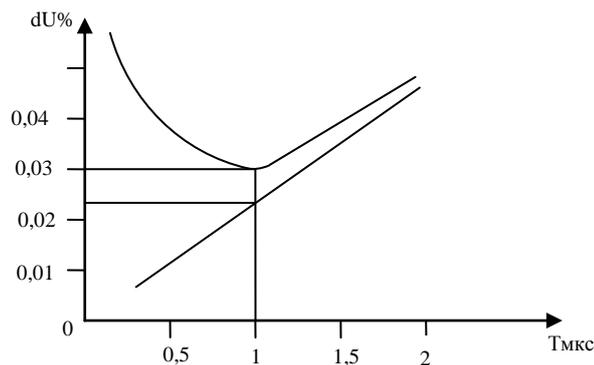


Рис.7. Зависимость систематической погрешности при кусочно-линейной аппроксимации
Fig.7. Dependence of the systematic error for piecewise-linear approximation

Вывод. Следовательно, применение преобразователя формы информации в автоматизированной системе производственного диагностирования для контроля переходных характеристик, снимаемых с диагностируемых ЭРИ после подачи стимулирующего перепада напряжения, позволит значительно снизить время на контроль каждой функциональной ячейки за счет более быстрого процесса преобразования и более простого процесса сравнения с эталоном.

Разработанный преобразователь формы информации пригоден для контроля аналоговых сигналов как постоянных, так и меняющихся во времени. Постоянные напряжения преобразуются на преобразователе формы информации с максимальным быстродействием за один шаг дискретизации.

Библиографический список:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. IEEE Transactions on Automatic Control. 2015, vol.60, no.6, pp.1653-1658, DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2015, no.3(34), pp. 9-12.
3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. Active and Passive Electronic Components. 2012, vol. 2012, pp. 908716, DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. Journal european des Systemes Automatises. 2012, vol.46, no.2-3, pp. 267-290, DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.
5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. 2016, no.2, pp. 65-69.

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

References:

1. Granichin O.N., Amelina N.O. Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2015;60(6):1653-1658. DOI: 10.1109/TAC.2014.2359711.
2. Klyatchenko Ya. Determination of hardware on fpga operational probabilities under conditions with distortion of logical signals. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2015;3(34):9-12.
3. Rybin Y.K. The nonlinear distortions in the oscillatory system of generator on CFOA. *Active and Passive Electronic Components*. 2012;2012:908716. DOI: 10.1155/2012/908716.
4. Scibilia F., Hovd M., Olaru S. Explicit model predictive control VIA Delaunay tessellations. *Journal europeen des Systemes Automatises*. 2012;46(2-3):267-290. DOI: 10.3166/JESA.46.267-290.
5. Sobchuk N., Slobodianiuk O. Determination of optimal value of testing voltage for efficient control of the insulation. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2016;2:65-69.

6. Wang L., Sun L., Hong J. Modified equations for weakly convergent stochastic symplectic schemes via their generating functions. *BIT Numerical Mathematics*. 2016;56(3):1131-1162. DOI: 10.1007/s10543-015-0583-8.
7. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti*. S.-Pb.: "Abris"; 2012. 392 s. [Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statistical models in reliability theory*. Saint-Petersburg: "Abris"; 2012. 392 p. (in Russ.)]
8. Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem*. St. Oskol: "TNT"; 2013. 352 s. [Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Skhirtladze A.G. *Diagnostics and reliability of automated systems*. St. Oskol: "TNT"; 2013. 352 p. (in Russ.)]
9. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem*. M.: "Lenand"; 2016. 256 s. [Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Models and methods of reliability calculation of technical systems*. Moscow: "Lenand"; 2016. 256 p. (in Russ.)]
10. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti*. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz. M.: "Librokom"; 2013. 584 s. [Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Mathematical methods in the reliability theory*. Major features of reliability and their statistical analysis. Moscow: "Librokom"; 2013. 584 p. (in Russ.)]
11. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem*. S.-Pb.: "Lan"; 2011. 352 s. [Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Providing reliability of complex technical systems*. Saint-Petersburg: "Lan"; 2011. 352 p. (in Russ.)]
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. *Primenenie mnogokaskadnykh termoelektricheskikh moduley dlya okhlazhdeniya protsessora komp'yutera*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2004;7:25-29. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. *Application of multi-cascade thermoelectric units for computer CPU cooling*. *Journal of Instrument Engineering*. 2004;7:25-29. (in Russ.)]
13. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem*. M.: "Fizmatlit"; 2010. 608 s. [Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Reliability theory of complex systems*. Moscow: "Fizmatlit"; 2010. 608 p. (in Russ.)]
14. Owen Bishop. *Elektronnye skhemy i sistemy (Electronics Circuits and Systems)*. M.: "DMK-Press"; 2016. 576 s. [Owen Bishop. *Electronics Circuits and Systems*. Moscow: "DMK-Press"; 2016. 576 p. (in Russ.)]
15. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Ustroystvo dlya termostatirovaniya komp'yuternogo protsessora*. Patent RU №2360380, MPK: H05K 7/20, G06F 1/20. Byul. №18. Opubl. 27.06.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Device for thermal stabilisation of computer CPU*. Patent RU №2360380, MPK: H05K 7/20, G06F 1/20. Bull. №18. Publ. 27.06.2009. (in Russ.)]
16. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. *Termoelektricheskoe ustroystvo termoregulirovaniya komp'yuternogo protsessora s primeneniem plavyashchegosya veshchestva*. Patent RU №2256946, MPK: G05D23/20, F25B21/02. Byul. №20. Opubl. 20.07.2005. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A. *Thermo-electric device of thermal regulation of computer's CPU with the application of melting substance*. Patent RU №2256946, MPK: G05D23/20, F25B21/02. Bull. №20. Publ. 20.07.2005. (in Russ.)]
17. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Termoelektricheskoe ustroystvo termootabilizatsii komponentov vychislitel'nykh sistem s vysokimi teplovydeleniyami*. Patent RU №2369894, MPK: G05D23/22, H01L35/28. Byul. №28. Opubl. 27.03.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. *Thermo-electric device of thermal stabilisation of computation engineering components with high heat emissions*. Patent RU №2369894, MPK: G05D23/22, H01L35/28. Bull. №28. Publ. 27.03.2009. (in Russ.)]
18. Petrov V.P. *Regulirovka, diagnostika i monitoring rabotosposobnosti smontirovannykh uzlov, blokov i priborov radioelektronnoy apparatury, apparatury provodnoy svyazi, elementov uzlov impul'snoy i vychislitel'noy tekhniki*. Uchebnik. M.: "Akademiya"; 2016. 224 s. [Petrov V.P. *Regulation, diagnostics and monitoring of working capacity of mounted units, blocks and de-*

vices of radio-electronic apparatus, wire connection apparatus, and units of impulse and computation engineering. A tutorial. Moscow: "Akademiya"; 2016. 224 p. (in Russ.)]

19. Shishmarev V.Yu. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Ucheb-
nik. Rostov-on-Don: "Feniks"; 2017. 448 s. [Shishmarev V.Yu. Automation of industrial pro-
cesses in machine-building. A Tutorial. Rostov-on-Don: "Feniks"; 2017. 448 p. (in Russ.)]

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

Сведения об авторах:

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

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

Челушкин Дмитрий Алексеевич – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

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

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

Dmitriy A. Chelushkin – Graduate student, Department of theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 11.06.2017.

Принята в печать 26.06.2017.

Conflict of interest

Received 11.06.2017.

Accepted for publication 26.06.2017.

Для цитирования: Кадирова Д.К. Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи проточного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 68-76. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

For citation: Kadirova D.K. Flow type thermoelectric heat transfer intensifier. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 68-76. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.382

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-68-76

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИНТЕНСИФИКАТОР ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Кадирова Д.К.

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, д.70, Россия,
e-mail: kadirova.djamilya@yandex.ru

Резюме: *Цель.* Целью исследования является разработка конструкции, обеспечивающей повышение интенсивности теплообмена между средами и оптимизацию энергетических и массогабаритных показателей приборов. **Метод.** Применен метод теоретического исследования термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в котором за счет использования принудительного продува воздушного потока вдоль спаев термоэлементов обеспечивается более высокий коэффициент теплообмена между последними и движущимися в транспортных зонах средами, температура которых подлежит изменению. **Результат.** Предложена конструкция термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в которой для увеличения коэффициента теплообмена между спаями термоэлементов и движущимися в транспортных зонах средами использован принудительный продув воздушного потока в соответствующих зазорах посредством вентиляторных агрегатов. Рассмотрена модель прибора, построенная на основе решения уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям термоэлектрической батареи, зазорах между транспортными зонами и поверхностями батареи для условий прямотока. Проведены теоретические исследования интенсификатора теплопередачи по разработанной модели. Получены зависимости изменения температуры сред на выходе интенсификатора теплопередачи от величины коэффициента теплообмена между спаями термоэлектрической батареи и воздушной средой в зазоре при фиксированной величине тока питания термоэлектрической батареи, равной 5 А. **Вывод.** Установлено, что увеличение разницы температур сред на входе способствует более резкому убыванию функций зависимости предельных длин термоэлектрической батареи от коэффициента теплообмена между спаями термоэлектрической батареи и воздушной средой в зазоре при постоянном токе питания.

Ключевые слова: термоэлектрический интенсификатор теплопередачи, термоэлектрическая батарея, температура, модель, движущаяся среда, коэффициент теплообмена

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING FLOW TYPE THERMOELECTRIC HEAT TRANSFER INTENSIFIER

Djamilia K. Kadirova.

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: kadirova.djamilya@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a construction design that increases the intensity of heat exchange between media and optimises the energy and mass dimensions of the instrument indicators. **Methods** A method for the theoretical investigation of thermoelectric heat transfer intensifiers is used, which, by means of forced air flows along the junctions of thermoelements, provides a higher coefficient of heat exchange between media moving in transport zones with altering temperature. **Results** The construction of a thermoelectric heat transfer intensifier is proposed, which uses fan assemblies to force air flow in the respective gaps between the junctions of the thermoelements and the media moving in transport zones to increase the heat transfer coefficient. A device model based on the solution of the heat balance equations for media flows in transport zones, thermoelectric battery surfaces and gaps between transport zones and battery surfaces for direct flow conditions is considered. Theoretical studies of the heat transfer intensifier using the developed model were carried out. The dependencies of the media temperature alterations at the output of the heat transfer intensifier on the value of the heat transfer coefficient between the junctions of the thermoelectric battery and the air medium in the gap are determined for a fixed value of the thermoelectric battery supply current equal to 5 A. **Conclusion** It is established that an increase in media temperature difference at the input contributes to a sharper decrease in the dependencies of the limiting lengths of the thermoelectric battery on the heat transfer coefficient between the junctions of the thermoelectric battery and the air medium in the gap at a constant supply current.

Keywords: thermoelectric heat transfer intensifier, thermoelectric battery, temperature, model, moving medium, heat transfer coefficient

Введение. В настоящее время особую актуальность приобретают задачи исследования специальных технических средств для обеспечения интенсивной теплопередачи от источников с высокими тепловыми нагрузками к приемникам теплоты с целью выравнивания температурных уровней объектов [1-4]. Данные вопросы особенно актуальны для утилизации теплоты, выделяемой при выполнении тех или иных технологических процессов на производстве, отводе теплоты от охлаждающих жидкостей тепловыделяющих элементов - ТВЭЛов - ядерных реакторов и т.п.

Постановка задачи. Одним из перспективных направлений при создании систем подобного типа является использование термоэлектрических преобразователей энергии, обеспечивающих построение экономичных, малогабаритных теплообменных аппаратов с широкими функциональными возможностями по поддержанию заданного теплового режима [6-12]. Так, в этой области можно выделить работы, где исследованы возможности применения термоэлектрических преобразователей энергии для интенсификации теплообмена между потоками двух жидких или газообразных сред [13-27].

Однако несмотря на наличие теоретических и экспериментальных исследований в данной области все еще остается актуальным вопрос по повышению интенсивности теплообмена между средами, оптимизации энергетических и массогабаритных показателей приборов.

Методы исследования. В целях проведения исследования разработана конструкция прибора для интенсификации процесса теплопередачи между потоками двух сред, структурная схема которого изображена на рис.1, а внешний вид на рис.2.

Аппарат состоит из термоэлектрической батареи (ТЭБ) 1, составленной из идентичных по размерам и физическим свойствам термоэлементов, питаемой источником электрической энергии (на рис.1 не показан), обе поверхности которой находятся на некотором расстоянии от стенок 2 транспортных зон 3 с движущимися в них средами 4.

В начале и конце транспортных зон 3 в направлении, перпендикулярном движению сред 4 устанавливаются вентиляторные агрегаты 5, запитываемые от того же источника электрической энергии, что и ТЭБ 1.

Вентиляторные агрегаты 5 осуществляют продув воздуха в зазоре между стенками 2 транспортных зон 3 и поверхностями ТЭБ 1, причем один вентиляторный агрегат работает на вдув воздушного потока, а второй на его выдув.

ТЭБ 1, транспортные зоны 3 и вентиляторные агрегаты 5 образуют жесткую механическую конструкцию посредством крепежных приспособлений 6.

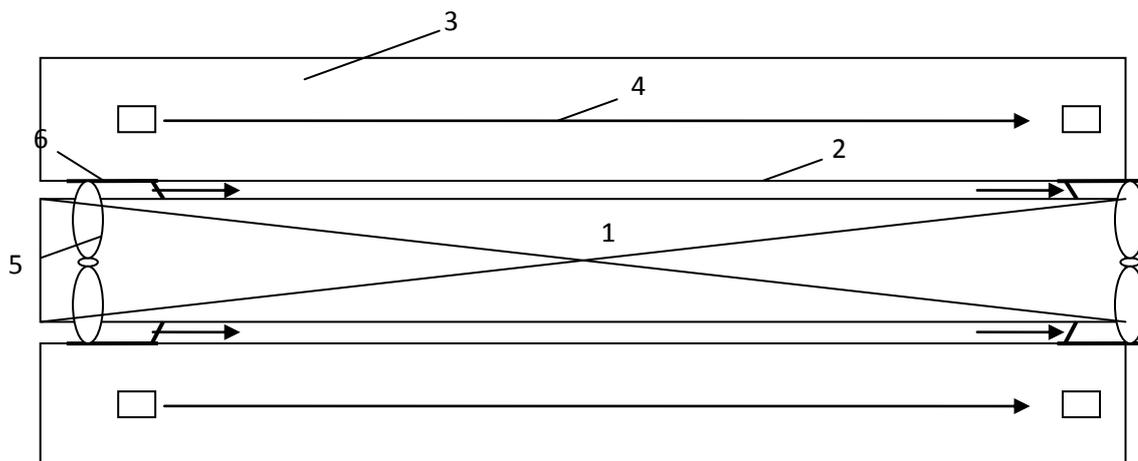


Рис.1. Структурная схема термоэлектрического интенсификатора теплопередачи
Fig.1. The structural scheme of the thermoelectric heat transfer intensifier



Рис.2. Внешний вид термоэлектрического интенсификатора теплопередачи
Fig.2. Appearance of the thermoelectric heat transfer intensifier

Термоэлектрический интенсификатор теплопередачи функционирует следующим образом.

При пропускании через ТЭБ 1 постоянного электрического тока от источника энергии на одних спаях термоэлементов будет поглощаться теплота Пельтье, а на других - выделяться.

Если холодные спаи термоэлементов будут находиться в непосредственной близости со стенкой 2 транспортной зоны 3 с горячей движущейся средой 4, а горячие спаи термоэлементов - со стенкой транспортной зоны с холодной движущейся средой, то за счет имеющегося перепада температур будет происходить интенсификация обмена тепловой энергией между двумя потоками сред. При этом продув воздуха в зазорах между стенками 2 транспортных зон 3 и поверхностями ТЭБ 1 воздушными агрегатами 5 даст возможность повысить коэффициент теплопередачи между ними за счет обеспечения режима вынужденной конвекции, при котором значение данного коэффициента выше, чем в случае кондуктивного механизма теплообмена.

Обсуждение результатов. Для рассмотренной конструкции разработана математическая модель, описывающая протекающие в приборе электро- и теплофизические процессы.

Модель построена на основе уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям ТЭБ, зазорах между транспортными зонами и поверхностями ТЭБ [5]. Рассматривается условие прямотока.

Уравнения теплового баланса в зазорах между стенками транспортных зон и спаями ТЭБ для приведенной схемы выглядят следующим образом:

$$W' \frac{dT_1}{dx} = \alpha' L (T_{1ТЭБ} - T_1) \quad (1)$$

$$W' \frac{dT_2}{dx} = \alpha' L (T_{2ТЭБ} - T_2) \quad (2)$$

где, $T_{1ТЭБ, 2ТЭБ}$ - температуры, соответственно, холодных и горячих спаев ТЭБ, $T_{1,2}$ - температуры воздушного потока в зазорах, W' - полная теплоемкость воздушной среды, протекающей вдоль спаев ТЭБ (в зазорах) в единицу времени (равна произведению массового расхода на удельную теплоемкость среды), L - длина транспортных зон, α' - коэффициент теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре.

Уравнения теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах определяются из соотношений:

$$W_1 \frac{dT_1}{dx} = \alpha_1 L (T_1' - T_1) \quad (3)$$

$$W_2 \frac{dT_2}{dx} = \alpha_2 L (T_2' - T_2) \quad (4)$$

где, $T_{1,2}$ - температуры охлаждаемых и нагреваемых сред,

W_1 - полная теплоемкость среды, протекающей вдоль холодных спаев ТЭБ в единицу времени,

W_2 - полная теплоемкость среды, протекающей вдоль горячих спаев ТЭБ в единицу времени,

α' - коэффициент теплообмена между охлаждаемой воздушной средой в зазоре и охлаждаемой средой в транспортной зоне,

α_1 - коэффициент теплообмена между нагреваемой воздушной средой в зазоре и нагреваемой средой в транспортной зоне

Уравнения теплового баланса на спаях ТЭБ со стороны термоэлементов имеют вид:

$$\alpha' (T_1' - T_{1ТЭБ}) = \bar{e} j T_{1ТЭБ} - \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (5)$$

$$\alpha' (T_{2ТЭБ} - T_2') = \bar{e} j T_{2ТЭБ} + \frac{1}{2} j^2 \rho d - \frac{\lambda}{d} (T_{2ТЭБ} - T_{1ТЭБ}), \quad (6)$$

где, \bar{e} - коэффициент термо-ЭДС термоэлементов,

j - плотность электрического тока,

ρ - удельное электрическое сопротивление ветвей термоэлементов,

λ - удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента, d - высота ветвей термоэлементов.

Решение системы уравнений (1)-(6) произведено численным методом конечных элементов. Результаты расчетов в представлении на рис.3.

В качестве среды выступала вода, характеристики термоэлементов следующие: $\lambda=1,5$ Вт/(м·К), $\rho=10,65 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\bar{\epsilon}=0,2 \cdot 10^{-3}$ В/К, $d=0,003$ м.

Коэффициенты теплообмена: $\alpha_1=\alpha_2=100$ Вт/(м²·К), величины $W'=90$ Вт/К, $W_1=W_2=120$ Вт/К.

Получены зависимости изменения температуры среды на выходе интенсификатора теплопередачи от величины коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре при фиксированной величине тока питания ТЭБ, равной 5 А, представленные на рис.3. Согласно полученным данным увеличение значения α' дает возможность снизить (увеличить) их температуру на выходе из теплообменного аппарата при его одинаковой длине.

Изменение α' на 10 Вт/(м²·К) в среднем изменяет температуру нагреваемой среды на 2 К, а нагреваемой - на 3 К.

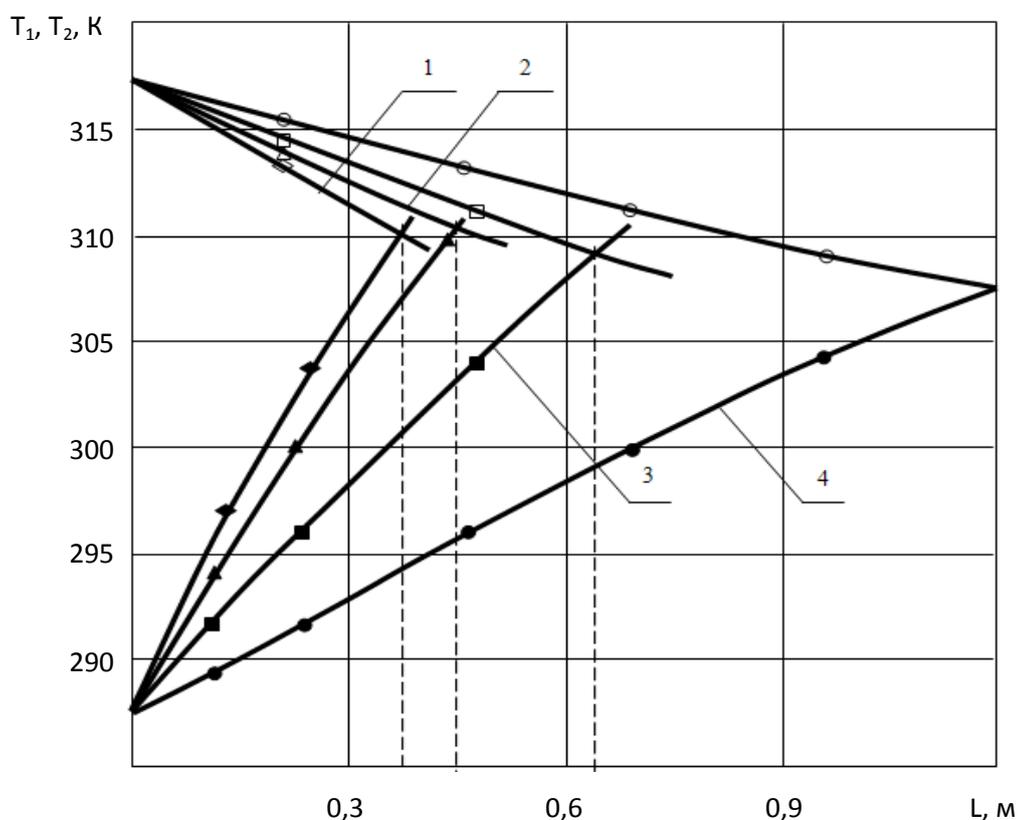


Рис.3. Изменение температуры сред на выходе из интенсификатора теплопередачи в зависимости от длины при различных величинах α' (1 - $\alpha'=90$ Вт/(м²·К); 2 - $\alpha'=80$ Вт/(м²·К); 3 - $\alpha'=70$ Вт/(м²·К); 4 - $\alpha'=60$ Вт/(м²·К))

Fig.3. The change in the temperature of the media at the exit from the heat transfer intensifier, depending on the length for different values of α' (1 - $\alpha' = 90$ W / (m²K), 2 - $\alpha' = 80$ W / (m²K), 3 - $\alpha' = 70$ W / (m²K), 4 - $\alpha' = 60$ W / (m²K))

На рис.4 представлены графики изменения предельных длин ТЭБ в зависимости от значения α' , т.е. тех длин, при которых температуры жидкостей на выходе из интенсификатора теплопередачи равны между собой. Как следует из представленных данных, чем больше разница температур теплоносителей на входе в устройство, тем больше длина ТЭБ, необходимая для удержания режима интенсификации. Графики носят монотонно убывающий характер в зависимости от коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре. Чем

больше разница температур сред на входе, тем резче убывают функции $L=L(\alpha')$ при постоянном токе питания $I=5A$.

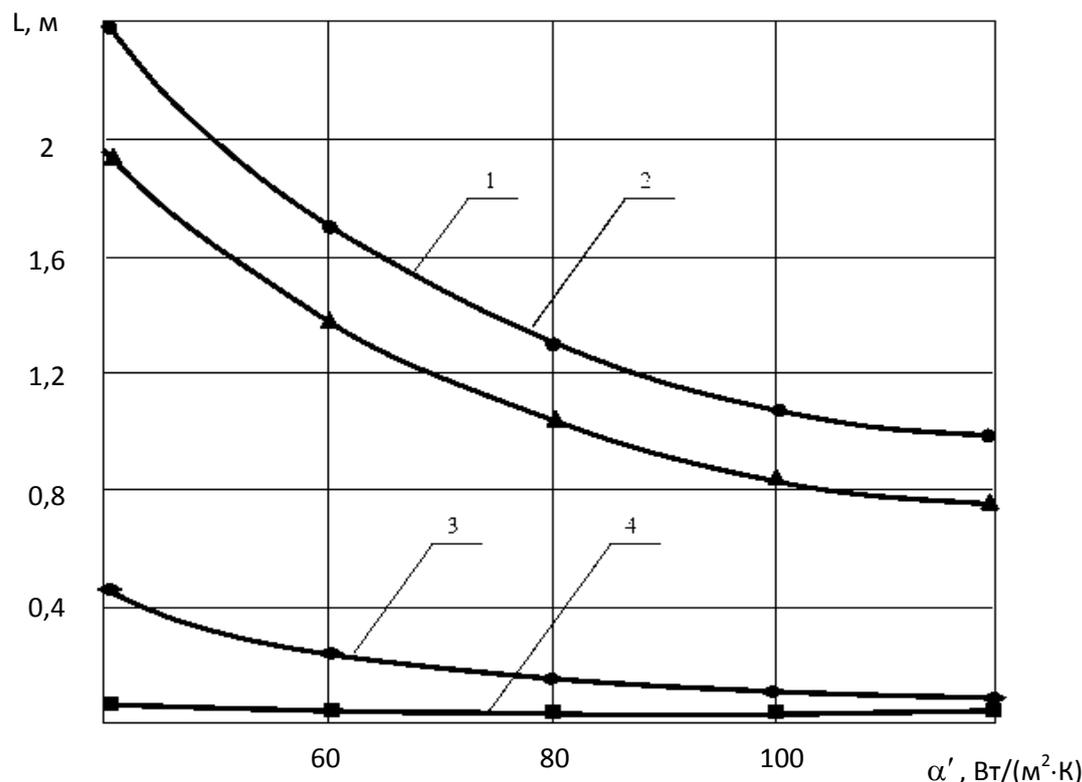


Рис.4. Зависимости предельных длин ТЭБ в режиме интенсификации от коэффициента заполнения при различных значениях перепада температуры на входе в интенсификатор теплопередачи (1 – $\Delta T = 40$ К; 2 - $\Delta T = 30$ К; 3 - $\Delta T = 10$ К; 4 - $\Delta T = 5$ К; $I = 5A$)

Fig.4. Dependence of the limiting lengths of the TEB in the intensification mode on the filling factor for different values of the temperature difference at the entrance to the heat transfer intensifier (1 - $\Delta T = 40$ К, 2 - $\Delta T = 30$ К, 3 - $\Delta T = 10$ К, 4 - $\Delta T = 5$ К, $I = 5A$)

Вывод. Предложена конструкция термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, в которой для увеличения коэффициента теплообмена между спаями термоэлементов и движущимися в транспортных зонах средами использован принудительный продув воздушного потока в соответствующих зазорах посредством вентиляторных агрегатов.

Разработана модель термоэлектрического интенсификатора теплопередачи, построенная на основе решения уравнений теплового баланса по потокам сред в транспортных зонах, поверхностям ТЭБ, зазорах между транспортными зонами и поверхностями ТЭБ для условий прямого тока.

Установлено, что увеличение значения коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре дает возможность снизить (увеличить) их температуру на выходе из теплообменного аппарата при его одинаковой длине, при этом изменение α' на $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ в среднем изменяет температуру нагреваемой среды на 2 К, а нагреваемой - на 3 К. Увеличение разницы температур сред на входе способствует более резкому убыванию функций зависимости предельных длин ТЭБ от коэффициента теплообмена между спаями ТЭБ и воздушной средой в зазоре при постоянном токе питания.

Библиографический список:

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника. - 2005. - 534 с.

2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. - Киев: Наукова Думка. - 1979. - 768 с.
3. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. - 2009. - №7. - С. 34-37.
4. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». - Санкт-Петербург. - 2008. - С. 462-468.
5. Дрейцер Г. А., Лобанов И.Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока //ИФЖ. 2003. Т.76, №1. 46—51 с.;
6. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубах с периодическими выступами // Проблемы гидродинамики и теплообмена в энергетических установках. М.: Изд. МЭИ. 2003. Т.1. 57—60 с.;
7. Осипов М. И., Олесевич Р. К., Олесевич К. А. Экспериментальное и численное исследование теплообменных аппаратов шнекового типа //Труды Второй Российской национальной конференции по тепломассообмену. М.: МЭИ. 2002. Т.6. 159—162 с.;
8. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Под общ. Ред. Ю.Ф. Гортышова / Казань.2012. Изд. дом «Логос» -559с
9. Гортышов Ю. Ф., Олимпиаев В. В., Попов И. А. Эффективность промышленно эффективных интенсификаторов теплопередачи (Обзор. Анализ. Рекомендации) // Известия РАН, Энергетика. 2002. № 3. 102—118 с.;
10. Walker, G., Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide, 2nd ed., Hemisphere Publishing, Washington, 1990.
11. Hewitt, G.F., Heat Exchanger Design Handbook, Begell House, 1990
12. Shah, R.K. Compact Heat Exchangers – Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap.13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
13. Zimparov V. D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures //Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. v.43. No 17. P.3137—3150;
14. Chinangad R. S., Master B. I., Thome J. R. Helixchanger Heat Exchanger: Single — Phase and Two-Phase Enhancement // Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. New York, Wallingford (UK). Begell House, Inc. 1999. P.471—477;
15. Dreitser G. A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications) //Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London. Kruger Academic Publications. 2003. P.201—220;
16. O.G. Martynenko International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 41, Issue 11, June 1998, Pages 1371-1384
17. Muhammad Sajid, Ibrahim Hassan, Aziz Rahman. An overview of cooling of thermoelectric devices// School of Mechanical & Manufacturing Engineering (SMME), National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan/ Texas A&M University at Qatar, P.O. Box 23874, Doha, Qatar. Energy. Volume 118, 1 January 2017, Pages 1035–1043
18. Kazuaki Yazawaa, Ali Shakouria, Terry J. Hendricksb. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes// Birk Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA/ NASA - Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA. Volume 185, 15 December 2016, Pages 598–602
19. Ahmed El-Desouky, Michael Carter, Matthieu A. Andre, Philippe M. Bardet, Saniya LeBlanc. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices//Department of Mechanical & Aerospace Engineering, The George Washington University, USA. Progress in Materials Science. Volume 83, October 2016, Pages 330–382
20. Chhatrasal Gaynera, Kamal K. Kara. Recent advances in thermoelectric materials// Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Materials Science Programme, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India/ Advanced Nanoengineering Materials Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur 208016, India. Applied Energy. Volume 168, 15 April 2016, Pages 65–74
21. T. Zhang. New thinking on modeling of thermoelectric devices//Institute of Northern Engineering, College of Engineering and Mines, University of Alaska Fairbanks, 306 Tanana Drive, Duckering Building, Fairbanks, AK 99775, USA/ Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 38, October 2014, Pages 903–916
22. Elena Otilia Virjogheb, Diana Enescua, Elena Otilia Virjogheb. A review on thermoelectric cooling parameters and performance// Department of Electronics, Telecommunications and Energy, Valahia University of Tar-

- goviste, Unirii Avenue 18-20, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania/ Department of Automatics, Informatics and Electrical Engineering, Valahia University of Targoviste, 130082 Targoviste, Dambovita, Romania. Applied Thermal Engineering. Volume 66, Issues 1–2, May 2014, Pages 15–24
23. Dongliang Zhao, Gang Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications// University of Wyoming, Department of Civil and Architectural Engineering, 1000 E. University Avenue, Dept. 3295, Laramie, WY 82071, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 23, Issue 8, June 2003, Pages 913–935
24. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications// Institute of Building Technology, School of the Built Environment, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK. Applied Thermal Engineering. Volume 64, Issues 1–2, March 2014, Pages 252–262
25. J. Steven Browna, Piotr A. Domanskib. Review of alternative cooling technologies// Department of Mechanical Engineering, Catholic University of America, 620 Michigan Avenue, NE, Washington, DC 20064, USA/ National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA. Applied Thermal Engineering. Volume 63, Issue 1, 5 February 2014, Pages 33–39
26. Fábio A.S. Mota, Mauro A.S.S. Ravagnani, E.P. Carvalho. Optimal design of plate heat exchangers// Chemical Engineering Graduate Studies Program, State University of Maringá, Av. Colombo, 5790 Maringá, PR, Brazil. Возобновляемые и устойчивые источники энергии комментарии. Том 16, Выпуск 4, Май 2012, Стр. 1883-1891
27. Mazen M. Abu-Hader. Plate Heat Exchangers: Recent Achievements // Faculty of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Technology, Ltd.-Balka Applied University Address: P. O. Box: 9515 Al-weibedah, 11191, Amman, Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 9, December 2011, Pages 4855-4875

References:

1. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensivatory teploperedachi. SPb.: Politehnika; 2005. 534 s. [Ismailov T.A. Thermal-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politehnika; 2005. 534 p. (in Russ.)]
2. Anatyshuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 s. [Anatyshuk L.I. Thermal elements and thermal-electric devices. Kiev: Naukova Dumka; 1979. 768 p. (in Russ.)]
3. Bulat L.P. Prikladnye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. [Bulat L.P. Applied studies and developments in the area of thermal-electric cooling in Russia. Kholodil'naya tekhnika. 2009; 7:34-37. (in Russ.)]
4. Malkovich B.E.-Sh. Termoelektricheskie moduli na osnove splavov tellurida vismuta. Doklady XI Mezhdunarodnogo seminar "Termoelektriki i ikh primeneniye". Sankt-Peterburg; 2008. S. 462-468. [Malkovich B.E.-Sh. Thermal electric units based on the bismuth telluride alloys. Proceedings of XI Interstate seminar "Thermo-electrics and their application". Sankt-Peterburg; 2008. P. 462-468. (in Russ.)]
5. Dreytser G.A., Lobanov I.E. Predel'naya intensivatsiya teploobmena v trubakh za schet iskusstvennoy turbulizatsii potoka. IFZh. 2003;76(1):46-51. [Dreytser G.A., Lobanov I.E. Terminal heat transfer intensification in pipes due to artificial flow turbulisation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003;76(1):46-51. (in Russ.)]
6. Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Raschet konvektivnogo teploobmena v trubakh s periodicheskimi vystupami. Problemy gidrodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh. M.: Izd. MEI; 2003;1:57-60. [Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat exchange in pipes with periodical protrusions. The problems of hydro-dynamics and heat exchange in energetic facilities. Moscow: Izd. MEI; 2003;1:57-60. (in Russ.)]
7. Osipov M.I., Olesevich R.K., Olesevich K.A. Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie teploobmennykh apparatov shnekovogo tipa. Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teplomassoobmenu. M.: MEI. 2002;6:159-162. [Osipov M.I., Olesevich R.K., Olesevich K.A. Experimental and numeric study of heat exchange apparatus of screw type. Proceedings of the Second Russian national conference on heat and mass exchange. Moscow: MEI. 2002;6:159-162. (in Russ.)]
8. Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena. Pod obshch. Red. Yu.F. Gortyshova. Kazan': Izd. dom "Logos"; 2012. 559 s. [Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Physical fundamentals and industrial application of heat exchange intensification. Ed. Yu.F. Gortyshov. Kazan': Izd. dom "Logos"; 2012. 559 p. (in Russ.)]
9. Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V., Popov I.A. Effektivnost' promyshlenno effektivnykh intensivatorov teploperedachi (Obzor. Analiz. Rekomendatsii). Izvestiya RAN, Energetika. 2002;3:102-118. [Gortyshov

- Yu.F., Olimpiev V.V., Popov I.A. The efficiency of industrially-effective heat transfer intensifiers (Review. Analysis. Recommendations). Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2002;3:102-118. (in Russ.)]
10. Walker G. Industrial Heat Exchangers: A Basic Guide, 2nd ed., Washington: Hemisphere Publishing: 1990.
 11. Hewitt G.F. Heat Exchanger Design Handbook. Begell House; 1990.
 12. Shah R.K. Compact Heat Exchangers - Recuperators and Regenerators. In Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Kreith F., Yogi Goswami D., Chap.13. eds. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2007.
 13. Zimparov V.D. Extended performance evaluation criteria for heat transfer surfaces: Heat transfer through ducts with constant wall temperatures. Int. J. Heat Mass Transfer. 2000;43(17):3137-3150.
 14. Chinangad R.S., Master B.I., Thome J.R. Helixchanger Heat Exchanger: Single - Phase and Two-Phase Enhancement. Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries. New York, Wallingford (UK): Begell House, Inc; 1999. P. 471-477.
 15. Dreitser G.A. Modern problems of cryogenic heat transfer and its enhancement (Generalization of experimental results. Practical recommendations and different applications). Low Temperature and Cryogenic Refrigeration. Dordrecht, Boston, London: Kruger Academic Publications; 2003. P. 201-220.
 16. Martynenko O.G. Heat and mass transfer bibliography—CIS works. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1998;41(11):1371-1384.
 17. Sajid M., Hassan I., Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices. Energy. 2017;118:1035-1043.
 18. Yazawaa K., Shakouria A., Hendricks T.J. Thermoelectric heat recovery from glass melt processes. Energy. 2016;185:598-602.
 19. El-Desouky A., Carter M., Andre M.A., Bardet P.M., LeBlanc S. Rapid processing and assembly of semiconductor thermoelectric materials for energy conversion devices. Progress in Materials Science. 2016;83:330-382.
 20. Gaynera C., Kara K.K. Recent advances in thermoelectric materials. Applied Energy. 2016;168:65-74.
 21. Zhang T. New thinking on modeling of thermoelectric devices. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;38:903-916.
 22. Virjogheb E.O., Enescua D. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. Applied Thermal Engineering. 2014;66(1-2):15-24.
 23. Zhao D., Tan G. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. Applied Thermal Engineering. 2003;23(8):913-935.
 24. Riffat S.B., Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering. 2014;64(1-2):252-262.
 25. Brown J.S., Domanski P.A. Review of alternative cooling technologies. Applied Thermal Engineering. 2014;63(1):33-39.
 26. Mota F.A.S., Ravagnani M.A.S.S., Carvalho E.P. Optimal design of plate heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2014;63:33-39.
 27. Mazen M.A.-K. Plate heat exchangers: Recent advances. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16(4):1883-1891.

Сведения об авторе:

Кадилова Джамиля Кадировна – соискатель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the author:

Dzhamilya K. Kadirova – aspirant, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 29.05.2017.

Received 29.05.2017.

Принята в печать 17.06.2017.

Accepted for publication 17.06.2017.

Для цитирования: Магомедова П.А. Термоэлектрические явления в светоизлучающих биполярных полупроводниковых структурах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 77-86. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

For citation: Magomedova P.A. Thermoelectric events in light-emitting bipolar semiconductor structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 77-86. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ БИПОЛЯРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Магомедова П.А.

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

Резюме. Цель. Разработка светоизлучающих биполярных полупроводниковых структур с низким уровнем паразитных тепловыделений. **Метод.** Разработан метод преобразования термоэлектрического тепла в биполярных полупроводниковых структурах в оптическое излучение для отвода избыточной энергии в окружающую среду. При этом сохраняется охлаждающий эффект на термоэлектрических спаях. Вместо инерциального процесса кондуктивного или конвективного теплопереноса осуществляется практически мгновенный отвод тепла от электронных компонентов в окружающую среду. **Результат.** В результате светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции. Представляется возможным изготовление прозрачных светодиодных матриц с двухсторонним расположением прозрачных солнечных элементов и зеркальными металлическими электродами по периметру. При приложении тока светодиодная матрица на одних переходах будет поглощать тепловую энергию, а на других электродах испускать излучение, которое будет полностью рекуперировано в электроэнергию при помощи прозрачных солнечных батарей, после многократного отражения между зеркальными электродами. Невысокий коэффициент полезного действия солнечных батарей будет полностью скомпенсирован за счет многократного прохождения фотонов через эти батареи. **Вывод.** Светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят не только повысить надежность работы электронных компонентов в широком диапазоне эксплуатационных характеристик, но и повысить энергоэффективность за счет применения рекуперации оптического излучения. Полупроводниковые термоэлектрические устройства с использованием оптических явлений совместно с эффектом Пельтье позволяют реализовать широкий диапазон энергоэффективных компонентов радиоэлектронной аппаратуры, как для дискретной электроники, так и для микросистемотехники. Особую ценность представляют системы для получения сверхнизких температур с целью достижения сверхпроводимости.

Ключевые слова: светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры, термоэлектрические спаи, оптическое излучение, кондуктивный теплоперенос, конвективный теплоперенос

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
THERMOELECTRIC EVENTS IN LIGHT-EMITTING BIPOLAR SEMICONDUCTOR
STRUCTURES

Patimat A. Magomedova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Abstract Objective The development of light-emitting bipolar semiconductor structures having a low level of parasitic heat release. **Methods** A method for converting thermoelectric heat in bipolar semiconductor structures into optical radiation to divert the excess energy into the environment was developed. At the same time, the cooling effect on thermoelectric junctions remains. Instead of an inertial process of conductive or convective heat transfer, practically instantaneous heat removal from electronic components to the environment takes place. **Results** As a result, light-emitting bipolar semiconductor structures will allow more powerful devices with greater speed and degree of integration to be created. It is possible to produce transparent LED matrices with a two-way arrangement of transparent solar cells and mirror metal electrodes along the perimeter. When current is applied, the LED matrix on one of the transitions will absorb thermal energy; on other electrodes, it will emit radiation that is completely recovered into electricity by means of transparent solar cells following repeated reflection between the mirror electrodes. The low efficiency of solar cells will be completely compensated for with the multiple passages of photons through these batteries. **Conclusion** Light-emitting bipolar semiconductor structures will not only improve the reliability of electronic components in a wide range of performance characteristics, but also improve energy efficiency through the use of optical radiation recovery. Semiconductor thermoelectric devices using optical phenomena in conjunction with the Peltier effect allow a wide range of energy-efficient components of radio electronic equipment to be realised, both for discrete electronics and for microsystem techniques. Systems for obtaining ultra-low temperatures in order to achieve superconductivity are of particular value.

Keywords: light-emitting bipolar semiconductor structures, thermoelectric junctions, optical radiation, conductive heat transfer, convective heat transfer

Введение. Основными тенденциями развития современной электронной компонентной базы является повышение степени интеграции и быстродействия СБИС. При этом ужесточаются требования к соблюдению критических тепловых режимов, так как даже при малых уровнях тепловыделений переключающих электронных компонентов, интегрально возрастает общее количество тепла. Аналогично оказывает воздействие высокое быстродействие на уровень тепловыделений активных электронных компонентов. Инерционность тепловых процессов не позволяет осуществить режим термостабилизации, так как затруднен конвективный и кондуктивный теплообмен с окружающей средой для СБИС [1].

Для устранения этих недостатков малоэффективно повышение производительности систем охлаждения различного типа – требуется изготовление энергосберегающих биполярных полупроводниковых структур.

Постановка задачи. В процессе работы электронных компонентов СБИС возникают паразитные тепловыделения двух видов. Омическое сопротивление полупроводниковых структур приводит к тому, что часть токовой нагрузки расходуется на формирование паразитных Джоулевых тепловыделений. Вторым источником паразитных тепловыделений являются термоэлектрические явления при протекании тока через спаи металл-полупроводник и через полупроводниковые переходы.

Джоулевые тепловыделения могут быть уменьшены за счет применения полупроводниковых материалов с низким удельным сопротивлением, а также применения более тонких полупроводниковых переходов.

Паразитные термоэлектрические явления имеют двойную природу. На одном полупроводниковом переходе в биполярной полупроводниковой структуре выделяется тепло Пельтье, а на противоположном полупроводниковом переходе происходит поглощение тепловой энергии. Применение соответствующих материалов при изготовлении полупроводникового перехода, позволяет вместо выделения тепла на полупроводниковом переходе при рекомбинации электрона с вакансией осуществить формирование фотонов, причем, чем больше энергия электрона, тем выше энергия фотона – от инфракрасных до ультрафиолетовых значений спектра [2-13].

В этом случае полупроводниковая активная структура вместо теплового нагрева будет незначительно нагреваться, существенно охлаждаться и отводить большую часть энергии в виде электромагнитного излучения оптического диапазона. В свою очередь это позволяет не только практически мгновенно обеспечить отвод излишней паразитной энергии в окружающую среду для термостабилизации СБИС, но и повысить энергоэффективность электронных компонентов за счет рекуперации оптического излучения на фотопреобразующих полупроводниковых переходах [14]. Кроме того, возрастет быстродействие полупроводниковых переключающих структур, так как информационный сигнал будет передаваться со скоростью света, а не за счет, медленно дрейфующих через базу биполярной полупроводниковой структуры электронов. Это справедливо также для полевых полупроводниковых структур, тиристоров, лазеров и других полупроводниковых приборов.

Методы исследования. Снижения тепловыделений в биполярных полупроводниковых структурах и повышения эффективности его работы можно достичь различными способами. Одним из таких способов, является возможность формирования обоих полупроводниковых переходов в виде светоизлучающих, а саму биполярную полупроводниковую структуру подключить по схеме с общей базой. Питание для базы – эмиттера и базы – коллектора нужно обеспечить таким образом, что полупроводниковые переходы могут в одно и то же время быть открыты или закрыты.

Когда электрон проходит через полупроводниковые переход и у него уменьшается энергия, поскольку она переходит в энергию излучения. Если электрон проходит полупроводниковый переход и его энергия увеличивается, то на этом полупроводниковом переходе происходит поглощение тепловой энергии.

Если полупроводниковый переход открыт и происходит генерация фотонов, то в полупроводниковых переходах происходит поглощение фотонов, в результате чего проводимость увеличивается, т.к. происходит генерация электронов и дырок. Все это дополнительно усиливает ток в биполярной полупроводниковой структуре. Быстродействие данного процесса можно соизмерить со скоростью света.

На рис. 1 изображены биполярные полупроводниковые структуры с двумя излучающими полупроводниковыми переходами. На рис.1, *a* в биполярной полупроводниковой р-п-р-структуре происходит излучение фотонов с двух полупроводниковых переходов.

В результате подключения источников питания определенным образом, оба полупроводниковых перехода открыты, что приводит к испусканию фотонов, часть которых поглощается в полупроводниковых структурах с одновременным усилением тока базы за счет увеличения проводимости.

На рис.1, *b* приведена работа биполярной полупроводниковой р-п-р-структуры, когда больший запирающий потенциал подается не на коллектор или эмиттер, а на базу. В результате возникает охлаждающий эффект, в соответствии с законом Пельтье, и происходит поглощение тепла на обоих полупроводниковых переходах.

Аналогичные режимы работы для биполярных полупроводниковых р-п-р- и п-р-п-структур показаны на рис.1, *c* и *d*.

В результате, при открытом состоянии, биполярная полупроводниковая структура с двумя излучающими полупроводниковыми переходами усиливает передачу цифровой информации с большим быстродействием используя оптический канал. А когда состояние закрытое,

происходит охлаждение, что позволяет повысить степень интеграции сверхбольших интегральных схем, а также увеличить энергосбережение в результате отсутствия систем отвода тепла.

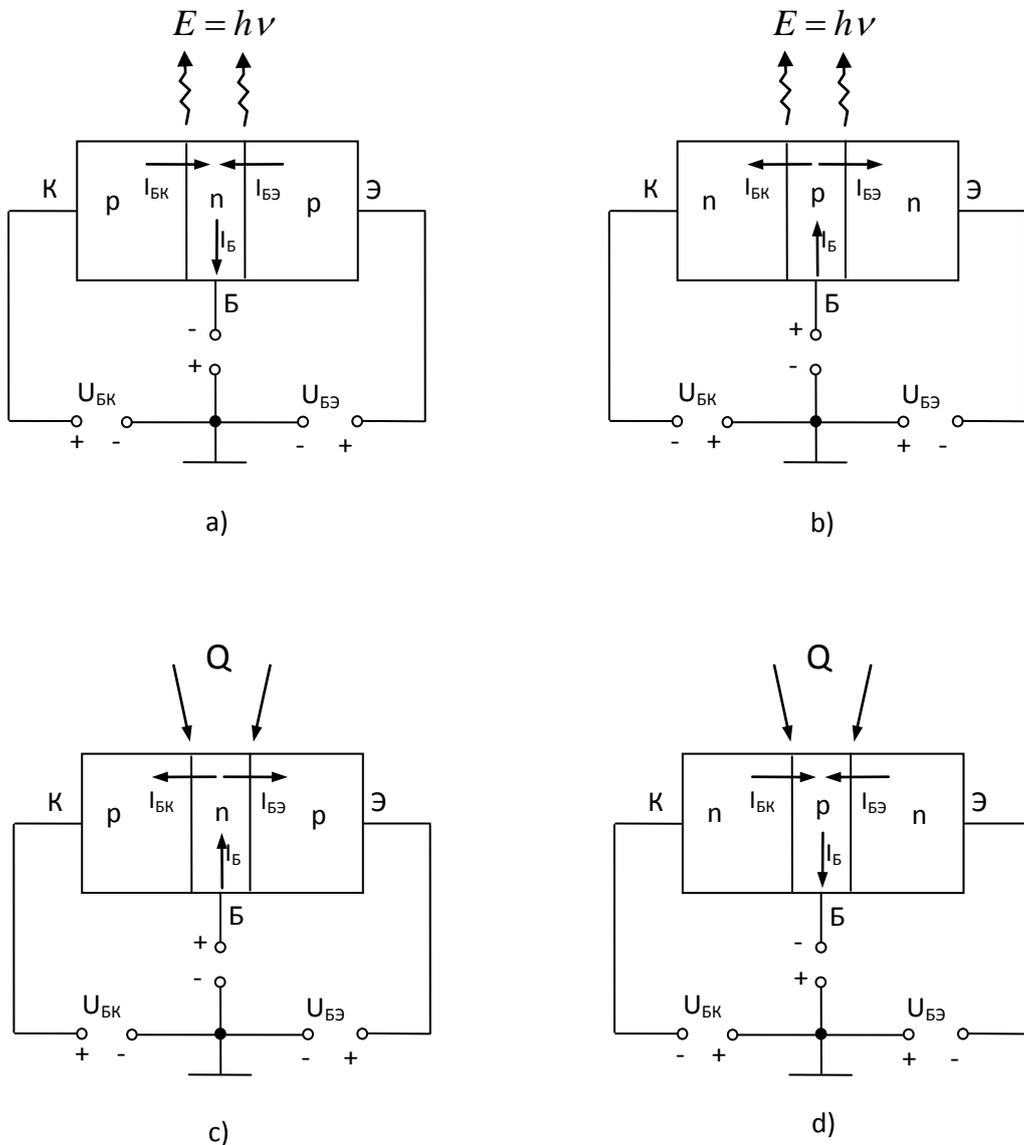


Рис.1. Биполярные полупроводниковые структуры с двумя излучающими полупроводниковыми переходами
Fig.1. Bipolar semiconductor structures with two radiating semiconductor transitions

Предложенная биполярная полупроводниковая структура с двумя излучающими полупроводниковыми переходами позволит увеличить эффективность цифровых устройств при одновременном снижении энергетических затрат.

Применяя излучающие полупроводниковые структуры можно повысить эффективность работы тиристора. Для этого в полупроводниковой структуре тиристора необходимо сделать излучающими два полупроводниковых перехода в открытом состоянии, а оставшийся полупроводниковый переход поглощающим тепловую энергию. В результате, можно повысить эффект охлаждения в два раза.

На рис. 2 изображена полупроводниковая структура тиристора с излучающими и поглощающим переходами.

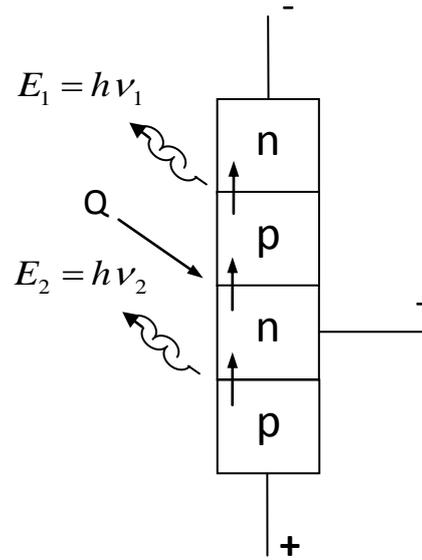


Рис. 2. Полупроводниковая структура тиристора с излучающими и поглощающим переходами

Fig.2. Semiconductor structure of a thyristor with radiating and absorbing transitions

Так как излучение в двух открытых полупроводниковых переходах позволит снизить количество выделенного тепла и снизить возможность теплового пробоя, то появится возможность изготавливать полупроводниковые структуры тиристора с большей мощностью. Частота излучения в полупроводниковых переходах тиристора может быть одинаковой или разной. Это позволит повысить интенсивность излучения и охватить больший спектральный диапазон. Причем, чем выше частота излучения полупроводниковых переходов, тем больше энергии уйдет в виде излучения и тем больше холода создаст закрытый переход тиристора. Использование излучающей полупроводниковой структуры тиристора также позволит улучшить теплоперенос и уменьшить габариты теплоотвода.

Применить излучающие полупроводниковые структуры можно и для улучшения таких показателей, как коэффициент усиления. Помимо теплофизических характеристик и быстродействия, коэффициент усиления является важным показателем полевых полупроводниковых структур.

Обычно, усиление в полевой полупроводниковой структуре происходит при изменении размера запирающего слоя полупроводникового перехода с одновременной регулировкой размера канала, через который протекают электроны от истока к стоку. Применяв эффект излучения в полупроводниковом переходе происходит дополнительная генерация фотонов, которые, в дальнейшем, поглощаются и генерируют пары электрон-дырка. В результате сопротивление проводника n-типа уменьшается, а сила тока увеличивается.

На рис. 3 показана схема полевой полупроводниковой структуры с неизолрированным затвором и излучающим полупроводниковым переходом. За счет фоточувствительности изменяется сопротивление сток-исток.

Работа полевой полупроводниковой структуры основана на следующем. Запирающий слой возникает между полупроводниками p-типа 1 и n-типа 2. Размеры этого слоя зависят от напряжения на затворе 3, стоке 4 и истоке 5. От истока 5 электроны перемещаются по полупроводнику n-типа к положительному стоку 4. Когда, на затвор 3 подается отрицательное напряжение, происходит увеличение запирающего слоя. Для электронов уменьшается поперечное сечение канала проводимости, сопротивление растет, а ток снижается. Излучающий полупроводниковый переход заперт, т.к. генерация фотонов отсутствует.

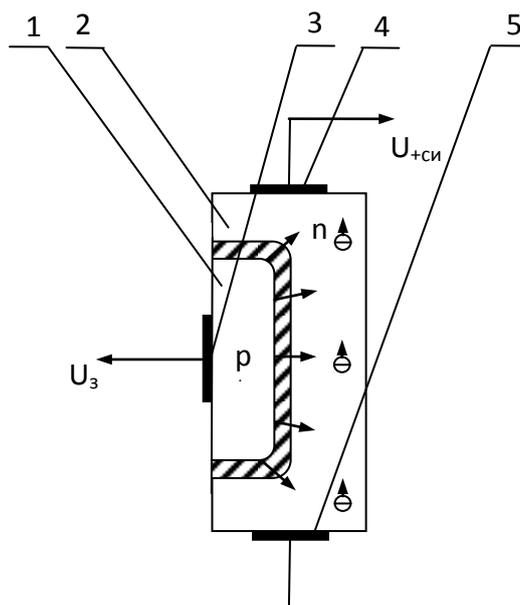


Рис.3. Полевая полупроводниковая структура с излучающим полупроводниковым переходом

Fig.3. Field semiconductor structure with radiating semiconductor transfer

Когда на затвор 3 подается положительное напряжение, происходит уменьшение запирающего слоя. Для электронов увеличивается поперечное сечение канала проводимости, сопротивление уменьшается, а ток возрастает.

После того, как полупроводниковый переход начнет генерировать фотоны, уменьшится сопротивление полупроводника n-типа 2, так как атомы кристалла поглотят фотоны и произойдет генерация пар электрон-дырка. После этого увеличится протекающий ток.

При использовании между стоком 4 и истоком 5 излучающего полупроводникового перехода, а также фоточувствительного полупроводника n-типа 2, возрастет коэффициент усиления полевой полупроводниковой структуры. Данная полевая полупроводниковая структура может быть использована в сверхбольших интегральных схемах.

Экономичность биполярных полупроводниковых структур при импульсном режиме работы можно также повысить за счет излучения. Для этого, частично, полезный сигнал, проходя через биполярную полупроводниковую структуру, на одном полупроводниковом переходе преобразуется в излучение.

На втором полупроводниковом переходе, наоборот, оптическое излучение преобразуется в полезный электрический сигнал. При этом база, эмиттер, коллектор представлены в виде зеркальных металлических электродов. В результате, все фотоны многократно переотражаются внутри биполярной полупроводниковой структуры и преобразуются в электричество, несмотря на невысокий коэффициент полезного действия фотопреобразующего полупроводникового перехода.

На рис. 4 изображена биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами. Конструктивно биполярная полупроводниковая структура находится внутри зеркальных металлических электродов: база 1, эмиттер 2, коллектор 3.

Полупроводниковый переход, через который электроны переходят из n зоны 4 в p зону 5, является излучающим полупроводниковым переходом в биполярной полупроводниковой структуре. На этом полупроводниковом переходе происходит рассеивание энергии в виде оптического излучения.

Полупроводниковый переход, через который электроны переходят из p зоны 5 в n зону 6, является фотопреобразующим полупроводниковым переходом.

На этом полупроводниковом переходе электроны приобретают от излучения дополнительную энергию, также как и в солнечной батарее. Диэлектрическим материалом 7 друг от друга электрически изолируются база 1, эмиттер 2, коллектор 3.

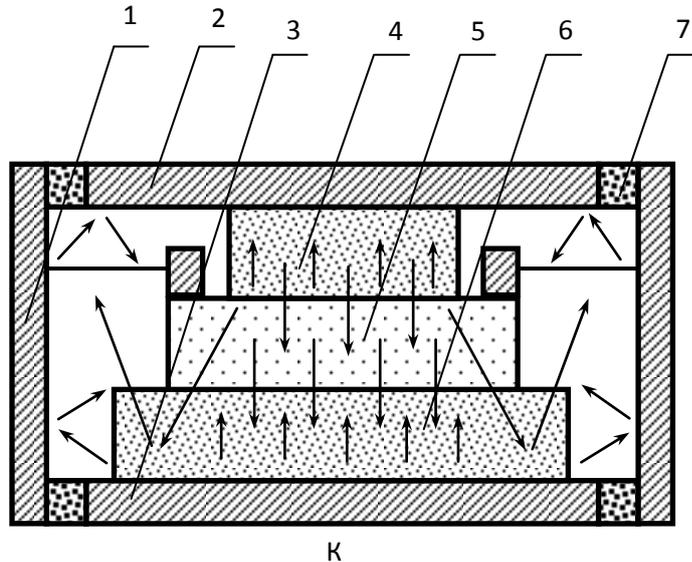


Рис.4. Биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами

Fig.4. Bipolar semiconductor structure with mirror metal electrodes

Биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами, является более экономичной, так как на фотопреобразующем p-n-переходе происходит генерация электричества из фотонов. При изготовлении всех приведенных выше полупроводниковых структур применяются общеизвестные материалы, например, для производства светодиодов (GaAs, GaP, GaN, SiC). Для проведения исследований технических параметров биполярных полупроводниковых структур был изготовлен компьютеризированный стенд, предназначенный для подачи питающих напряжений на исследуемые полупроводниковые структуры и преобразование в цифровую форму, как выходных параметров, исследуемых биполярных полупроводниковых структур, так и преобразования информации с датчиков температуры, интенсивности электромагнитного оптического излучения и других параметров.

На рис. 5 приведена структурная схема измерительного стенда для испытания биполярных полупроводниковых структур.

При подаче питающих напряжений биполярные полупроводниковые структуры с цифро-аналогового преобразователя на базу (затвор) подаются различные значения входных сигналов. Информация от считывающих датчиков после дискретизации и квантования, поступает в компьютер для последующей обработки, анализа и хранения. Внутри камеры стенда создаются условия, соответствующие различным режимам работы биполярных полупроводниковых структур в заданном диапазоне испытаний.

Имеется возможность для изменения конфигурации компьютеризированного стенда за счет применения дополнительных датчиков физических и электрических величин, а также расширения диапазона испытаний с применением дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры через интерфейсы, подключенные к компьютеру.

Проведенные испытания подтвердили высокую энергоэффективность биполярных полупроводниковых структур.

Для биполярных полупроводниковых структур энергоэффективность возросла в среднем до 65%. Для полевых полупроводниковых структур до 75%.

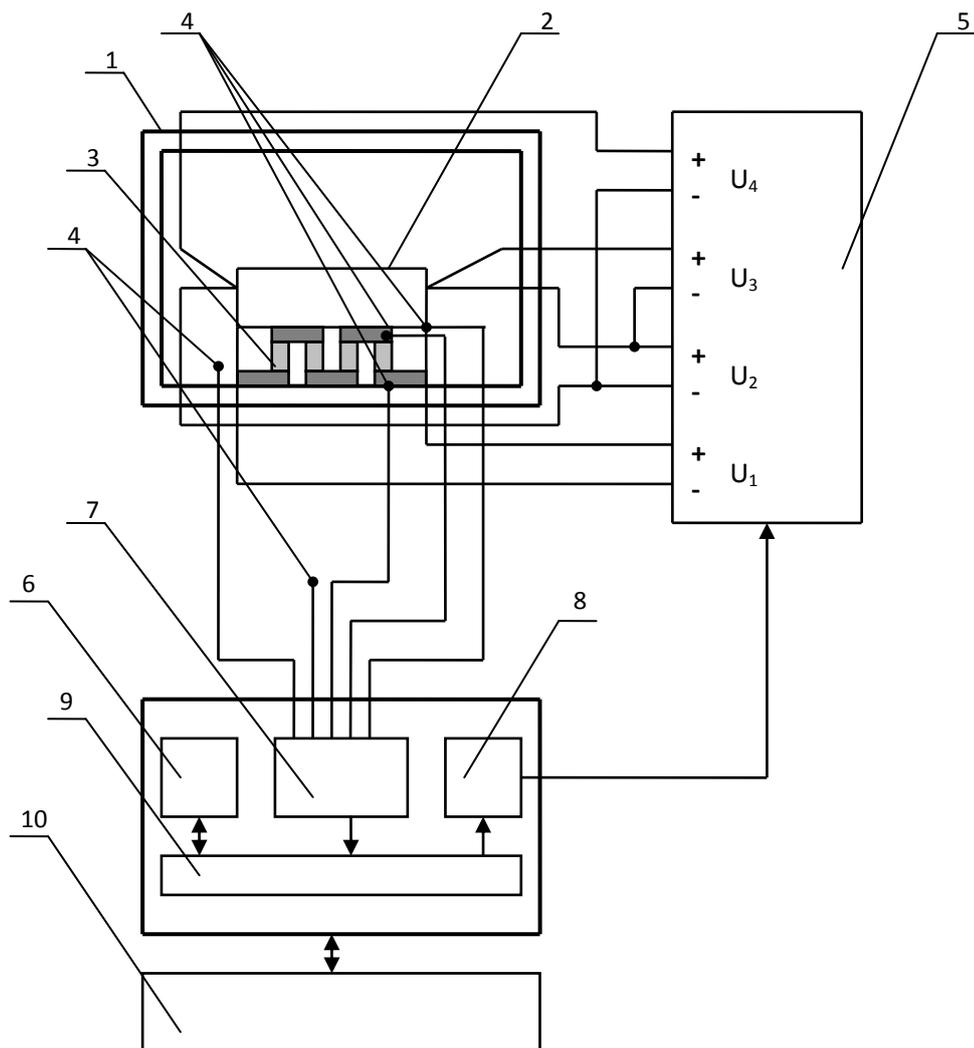


Рис.5. Схема измерительного стенда для испытания биполярных полупроводниковых структур
Fig.5. Diagram of a measuring stand for testing bipolar semiconductor structures

- 1 – термостат;
- 2 – объект эксперимента;
- 3 – биполярные полупроводниковые структуры для имитации тепловой нагрузки;
- 4 – термопарные датчики для измерения температуры;
- 5 – управляющий блок питания;
- 6 – цифро-аналоговый преобразователь;
- 7 – многоканальный аналого-цифровой преобразователь;
- 8 – цифровой регистр для управляющего блока питания;
- 9 – интерфейс;
- 10 – компьютер.

Обсуждение результатов. Для достижения большей эффективности и экономичности светоизлучающих полупроводниковых структур, необходимо обеспечить их интегральное производство на основе излучающих кристаллов. Также можно изготовить прозрачные светодиодные матрицы, причем с двух сторон должны располагаться солнечные элементы, а по периметру необходимо расположить зеркальные металлические электроды. При таком изготовлении одни полупроводниковые переходы будут поглощать тепло, а другие полупроводниковые переходы излучать. Излучение полупроводниковых переходов, с помощью прозрачных солнечных батарей, после того, как многократно отразится между металлическими зеркальными электродами, полностью рекуперировается в электроэнергию на прозрачных солнечных батареях. При многократном прохождении фотонов через солнечные батареи значительно повысится их коэффициент полезного действия (до 100%). В результате светоизлучающие биполярные полу-

проводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции.

Вывод. Применение оптических явлений совместно с эффектом Пельтье в биполярных полупроводниковых структурах позволят не только повысить надежность работы электронных компонентов в широком диапазоне эксплуатационных характеристик, но и энергоэффективность за счет применения рекуперации оптического излучения.

Библиографический список:

1. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолуминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 140. – № 1. – С. 158-169.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. - 386с.
3. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника, 2005.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
6. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. - Москва: «Академия», 2012. – 136 с.
7. Дорохин М. В., Данилов Ю. А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
8. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дроздов Ю. Н., Звонков Б. Н., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Свойства квантово-размерных структур GaAs/InGaAs, содержащих δ -Mn-легированные слои // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 2. – С. 9-12.
9. Патент РФ на изобретение №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 20.02.2014.
10. Патент РФ на изобретение №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 01.06.2009.
11. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
12. Патент РФ на изобретение №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А., опубл. 20.02.2014.
13. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – V. 40. – N 2. – P. R179-R203.
14. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71. – N 3. – P. 035338-1-5.

References:

1. Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Fotolyuminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmenenie magnitnogo polya δ -sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs. ZhTF. 2011;140(1):158-169. [Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Photoluminescence response of a quantum well onto Mn δ -layer magnetic field alteration in InGaAs/GaAs heterostructures. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP). 2011;140(1):158-169. (in Russ.)]
2. Anatyshuk L.I. Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii. Kiev, Chernovtsy: Institut termoelektrichestva; 2003. 386 s. [Anatyshuk L.I. Thermal electricity. T.2. Thermo-electric energy converters. Kiev, Chernovtsy: Institute of thermal electricity; 2003. 386 p. (in Russ.)]

3. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensifikatory teploperedachi. SPb.: Politekhnik; 2005. [Ismailov T.A. Thermo-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politekhnik; 2005. (in Russ.)]
4. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilisation of microelectronic apparatus by means of semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 p. (in Russ.)]
5. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Okhlazhdenie radioelektronnykh sistem: uchebnoe posobie. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. The cooling of radioelectronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. (in Russ.)]
6. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Termoelektricheskoe okhlazhdenie teplovydelyayushchikh komponentov mikroelektronnoy tekhniki. Moskva: «Akademiya»; 2012. 136 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Thermoelectric cooling of heat-emitting components of microelectronic technique. Moscow: «Akademiya»; 2012. 136 p. (in Russ.)]
7. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Izmerenie polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostruktur: uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet; 2011. [Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Measurement of polarisation features of nanoheterostructure emission: a Tutorial. Nizhniy Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod; 2011. (in Russ.)]
8. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. Svoystva kvantovo-razmernykh struktur GaAs/InGaAs, sodershashchikh δ <Mn>-legirovannye sloi. Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya. 2007;2:9-12. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. The properties of GaAs/InGaAs quantum-dimensional structures, containing δ <Mn>-doped layers. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007;2:9-12. (in Russ.)]
9. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Kaskadnoe svetoizluchayushchee termoelektricheskoe ustroystvo. Patent RF na izobretenie №2507613.0. Opubl. 20.02.2014. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Cascade light-emitting thermal-electric device. Patent RF №2507613.0. Publ. 20.02.2014. (in Russ.)]
10. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov v vide izlucheniya. Patent RF na izobretenie №2405230. Opubl. 01.06.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. A method of heat removal from heat-emitting electronic components in the form of emission. Patent RF №2405230. Publ. 01.06.2009. (in Russ.)]
11. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Svetotranzistor. Patent RF №2487436. Opubl. 10.07.2013. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Light transistor. Patent RF №2487436. Publ. 10.07.2013. (in Russ.)]
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviem. Patent RF na izobretenie №2507632. Opubl. 20.02.2014. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A. Light transistor with high speed. Patent RF na izobretenie №2507632. Publ. 20.02.2014. (in Russ.)]
13. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. J. Phys. D: Appl. Phys. 2007;40(2):R179-R203.
14. Govorov A.O., Kalameitsev A.V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. Phys. Rev. B. 2005;71(3):035338-1-5.

Сведения об авторе:

Магомедова Патимат Арсланадиевна-аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the author:

Patimat A. Magomedova - Graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 10.06.2017.

Received 10.06.2017.

Принята в печать 22.06.2017.

Accepted for publication 22.06.2017.

Для цитирования: Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 87-96. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

For citation: Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Development of prototype system for regulating thermal conditions of telecommunications equipment cabinets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 87-96. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.317.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ШКАФА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рашидханов А.Т.², Юсуфов Ш.А.¹

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

¹e-mail: yshirali@yandex.ru, ²e-mail: rashidkhanov.arip@mail.ru

Резюме: *Цель.* Основной задачей исследования являлось обеспечение теплового режима и надежности работы электронной аппаратуры **Метод.** Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения с использованием тепловых труб был собран стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный опытный образец. Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой термоэлектрическую батарею, выполненную из стандартных унифицированных термоэлектрических материалов типа ICE-71. Решение задач исследования осуществлено методом приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям (метод Канторовича) обеспечивает приемлемую для подобного класса задач точность. **Результат.** Предложена конструкция шкафа для телекоммуникационного оборудования с системой обеспечения теплового режима на основе использования тепловых труб и термоэлектрических охлаждающих модулей. Рассмотрена математическая модель для определения теплового поля в объеме шкафа, описан экспериментальный стенд для исследования опытного образца, приведены результаты экспериментальных исследований для различных мощностей источников тепловыделений. **Вывод.** Экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения шкафов с телекоммуникационным оборудованием; указанный способ охлаждения имеет преимущества перед обычным принудительным или естественным; температуру в объеме блока и пиковые значения источников тепловыделений удалось существенно снизить; при мощностях рассеивания на одной плате в пределах 50 Вт не требуется применения специальных средств по съему тепла с горячих спаев термоэлектрической батареи

Ключевые слова: *тепловое поле, система обеспечения теплового режима, тепловая труба, термоэлектрический преобразователь, температура*

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

**DEVELOPMENT OF PROTOTYPE SYSTEM FOR REGULATING THERMAL
CONDITIONS OF TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT CABINETS**

*Arip T. Rashidkhanov*², *Shirali A. Yusufov*¹

Daghestan State Technical University,

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

¹e-mail: yshirali@yandex.ru, ²e-mail: rashidkhanov.arip@mail.ru

Abstract Objectives The main objective of the study was to regulate the thermal regime and ensure the reliability of electronic equipment **Methods** In order to conduct experimental studies of the thermoelectric cooling system using heat pipes, a stand was assembled on which the developed and manufactured prototype was studied. The object of the experimental studies was a prototype cooling system, consisting of a thermoelectric battery made of conventional unified thermoelectric materials of ICE-71 type. The solution of the research problems carried out by the method of reduction to ordinary differential equations (Kantorovich method) provides acceptable accuracy for such a class of problems. **Results** A design of a telecommunication equipment cabinet with a thermal management system based on the use of heat pipes and thermoelectric cooling units is proposed. A mathematical model for the determination of the thermal field in the cabinet volume is considered; an experimental stand for the prototype study is described; the results of experimental studies for various power sources of heat release are presented. **Conclusion** Experimental studies confirm the operability of the developed cooling system for cabinets with telecommunication equipment; this cooling method has advantages over conventional forced or natural cooling; the temperature in the block volume and the peak values of the heat sources are significantly reduced; at dissipation powers on one board within 50 W there is no need to use special means to remove heat from hot junctions of the thermoelectric battery

Keywords: thermal field, thermal regime support system, heat pipe, thermoelectric converter, temperature

Введение. Обеспечение теплового режима электронной аппаратуры является важной задачей, успешное решение которой является необходимой составляющей в обеспечении надежности оборудования [1-4].

Исследование и разработка устройств защиты радиоэлектронных систем от перегрева, создание отличительно новых конструкций термостабилизации, которые соответствуют нестандартным требованиям, оптимизация массогабаритных и энергетических характеристик - представляют собой набор ключевых задач, которые необходимо решать еще на стадии проектирования [11-13]. Температурный режим, связанный с отводом теплоты от радиоэлектронных устройств в замкнутом объеме является основополагающим фактором, отвечающим за надежность функционирования устройств, приборов и систем [14-16].

Постановка задачи. На практике широко используются шкафы для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), содержащие корпуса, воздухопроводы, теплообменники и блоки управления [5-10].

Однако в действующих шкафах нерационально используются объемы, занимаемые блоками вентиляторов и теплообменником; усложнены конструкции; отмечается недостаточная эффективность теплообменника; отсутствует возможность автоматического регулирования теплового режима.

Авторами предлагается конструктивный вариант с системой обеспечения теплового режима на основе использования тепловых труб и термоэлектрических охлаждающих батарей.

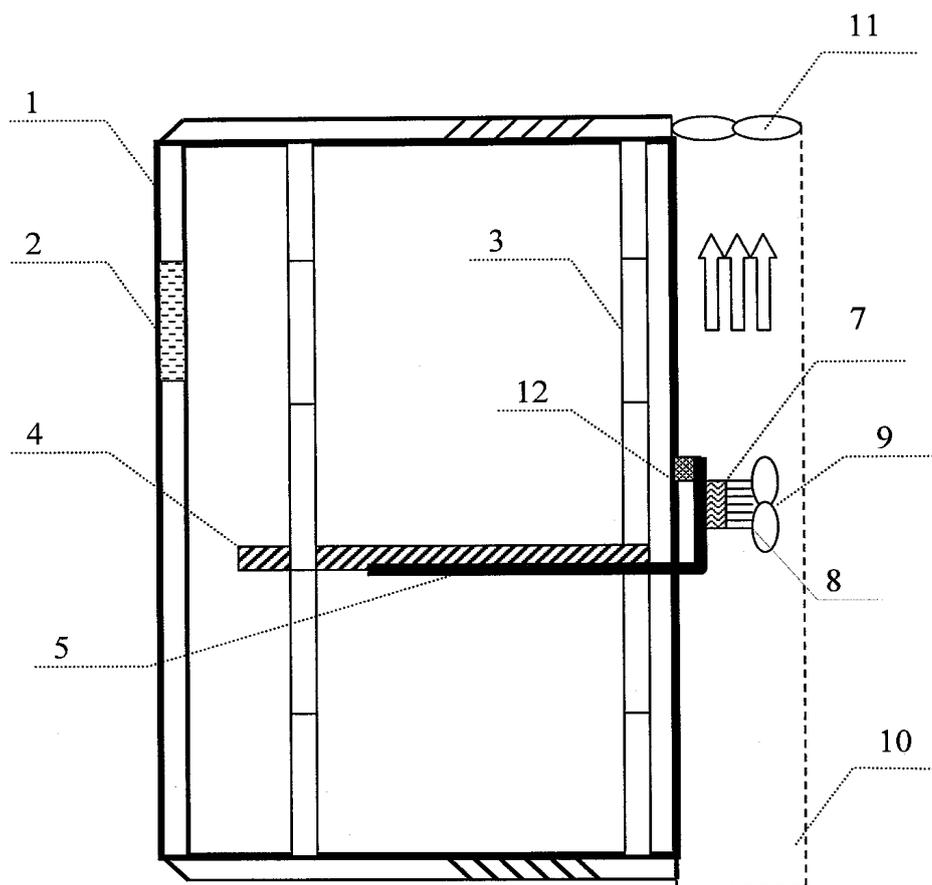


Рис.1. Общий вид шкафа
Fig.1. General view of the cabinet

Устройство состоит из плотно упакованного герметичного корпуса, изображенного на рис.1; герметичной дверцы – 1, с расположенным в ней индикатором – 2; подвижных стоек, которые можно передвигать в горизонтальном направлении и регулировать по высоте для установки аппаратуры – 3; теплопроводящей пластины, на которой устанавливается оборудование – 4 (количество пластин зависит от количества полок установленных шкафу, в нашем случае рассмотрена одна полка); тепловых труб – 5; термоэлектрических батарей – 6; тепловых мостиков – 7; радиатора для снятия тепла – 8 и вентилятора для обдува радиатора – 9; заднего кожуха, служащего, как для защиты, так и для создания канала обдува – 10 и вентилятора для обдува задней полости -11, теплоизоляционных креплений - 12 для жесткой фиксации к задней стенке шкафа; высокотеплопроводной пластины – 13 (для установки ТЭБ и тепловых мостиков).

На рисунке 1 не изображены датчики температуры, соединенные электрически с блоком управления, блоком питания, вентилятором и индикационным дисплеем.

Принцип действия. Установленная аппаратура в термоэлектрический шкаф при работе выделяет тепло, которое нам нужно выводить наружу для оптимальной его работы. Конструкция шкафа выполнена таким образом, чтобы в него не попадали пыль и влага, т.е. агрессивная среда, пагубно влияющая на аппаратуру и систему охлаждения.

Датчик, установленный в полости шкафа, следит за перепадами температуры; цифровые значения мы можем наблюдать на индикаторе – 2. При повышении температуры подается индикация на – 2 и сигнал на блок управления вентилятором – 11, который установлен в тыловой части шкафа над защитным кожухом – 10. Выделяемое аппаратурой тепло через теплопроводящую пластину – 4 попадает на зону испарения тепловых труб – 5. Количество труб может быть различно, в нашем случае установлено три.

Хладагент, используемый в тепловых трубах в нашем случае - вода (можно так же использовать спирт, ацетон и др.). Пары хладагента, попав в зону конденсации, переходят в жидкую фазу и стекают обратно в зону испарения, тем самым снимают тепло с теплопроводящих пластин. Зона конденсации тепловых труб находится в плотном контакте с высоко теплопроводящей пластиной – 13, на которую установлены в шахматном порядке тепловые мостики – 7 с ТЭБ – 6 (холодными спаями к тепловой трубе). Количество мостиков и ТЭБ различно, в зависимости необходимой мощности отвода.

Суть тепловых мостиков заключается в экономии электроэнергии, т.к. они через себя передают тепло на радиатор, которое снимается посредством или естественной конвекции или же принудительным обдувом вентилятора – 11. Тепловые мостики выполнены из медных прямоугольников размером с установленных ТЭБ.

Если интенсивность тепловыделения усиливается в шкафу, то подается сигнал с датчика температуры на блок управления для подачи питания на ТЭБ – 6 и вентилятор – 9. Тем самым эффективность работы тепловых труб повышается.

Отвод тепла с горячих слоев ТЭБ осуществляется при помощи установленного на него радиатора – 8 и вентилятора – 9. Кожух – 10 служит для защиты тыловой части шкафа, а установленный вентилятор – 11 для обдува тыловой полости, т.к. количество полок с аппаратурой может быть различно. Чтобы устранить обратные теплопритоки и жесткую фиксацию от высоко теплопроводящей пластины – 13 используются теплоизоляционные крепления – 12.

Преимуществом предлагаемой конструкции также является отсутствие значительных дополнительных энергозатрат для регулирования температурного режима радиоэлектронной аппаратуры в шкафу и использование тепловых мостиков. Очевидно, что в независимости от конкретных габаритных размеров, любой шкаф для телекоммуникационного оборудования можно рассматривать как условный параллелепипед, ограниченный плоскостями, в реальном приборе играющие роль боковых стенок.

В случае расположения внутри оборудования с плотной компоновкой, можно считать, что мощность тепловыделений равномерно распределена в объеме параллелепипеда. В таком случае переходят, в соответствии с рекомендациями [1], от рассмотрения системы множества тел с тепловыделениями к однородному параллелепипеду с внутренними равномерно распределенными в объеме источниками теплоты. При условии теплообмена с окружающей средой через грани параллелепипеда и использовании граничных условий первого рода (данная модель с относительно небольшими погрешностями может быть применена в большинстве практических случаев). Решение описывается системой уравнений [2], которая позволяет найти температуру в любой точке объема:

$$\frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \vartheta_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_v (\vartheta_\omega - \vartheta_f) = -q; \quad (1)$$

$$\vartheta_\omega = \vartheta_f + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial \vartheta_f}{\partial \bar{x}}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\Omega} = \frac{c_p \gamma V}{L_x \alpha_v}, \quad \vartheta_\omega = t_\omega - t_c, \quad \vartheta_f = t_f - t_c. \quad (3)$$

Уравнения (1) и (2) представляют собой замкнутую систему дифференциальных уравнений для определения ϑ_ω и ϑ_f , при граничных условиях:

$$\left[\frac{\partial \vartheta_\omega}{\partial \bar{j}} + 2\text{Bi}_j \vartheta_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad \left[\frac{\partial \vartheta_\omega}{\partial \bar{j}} - 2\text{Bi}_j \vartheta_\omega \right]_{\bar{j}=1} = 0, \quad (4)$$

$$Bi_j = \frac{\alpha_j L_j}{2\lambda_j}, \quad j = x, y, z; \quad \left[\mathcal{G}_f \right]_{\bar{x}=0} = 0 \quad (5)$$

В случае, когда внутренняя полость разделена полками (рис.2), то каждый из образовавшихся отсеков можно рассматривать как отдельный параллелепипед со своими граничными условиями.

При этом, необходимо отметить, что в нашем случае, полки, разделяющие внутренний объем на отсеки играют еще и роль теплостоков, так как они приведены в контакт с испарительной частью тепловых труб.

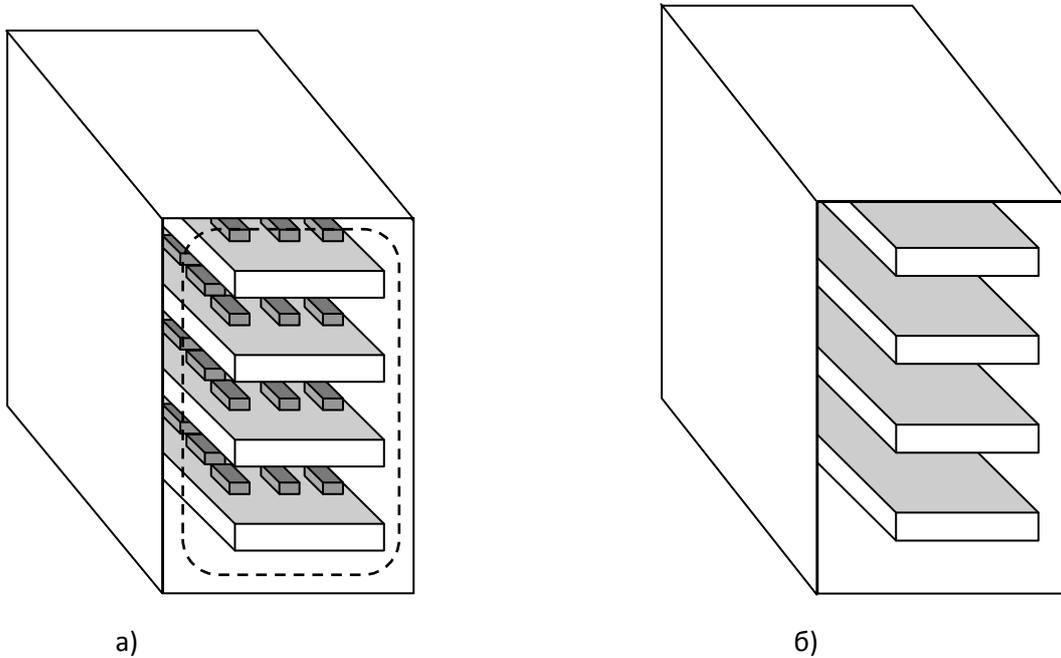


Рис. 2. Схема последовательного упрощения модели при разделении объема на отсеки:

а) исходная модель; б) переход к гладким плитам, разделяющим объем на отсеки;

Fig. 2 Scheme of sequential simplification of the model when dividing the volume into compartments:

a) the original model; b) transition to smooth slabs, dividing the volume into compartments;

В этом случае, возможен переход к системе анизотропных параллелепипедов, только источники теплоты будут располагаться уже на противоположных гранях (ось y), и в этом случае уравнения, описывающие тепловое поле будут иметь вид:

$$\frac{\lambda_x}{L_x^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\lambda_y}{L_y^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\lambda_z}{L_z^2} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\omega}{\partial \bar{z}^2} - \alpha_V (\mathcal{G}_\omega - \mathcal{G}_f) = 0; \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial x} \pm \frac{\alpha_x}{\lambda_x} (t - t_c) \right]_{x=\pm l_x} = 0$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial z} \pm \frac{\alpha_z}{\lambda_z} (t - t_c) \right]_{z=\pm l_z} = 0$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial y} \pm \frac{\alpha_y}{\lambda_y} (t - t_c) \right]_{y=\pm l_y} = q_y$$

Задача решается приведением к обыкновенным дифференциальным уравнениям методом Канторовича и приближенное решение имеет вид:

$$N = \frac{[t(x, y, z) - t_c] \lambda_x}{q_y l_x} = 0,5 \frac{l_x}{l_y} \frac{g_1^2}{B_y \varepsilon_z^2} \frac{ch g_1 \frac{y}{l_y}}{ch g_1 + \frac{g_1}{B_y} sh g_1} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{ch g_2 \frac{x}{l_x}}{ch g_2 + \frac{g_2}{B_x} sh g_2} \right) \left(1 + \frac{2}{B_z} - \frac{z^2}{l_z^2} \right) \quad (7)$$

Необходимо отметить, что решение вышеуказанных задач методом приведения к обыкновенным дифференциальным уравнениям (метод Канторовича) обеспечивает приемлемую для подобного класса задач точность. Ошибка, получаемая при использовании первого приближения соизмерима с точностью определения теплофизических параметров и ошибкой, связанной с переходом от реальной конструкции к эквивалентному однородному параллелепипеду.

Методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований термоэлектрической системы охлаждения с использованием тепловых труб был собран стенд, на котором исследовался разработанный и изготовленный в опытный образец.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий собой ТЭБ, выполненную из стандартных унифицированных ТЭМ типа ICE-71. ТЭБ устанавливалась на радиатор, применяемый для съема тепла с горячих спаев ТЭБ. Для принудительного воздушного охлаждения радиатора использовались кулеры, с регулируемой частотой вращения для регулирования воздушного потока.



Рис.3. Экспериментальный стенд
Fig.3. Experimental stand

С холодными спаями термоэлектрических модулей приведены в тепловой контакт через промежуточную тепловыравнивающую пластину конденсационные части тепловых труб.

Испарительная часть тепловых труб располагается в объеме шкафа и приведена в тепловой контакт с внутренней тепловыравнивающей пластиной, которая также играет роль полки, на которой располагается телекоммуникационное оборудование.

В качестве имитаторов телекоммуникационного оборудования использовались плоские нихромовые нагреватели, подключенные к сети питания переменного тока через трансформатор и измерительные приборы. Фиксировались напряжение питания и ток нагревателей для

определения тепловой мощности, выделяемой в объеме шкафа. Каждый нагреватель имел отдельное питание для задания различных мощностей на разных полках.

Датчик температуры расположен в объеме шкафа и электрически соединен с блоком регулирования, электрически связанного с источником питания термоэлектрических батарей и включающего или отключающего питание в зависимости от достижения заданной температуры в объеме шкафа с заданной петлей температурного гистерезиса.

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях нами замерялись следующие величины: напряжение и ток на термоэлектрических модулей;

температурное поле на спаях и тепловых трубках посредством тепловизора Testo 890; температуры в объеме шкафа, напряжение и ток на нагревателях, температуры воздуха на входе в блок.

Питание термоэлектрических модулей осуществлялось от регулируемого источника постоянного тока. Ток, проходящий через ТЭБ, и напряжение на ней контролировались встроенными в блок питания приборами.

Предварительно определялась величина тока и напряжения, соответствующая рассеиваемой мощности элементов в пределах от 50 до 200 Вт.

Обсуждение результатов. На приведенных ниже рисунках 4 - 8 представлены экспериментальные зависимости максимальной температуры на имитаторе электронной платы от отводимой ТЭБ, температурные поля шкафа.

Результаты представлены при различных мощностях нагревателей.

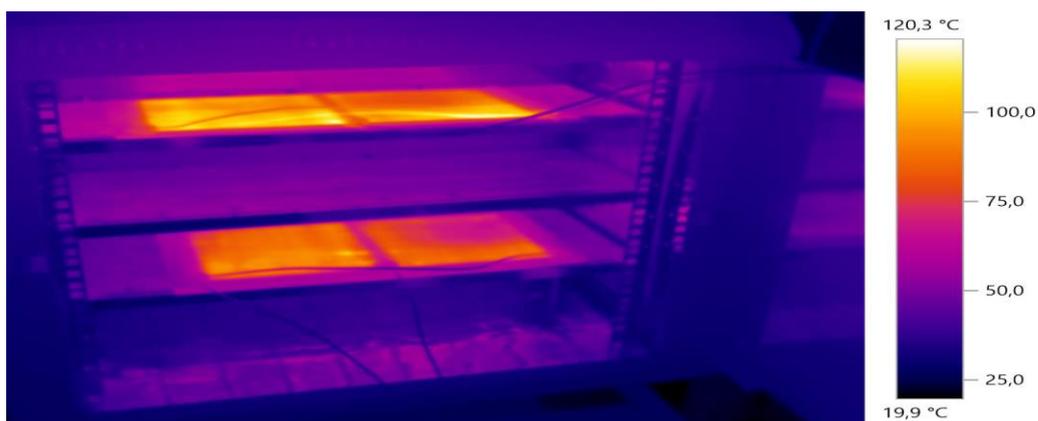


Рис.4. Тепловое поле в объеме шкафа при мощности нагрузки по 50 Вт на полке
Fig.4. Thermal field in the enclosure volume at a load power of 50 W on the shelf

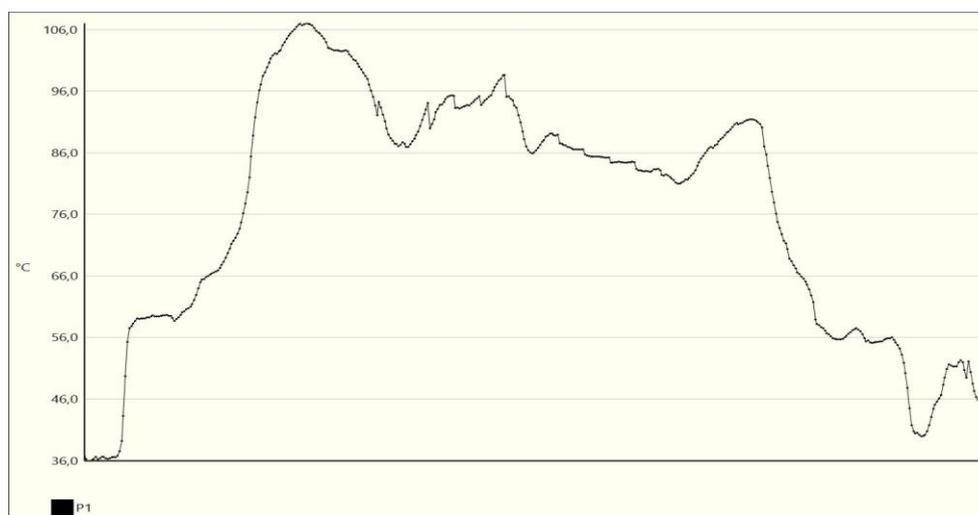


Рис.5. Распределение температуры вдоль верхней полки с нагревателями при мощности 50 Вт

Fig.5. Temperature distribution along the upper shelf with heaters at a power of 50 watts

Из сопоставления полученной термограммы видно, что пиковые значения температур приходятся на поверхность имитаторов тепловой нагрузки.

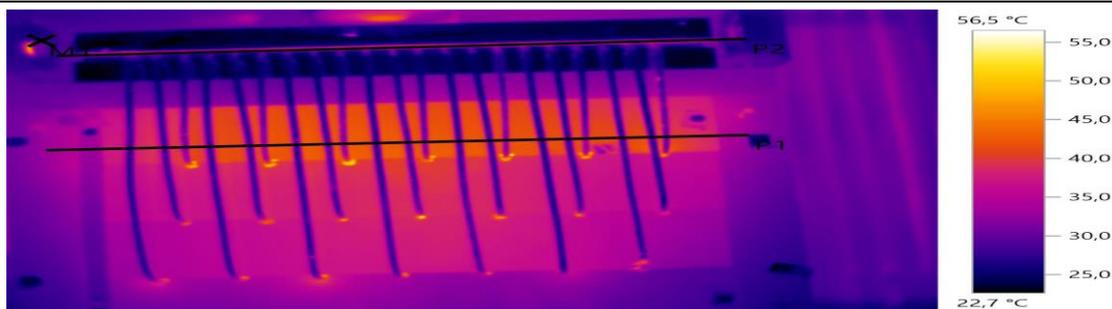


Рис.6. Температурное поле шкафа со стороны задней стенки
Fig.6. Temperature field of the cabinet from the rear wall side

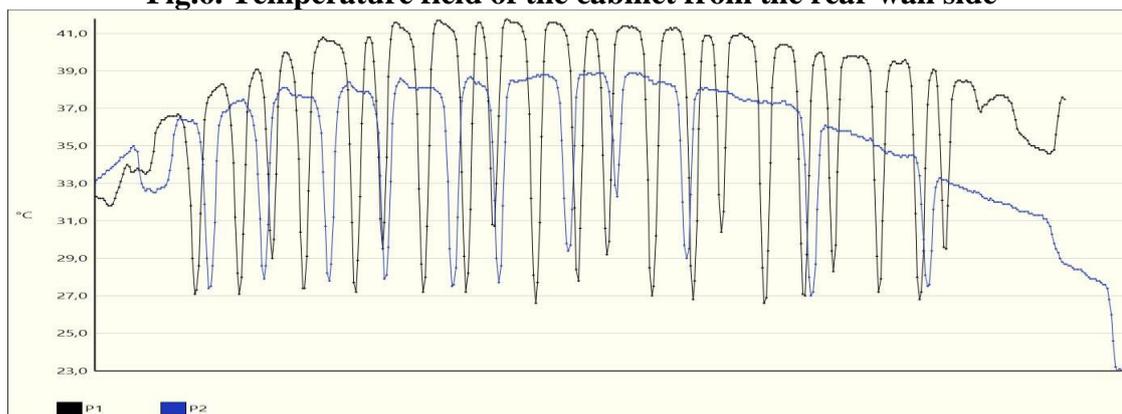


Рис.7. Распределение температуры вдоль полки с тепловой нагрузкой (P1) и тепловыравнивающей пластиной с конденсаторными частями тепловых труб (P2)
Fig.7. Temperature distribution along the shelf with heat load (P1) and heat equalizing plate with condenser parts of heat pipes (P2)

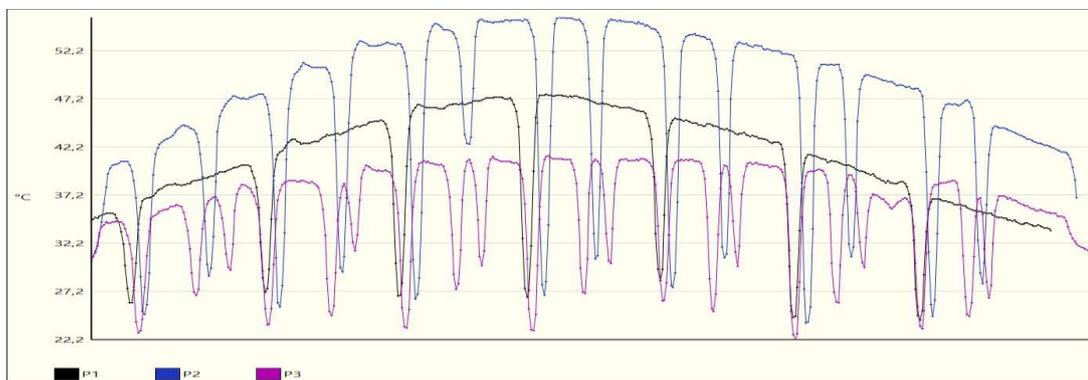


Рис.8. Распределение температуры по отсекам шкафа при работающей системе охлаждения

Fig.8. Temperature distribution in the compartment of the cabinet with the cooling system running

Мощность источников тепловыделений 150 Вт в каждом отсеке.

Вывод. Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанной системы охлаждения шкафов с телекоммуникационным оборудованием;
- указанный способ охлаждения имеет преимущество перед обычным, принудительным или естественным способами;
- согласно проведенным экспериментальным исследованиям температуру в объеме блока и пиковые значения источников тепловыделений удалось существенно снизить;
- при мощностях рассеивания на одной плате в пределах 50 Вт не требуется применения специальных средств по съему тепла с горячих спаев ТЭБ.

Предложена конструкция системы обеспечения теплового режима шкафа для телекоммуникационного оборудования, основанная на совместном использовании тепловых труб и термоэлектрических преобразователей. При работающей системе охлаждения удастся существенно снизить температуру в объеме шкафа и довести ее до приемлемой температуры (снижение пиковых значений с 110 °С до 53°С).

Библиографический список:

1. Белоусов О.А, Муромцев Д.Ю. Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий г. Тамбов Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» 2012 стр. 5-6
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г. Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Наука, 1990.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
5. Патент РФ №369860. Устройство охлаждения аппаратуры / Воронин Г.И., Антонов Ю.В., Федоров В.Н., Чижиков Ю.В., Дрынь В.П.
6. Патент РФ №1755398 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Сидорин В.И.
7. Патент РФ №1287699 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Абросимов А.И.
8. Патент РФ №1595321 Устройство для охлаждения тепловыделяющей аппаратуры. / Калишин Н.А., Колесников А.А., Максимова М.А., Ульянов Н.А.
9. Ханов, Г. В. Альтернативный способ охлаждения процессоров в компьютере / Г. В. Ханов, Е. Б. Белкина // Экология и жизнь : сб. ст. XVIII междунар. науч.-практ. конф., апрель 2010 г. / Приволжский Дом знаний [и др.]. – Пенза, 2010. – С. 137–139.
10. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов // Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
11. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах [Текст]: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов // М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 532 с.
12. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфилов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.
13. Effect of nanopartic leson heat transfer in mini doublepipe heat exchangers in turbulent flow [Text] / Aghayari Reza [and oth.] // Heat Mass Transfer, 2015. – № 51. – P. 301-306.
14. Kuchinskiy P.I., Zograf F.G. M754 Molodezh' i nauka: v 3 t.: materialy konf. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2014. pp.149-154.
15. Staliulionis Z., Zhang Z., Pittini R., Andersen M.A.E., Tarvydas P., Noreika A. Elektronika ir Elektrotechnika. 2014. Vol. 20. №1. pp. 49-54.
16. Li Bin, Byon Chan. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 89. pp. 159-164.

References:

1. Belousov O.A, Muromtsev D.Yu. Komp'yuternye tekhnologii dlya rascheta teplovykh rezhimov i mekhanicheskikh vozdeystviy. Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU»; 2012. P. 5-6. [Belousov O.A, Muromtsev D.Yu. Computer technologies for the calculation of heat modes and mechanical impacts. Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU»; 2012. P. 5-6. (in Russ.)]
2. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. Metody rascheta teplovogo rezhima priborov. M.: Nauka; 1990. [Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. Calculation methods of devices' heat mode. Moscow: Nauka; 1990. (in Russ.)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Okhlazhdenie radioelektronnykh sistem: uchebnoe posobie. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. The cooling of radioelectronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. (in Russ.)]

4. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilisation of microelectronic apparatus by means of semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 p. (in Russ.)]
5. Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Dryn' V.P. Ustroystvo okhlazhdeniya apparatury. Patent RF №369860. [Voronin G.I., Antonov Yu.V., Fedorov V.N., Chizhikov Yu.V., Dryn' V.P. Device for apparatus cooling. Patent RF №369860. (in Russ.)]
6. Sidorin V.I. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1755398. [Sidorin V.I. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1755398. (in Russ.)]
7. Abrosimov A.I. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1287699. [Abrosimov A.I. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1287699. (in Russ.)]
8. Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchey apparatury. Patent RF №1595321. [Kalishin N.A., Kolesnikov A.A., Maksimova M.A., Ul'yanov N.A. Device for heat-emitting apparatus cooling. Patent RF №1595321. (in Russ.)]
9. Khanov G.V., Belkina E.B. Al'ternativnyy sposob okhlazhdeniya protsessorov v komp'yutere. Sbornik statey XVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekologiya i zhizn". Penza; 2010. P. 137–139. [Khanov G.V., Belkina E.B. An alternative method of cooling CPU. Proceedings of XVIII International scientific-practical conference "Ecology and Life". Penza; 2010. P. 137–139. (in Russ.)]
10. Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. Razrabotka i modelirovanie mikrokanal'nykh sistem okhlazhdeniya. Voronezh: VGTU; 2013. 222 s. [Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. The development and modeling of micro-channel cooling systems. Voronezh: VGTU; 2013. 222 p. (in Russ.)]
11. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensifikatsiya teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh. M.: FGUP «TsNIIATOMINFORM»; 2008. 532 s. [Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leont'ev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of heat and mass-exchange in macro-, micro-, and nanoscales. Moscow: FGUP «TsNIIATOMINFORM»; 2008. 532 p. (in Russ.)]
12. Panfilov S.A., Kalikanov V.M., Fomin Yu.A., Savanin A.S. Proektirovanie i ispytaniya okhladiteley silovyykh poluprovodnikovyykh priborov. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2008;3:41-43. [Panfilov S.A., Kalikanov V.M., Fomin Yu.A., Savanin A.S. Design and testing of cooling power semiconductor devices. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2008;3:41-43. (in Russ.)]
13. Aghayari R., Maddah H., Ashori F., Hakiminejad A., Aghili M. Effect of nanoparticles on heat transfer in mini double pipe heat exchangers in turbulent flow. Heat Mass Transfer. 2015;51(301-306).
14. Kuchinskiy P.I., Zograf F.G. M754 Molodezh' i nauka: v 3 t.: materialy konf. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2014. P.149-154.
15. Staliulionis Z., Zhang Z., Pittini R., Andersen M.A.E., Tarvydas P., Noreika A. Investigation of heat sink efficiency for electronic component cooling applications. Elektronika ir Elektrotechnika. 2014;20(1):49-54.
16. Li B., Byon C. Investigation of natural convection heat transfer around a radial heat sink with a concentric ring. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 89. pp. 159-164.

Сведения об авторах:

Рашидханов Арип Таймасханович - старший преподаватель кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии.

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Arip T. Rashidkhanov - Senior Lecturer, Department of Electricity and Renewable Energy.

Shirali A. Yusufov- Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 03.06.2017.

Received 03.06.2017.

Принята в печать 20.06.2017.

Accepted for publication 20.06.2017.

Для цитирования: Аликов А.Ю., Ковалева М.А., Рутковский А.Л., Тедеева Н.В. Автоматизация оптимальной идентификации передаточных функций динамических элементов сложных технологических объектов по кривым разгона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):97-106. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

For citation: Alikov A.Yu., Kovaleva M.A., Rutkovskiy A.L., Tedeeva N.V. Automation of optimal identification of dynamic element transfer functions in complex technical objects based on acceleration curves. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):97-106. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.015

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО КРИВЫМ РАЗГОНА

Аликов А.Ю.³, Ковалева М.А.², Рутковский А.Л.¹, Тедеева Н.В.⁴.

¹⁻⁴Северо-Кавказский горно-металлургический институт

(государственный технологический университет),

¹⁻⁴362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия,

¹e-mail: rutkowski@mail.ru, ²e-mail: mary_kovaleva@list.ru,

³e-mail: alan.alikov@rambler.ru, ⁴e-mail: nadiatedeeva@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью данной работы является минимизация ошибок аппроксимации кривых разгона, полученных экспериментально. **Метод.** На основе рассмотренных особенностей и недостатков хорошо известного метода Симою для расчета передаточных функций по кривым разгона разработан модифицированный вариант метода при помощи программных продуктов MathLab и MathCad. Он заключается в минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от решения дифференциального уравнения в тех же точках. **Результат.** Проведен анализ методов осуществления параметрической идентификации и выбран наиболее эффективный из них – метод Симою. Проанализированы все его преимущества и недостатки, на основе чего, предложен метод, позволяющий производить идентификацию структуры и параметров передаточной функции по экспериментальной кривой разгона, а также выбор оптимальных численных значений этих параметров для минимизации ошибок аппроксимации кривых разгона, полученных экспериментальным путем. **Вывод.** Решена задача оптимального управления сложным технологическим комплексом: на базе модифицированного метода Симою был разработан алгоритм автоматизированного выбора оптимальной формы и расчета параметров передаточных функций динамических элементов сложных технологических объектов по кривым разгона каналов воздействия, который повышает эффективность расчета динамических характеристик объектов управления путем минимизации ошибок аппроксимации. Показана эффективность предложенного метода расчета. Простота данного метода позволяет применять его для практических расчетов, особенно для использования его при проектировании сложных технологических объектов в рамках системы автоматизированного проектирования. Предложенный метод позволяет повысить точность аппроксимации не менее чем на 20%, что так же является важным преимуществом для его практического использования.

Ключевые слова: передаточная функция, математическая модель, аппроксимация, оптимизация, идентификация

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

AUTOMATION OF OPTIMAL IDENTIFICATION OF DYNAMIC ELEMENT TRANSFER
FUNCTIONS IN COMPLEX TECHNICAL OBJECTS BASED
ON ACCELERATION CURVES

Alan Yu. Alikov³, Mariya A. Kovaleva², Aleksandr L. Rutkovskiy¹, Nadya V. Tedeeva⁴
¹⁻⁴North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russia,
¹e-mail: rutkovski@mail.ru, ²e-mail: mary_kovaleva@list.ru,
³e-mail: alan.alikov@rambler.ru, ⁴e-mail: nadiatedeeva@mail.ru

Abstract Objectives The aim of present paper is to minimise the errors in the approximation of experimentally obtained acceleration curves. **Methods** Based on the features and disadvantages of the well-known Simoyu method for calculating transfer functions on the basis of acceleration curves, a modified version of the method is developed using the MathLab and MathCad software. This is based on minimising the sum of the squares of the experimental point deviations from the solution of the differential equation at the same points. **Results** Methods for the implementation of parametric identification are analysed and the Simoyu method is chosen as the most effective. On the basis of the analysis of its advantages and disadvantages, a modified method is proposed that allows the structure and parameters of the transfer function to be identified according to the experimental acceleration curve, as well as the choice of optimal numerical values of those parameters obtained for minimising errors in the approximation of the experimentally obtained acceleration curves. **Conclusion** The problem of optimal control over a complex technical facility was solved. On the basis of the modified Simoyu method, an algorithm for the automated selection of the optimal shape and calculation of transfer function parameters of dynamic elements of complex technical objects according to the acceleration curves in the impact channels was developed. This has allowed the calculation efficiency of the dynamic characteristics of control objects to be increased by minimising the approximation errors. The efficiency of the proposed calculation method is shown. Its simplicity makes it possible to apply to practical calculations, especially for use in the design of complex technical objects within the framework of the computer aided design system. The proposed method makes it possible to increase the accuracy of the approximation by at least 20%, which is an important advantage for its practical use.

Keywords: transfer function, mathematical model, approximation, optimisation, identification

Введение. Применение современных информационных технологий и методов создает возможность для поиска оптимальных условий проектирования сложных технологических объектов и процессов. Однако основополагающим фактором в конечном успехе поиска оптимальных условий является правильный выбор оптимизации и отражающего его критерия. Для перехода технологической системы из одного режима на другой и стабилизации последнего, объекты управления (технологические системы) требуют значительного количества информации о состоянии технологического режима, а также необходимого количества воздействия, которое необходимо к ней применить.

Благодаря вкладу выдающихся отечественных и зарубежных ученых в совершенствование численных методов, в современной науке появилась возможность описать натурный эксперимент математической моделью, исследовав ее и завершив вычислительным экспериментом с новыми результатами и рекомендациями по расширению возможностей функционирования различных объектов [1-17].

Постановка задачи. Несмотря на существенное развитие методов моделирования и оптимизации управления сложными технологическими системами вопросы построение эффективных систем управления на основе анализа способов интенсификации процессов, как частей

сложных технологических систем, к настоящему времени не нашли широкого применения. Поэтому главной задачей современной теории автоматизированного управления является создание методов оптимизации управления для достижения конечной цели или режима функционирования системы. При этом необходимо решить задачу оптимизации как количественных, так и качественных характеристик.

Методы исследования. Вопросы математического моделирования оптимизации производственных процессов сложных систем, в том числе и в рамках исследования операций, рассматривались во многих работах. Однако за счет сложности предлагаемых алгоритмов и трудности в их наладке специфика моделирования и управления сложными технологическими системами не выделена как самостоятельная сфера и базируется на традиционном использовании известных моделей. К таким сложностям можно отнести громоздкие вычислительные процедуры при анализе поведения объектов в динамических режимах – это ключевая задача проектирования алгоритмов управления [18].

Обычно имеется возможность экспериментального определения реакции системы на заданное возмущение и необходимо бывает определить передаточную функцию системы по этим экспериментальным кривым разгона. Проектируя системы регулирования, часто приходится сталкиваться с параметрической идентификацией, так как она является обязательным этапом идентификации передаточной функции объекта управления. В связи с этим разработано большое количество методов ее реализации, наиболее эффективным из которых является метод Симою [19-21]. Разработано сравнительно много различных методов аппроксимации моделей, например, при необходимости упрощенного расчета можно воспользоваться аппроксимацией звеном первого порядка, алгоритм которой представлен в [20].

Для более точного расчета необходимо разработать универсальную методику, которая независимо от передаточной функции объекта сможет выбрать оптимальную структуру передаточной функции и рассчитать ее параметры, а далее определить оптимальные численные значения расчетных параметров передаточной функции. Так как, если использовать известную схему метода площадей в классическом виде, то можно столкнуться со значительными погрешностями, которые могут привести к неправильным результатам. Несмотря на данные недостатки, универсальная методика будет разработана на основе метода Симою, модифицировав его, так как он очень удобен, особенно в условиях использования ЭВМ [21-22].

Суть предлагаемого метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от решения дифференциального уравнение в тех же точках. Во время проведения практических расчетов, используя метод Симою, видно, что точность аппроксимации не возрастает при вычислении площадей выше четвертого порядка, но остаточная квадратичная ошибка аппроксимации, при этом, может быть достаточно большой. В связи с этим предложено использовать оценки параметров передаточной функции как нулевое приближение для решения задач минимизации квадратичной ошибки аппроксимации.

Объект управления можно представить в виде передаточной функции:

$$W_{об}(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1} \cdot \exp(-\tau p), \quad (1)$$

для которой необходимо определить неизвестные коэффициенты: τ , a_1 , a_2 , ..., a_n ; и b_1 , b_2 , ..., b_m .

График изменения во времени управляемой величины $x(t)$ при ступенчатом изменении входной переменной $f(t)$ получен в результате активного эксперимента.

Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W_{об}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p), \quad (2)$$

где $W_1(p) = \exp(-\tau p)$. - передаточная функция звена транспортного запаздывания,

$$W_2(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad \text{- передаточная функция инерционного звена.}$$

Определить значение времени транспортного запаздывания τ можно непосредственно по графику кривой разгона, например, $\tau = 5$ сек. Остается определить передаточную функцию инерционного звена, для чего можно воспользоваться методом Симою, который и позволяет определить передаточную функцию модели объекта по кривой разгона.

Эту задачу реализуем с помощью пакета прикладных программ MathCAD [23]. Внесем необходимые данные: число точек в массиве $k=10$, шаг по времени $dt=0,1$, максимальное приращение входной величины $dx=15$.

Исходные данные по экспериментальной кривой разгона для расчёта передаточной функции в виде вектора

$$sigm := [35 \quad 35.3 \quad 35.6 \quad 38.5 \quad 39 \quad 40.2 \quad 41.5 \quad 42.2 \quad 42.5 \quad 43].$$

Первым этапом является преобразование ПФ в АФХ для всех значений параметров объекта, производим замену оператора $p = j \cdot \omega$, где $j = \sqrt{-1}$, ω – частота.

Задаем диапазон частот $\omega := 0,9$ Выделяем действительную часть уравнения $\text{Re}(j\omega)$:

$$U(\omega, a) := \text{Re}(W(j \cdot \omega, a)),$$

При использовании вещественной части переходная характеристика будет иметь вид:

$$h(t, a) := \frac{2 \cdot dx}{\pi} \int_0^{200} U(\omega, a) \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega.$$

Задаем диапазон точек: $t := 0,9$

$$h(t, a) := 35 + h(t, a).$$

Результат решения - передаточная функция инерциального звена, которая имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{0,533 \cdot (1+p)}{2,533p^3 + 5,96p^2 + 4,066p + 1}.$$

Таким образом, после проведения расчетов, искомая математическая модель объекта управления имеет вид:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{0,533 \cdot (1+p)}{2,533p^3 + 5,96p^2 + 4,066p + 1} e^{-5p}, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ \% \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из рис. 1 видно, что найденное решение рассчитанной передаточной функции отличается от исходной кривой разгона – экспериментальных точек.

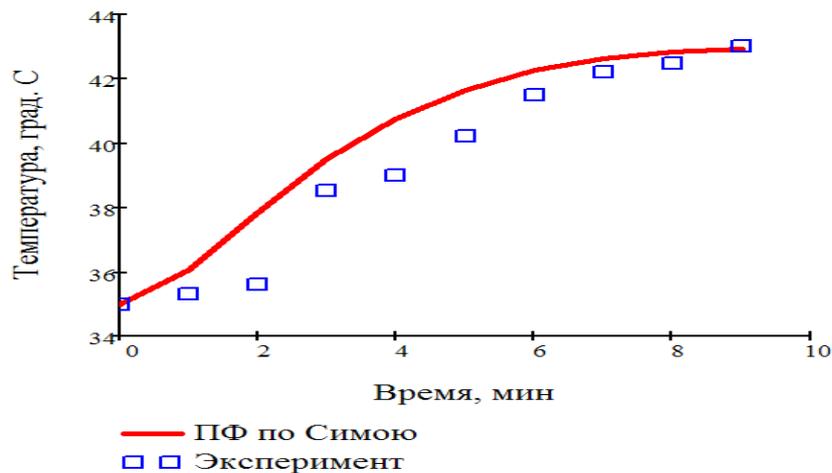


Рис.1. Кривая разгона рассчитанная по методу Симою и экспериментальная кривая разгона

Fig.1. An acceleration curve Simoyu and the experimental curve of acceleration calculated by a method

С помощью сравнения расчетных значений динамической характеристики с экспериментальными данными можно произвести оценка точности полученных коэффициентов передаточной функции, используя пакет прикладных программ MathCAD.

Задаем количество временных интервалов: $j := 0,9$

Представляем массив полученных экспериментальных данных в виде вектора:

$$sigm := sigm^T \quad (4)$$

Находим остаточную квадратичную ошибку:

$$del(a) := \sum_j (h(t, a) - sigm_j)^2.$$

$$del(a) = 12,41$$

И видим, что ее значение велико. В связи с этим предложено использовать коэффициенты передаточной функции как нулевое приближение для решения задачи минимизации квадратичной ошибки аппроксимации.

Принимаем:

$$W(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}. \quad (5)$$

Задаем начальное приближение – коэффициенты, полученные методом Симою

$$a_3 = 2,533; a_2 = 5,96; a_1 = 4,066;$$

Решаем задачу оптимизации: *Given* $a_3 > 1; a_2 > 4; a_1 > 3;$

Используя встроенную функцию Minimize, получаем оптимальные параметры передаточной функции объекта управления $Z := Minimize(del, a)$.

Оптимальные параметры передаточной функции объекта управления:

$$Z = \begin{pmatrix} 10.638 \\ 10.097 \\ 5.152 \end{pmatrix}$$

Квадратичная ошибка отклонения рассчитанной кривой разгона и экспериментальной $del(a) = 1,308$, которая существенно ниже (рис. 2).

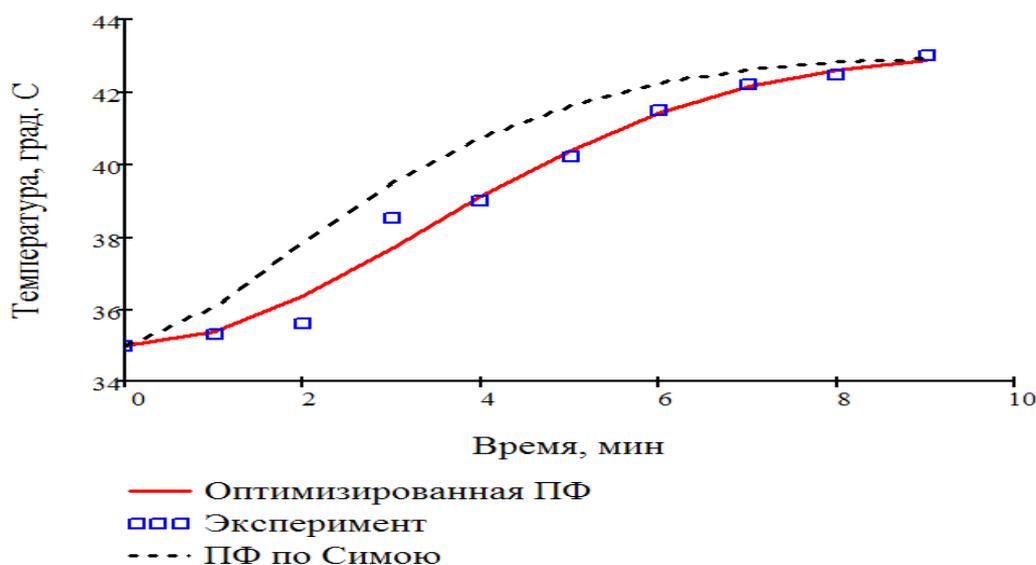


Рис. 2. Отклонение выхода модели от истинного выхода объекта

Fig. 2. A model output deviation from the true output of an object

Таким образом, передаточная функция инерциального звена примет вид:

$$W_2(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{10,638p^3 + 10,097p^2 + 5,152p + 1} \quad (6)$$

Искомая математическая модель объекта управления имеет вид

$$W(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{10,638p^3 + 10,097p^2 + 5,152p + 1} e^{-5p}, \quad \left[\begin{array}{c} 0 \\ C \\ \% \end{array} \right]. \quad (7)$$

Расчет системы автоматического управления включает две задачи:

- 1) Определение свойств объекта управления;
- 2) Выбор и расчет автоматического регулятора, который обеспечивает необходимое качество управления.

Соответственно, конечной целью расчета параметров настройки системы автоматического управления является получение переходных процессов в ней заданного качества.

Аналитическим методом в среде MathCad [23] определяем параметры настройки ПИ-регулятора $W_p(p) = C_1 + C_o/p$.

Определим качество регулирования для передаточных функций, используя полученные параметры настройки регулятора, полученных методом Симою и оптимизированным, рис. 3.

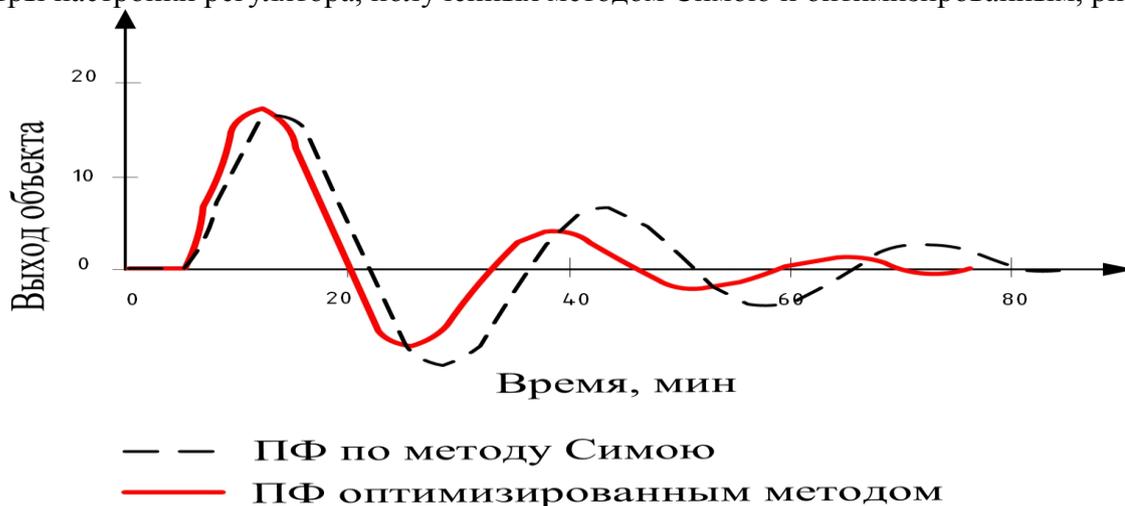


Рис. 3. Кривые переходного процесса для ПИ-регулятора
Fig. 3. Curves of transient phenomenon for the PI-regulator

Переходный процесс системы регулирования после получения параметров настройки регулятора аналитическим методом представлен на рис. 4.

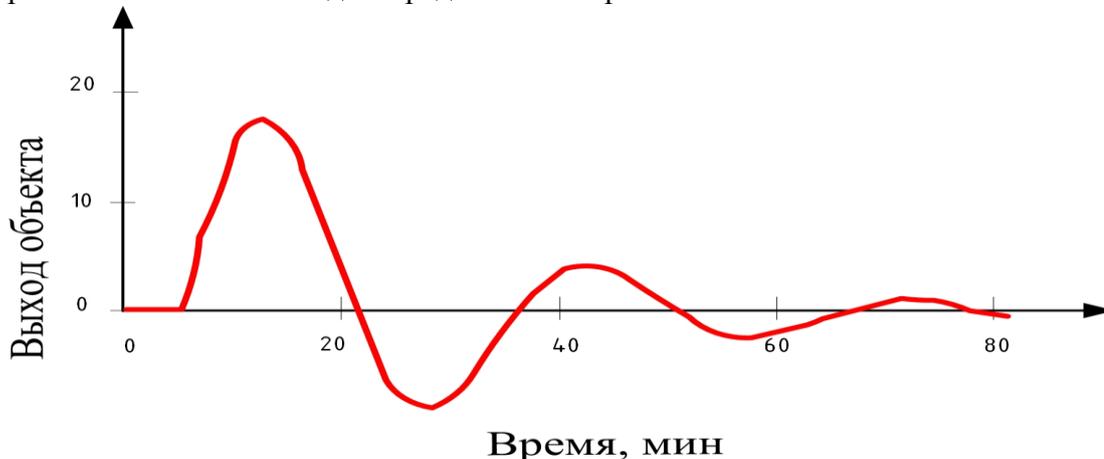


Рис. 4. Кривая переходного процесса
Fig. 4. Curve of transient phenomenon

Оценим прямые показатели качества регулирования по кривым переходного процесса, рисунки 3 и 4: t_p – время регулирования; x_{\max}^d – максимальное динамическое отклонение; λ – перерегулирование; ϕ – степень затухания переходного процесса; I_2 – интегральная ошибка (для наглядности все прямые показатели представлены в табл.1):

Таблица 1. Показатели качества регулирования
Table 1. Regulation figures of merit

Показатели	t_p , сек	x_{\max}^d	λ	ϕ	I_2
Передаточная функция по методу Симою (рис.3)	80	17,389	47,27	0,764	262,259
Оптимизированная передаточная функция (рис. 3)	100	17,668	61,517	0,611	337,648
Оптимизированная передаточная функция (рис.4)	80	17,721	48,83	0,756	299,238

Обсуждение результатов. Метод, описанный в данной работе, может быть рекомендован для практических расчетов, так как отличается простотой. Сущность метода заключается в следующем: используются два стандартных алгоритма, первый из которых предназначен для определения нулевого уровня решения задачи оптимизации – метод Симою, а второй – для оптимизации параметров передаточной функции на основании этого начального приближения (нулевого уровня решения задачи).

Данная характеристика особенно важна для использования метода при проектировании систем автоматического регулирования сложных технологических объектов в рамках систем автоматизированного проектирования, так как эти два стандартных метода позволяют быстро и точно рассчитать параметры передаточной функции, что позволяет гораздо качественнее управлять регулируемыми параметрами и более длительное время поддерживать регулируемую величину на заданном уровне.

Стоит так же отметить, что предложенный метод является работоспособным для любых алгоритмов: П, ПИ, ПИД, ПДД и т.д.

Вывод. Решена задача оптимального управления сложным технологическим комплексом. На базе модифицированного метода Симою разработан алгоритм автоматизированного выбора оптимальной формы и расчета параметров передаточных функций динамических элементов сложных ТО по кривым разгона каналов воздействия, который повышает эффективность расчета динамических характеристик объектов управления путем минимизации ошибок аппроксимации. Показана эффективность предложенного метода расчета.

Библиографический список:

1. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. - М.: Наука, 1995. – 336 с.
2. Красовский А.А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. - М., 1968. – 240 с.
3. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. - М.: Химия, 1974. - 344с.
4. Петров Б.Н., Бабак С.Ф., Ильясов Б.Г. и др. Об одном подходе к анализу структур многосвязных систем. - В кн.: Исследование по теории многосвязных систем / Петров Б.Н., Мееров М.В., - М.: Наука, 1982. – С. 4 – 12
5. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат Н.И., Ульянов С.В. Теория моделей в процессах управления – М.: Наука, 1978. - 216 с.
6. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления (обзор) / Автоматика и телемеханика, 1979. - N 6. - С. 80 – 93
7. Месарович М. Общая теория систем / М. Месарович. – М.: Мир, 1966. – 240 с.

8. Калман Р.Е., Фалб П.Л., Арбиб М.А. Очерки по математической теории систем. - М.: Мир, 1977. – 250 с.
9. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. - М.: Мир, 1974. – 464 с.
10. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. - М.: Наука, 1972. – 474 с.
11. Основы автоматизации химических производств. / П.А.Обновленского, А.А.Гуревича. - М.: Химия, 1975. – 528 с.
12. Остром К., Болин Т. Цифровая идентификация динамических систем на основе данных о нормальном режиме работы / В кн.: Теория самонастраивающихся систем управления. Труды 11 Международного симпозиума ИФАК по самонастраивающимся системам. - М.: Наука, 1969. – с. 99 – 116
13. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979. – 302 с.
14. Калман Р.Е. Идентификация систем с шумами / Успехи математических наук. - 1985, т.40, N 4(244). - С. 27 – 41
15. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем / Известия АН. Техническая кибернетика. -М.: Наука, 1992. – N 6. – С. 55 – 64
16. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / В кн.: Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С. 5 – 49
17. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. / Кн.1: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика. 1986. – 366 с.
18. Рутковский А.Л., Матвеева Л.И., Козачек Г.В. Оптимизация коэффициентов передаточной функции, полученной модифицированным методом Симою по экспериментально снятой переходной характеристике // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Т.6 – N3. – 2010. – С. 138 – 141.
19. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М-Л: Государственное энергетическое издательство, 1960. - 328с.
20. Кравцов А.Ф., Зайцева Е.В, Чуйко Ю.Н. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов. Киев - Донецк: Вища шк., 1983. – 317с.
21. Симою М.П., Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования, «Автоматика и телемеханика», т. 8, 1957, № 6С. 514–528с.
22. Arunyants G.G., Rutkovskii A.L., Salikhov Z.G., Stolbovskii D.N. Computation of Dynamic Characteristics of Control Systems An Effectiveness Enhancement Method, Automation and Control, Vol. 66, № 4, 2005, pp. 562-569
23. Очков В.Ф. Mathcad-14 для студентов и инженеров: русская версия/ В.Ф. Очков.- СПб.: БХВ – Петербург, 2009. – 498с.

References:

1. Tsyppkin Ya.Z. Informatsionnaya teoriya identifikatsii. M.: Nauka; 1995. 336 s. [Tsyppkin Ya.Z. Informational theory of identification. Moscow: Nauka; 1995. 336 p. (in Russ.)]
2. Krasovskiy A.A. Statisticheskaya teoriya perekhodnykh protsessov v sistemakh upravleniya. M.; 1968. 240 s. [Krasovskiy A.A. Statistical theory of transitional processes in control systems. Moscow; 1968. 240 p. (in Russ.)]
3. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem. M.: Khimiya; 1974. 344 s. [Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. The principles of mathematical modeling of chemical-technological systems. Moscow: Khimiya; 1974. 344 p. (in Russ.)]
4. Petrov B.N., Babak S.F., Il'yasov B.G. i dr. Ob odnom podkhode k analizu struktur mnogovyaznykh sistem. Issledovanie po teorii mnogovyaznykh sistem. Petrov B.N., Meerov M.V. (Eds). M.: Nauka; 1982. S. 4 – 12. [Petrov B.N., Babak S.F., Il'yasov B.G. et al. On the approach to the analysis of multi-relation system structures. Studies on the theory of multi-relation systems. Petrov B.N., Meerov M.V. (Eds). Moscow: Nauka; 1982. P. 4 – 12. (in Russ.)]
5. Petrov B.N., Ulanov G.M., Gol'denblat N.I., Ul'yasov S.V. Teoriya modeley v protsessakh upravleniya. M.: Nauka; 1978. 216 s. [Petrov B.N., Ulanov G.M., Gol'denblat N.I., Ul'yasov S.V. Model theory in control processes. Moscow: Nauka; 1978. 216 p. (in Russ.)]
6. Raybman N.S. Identifikatsiya ob"ektov upravleniya (obzor). Avtomatika i telemekhanika. 1979;6:80-93. [Raybman N.S. Identification of control objects (a review). Automation and Remote Control. 1979;6:80-93. (in Russ.)]

7. Mesarovich M. *Obshchaya teoriya sistem*. M.: Mir; 1966. 240 s. [Mesarovich M. *General systems theory*. Moscow: Mir; 1966. 240 p. (in Russ.)]
8. Kalman P.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem*. M.: Mir; 1977. 250 s. [Kalman P.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Essays on mathematical systems theory*. Moscow: Mir; 1977. 250 p. (in Russ.)]
9. Direktor S., Rorer R. *Vvedenie v teoriyu sistem*. M.: Mir; 1974. 464 s. [Direktor S., Rorer R. *Introduction in systems theory*. Moscow: Mir; 1974. 464 p. (in Russ.)]
10. Li E.B., Markus L. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya*. M.: Nauka; 1972. 474 s. [Li E.B., Markus L. *Fundamentals of optimal control theory*. Moscow: Nauka; 1972. 474 p. (in Russ.)]
11. *Osnovy avtomatizatsii khimicheskikh proizvodstv*. Obnovlenskiy P.A., Gurevich A.A. (Eds.). M.: Khimiya; 1975. 528 s. [Fundamentals of chemical production automation. Obnovlenskiy P.A., Gurevich A.A. (Eds.). Moscow: Khimiya; 1975. 528 p. (in Russ.)]
12. Ostrem K., Bolin T. *Tsifrovaya identifikatsiya dinamicheskikh sistem na osnove dannykh o normal'nom rezhime raboty*. Trudy 11 Mezhdunarodnogo simpoziuma IFAK po samonastravayushchimsya sistemam "Teoriya samonastravayushchikhsya sistem upravleniya". M.: Nauka; 1969. S. 99 – 116. [Ostrem K., Bolin T. *Digital identification of dynamic systems based on the data about the normal mode of operation*. Proceedings of the 11 International symposium IFAK on the self-adaptive systems "Theory of self-adaptive control systems". Moscow: Nauka; 1969. P. 99 – 116. (in Russ.)]
13. Grop D. *Metody identifikatsii sistem*. M.: Mir; 1979. 302 s. [Grop D. *System identification methods*. Moscow: Mir; 1979. 302 p. (in Russ.)]
14. Kalman P.E. *Identifikatsiya sistem s shumami*. Uspekhi matematicheskikh nauk. 1985;40(4-244):27-41. [Kalman P.E. *Identification of systems with noises*. Russian Mathematical Surveys. 1985;40(4-244):27-41. (in Russ.)]
15. L'jung L. *O tochnosti modeli v identifikatsii sistem*. Izvestiya AN. Tekhnicheskaya kibernetika. 1992;6:55 – 64. [L'jung L. *On the model's accuracy for systems identification*. Engineering cybernetics. 1992;6:55 – 64. (in Russ.)]
16. Zade L.A. *Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov prinyatiya resheniy*. Matematika segodnya. M.: Znanie; 1974. S. 5 – 49. [Zade L.A. *Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes*. Mathematics today. Moscow: Znanie; 1974. P. 5 – 49. (in Russ.)]
17. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz*. M.: Finansy i statistika; 1986. 366 s. [Dreyper N., Smit G. *Applied regression analysis*. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (in Russ.)]
18. Rutkovskiy A.L., Matveeva L.I., Kozachek G.V. *Optimizatsiya koeffitsientov peredatochnoy funktsii, poluchennoy modifitsirovannym metodom Simoyu po eksperimental'no snyatoy perekhodnoy kharakteristike*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010;6(3):138 – 141. [Rutkovskiy A.L., Matveeva L.I., Kozachek G.V. *Optimisation of transfer function coefficient obtained by modified Simoyu method using experimentally derived transfer character*. The Bulletin of Voronezh State Technical University. 2010;6(3):138 – 141. (in Russ.)]
19. Stefani E.P. *Osnovy rascheta nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh protsessov*. M-L: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo; 1960. 328 s. [Stefani E.P. *Fundamentals of regulator adjustment of heat-energetic processes*. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo; 1960. 328 p. (in Russ.)]
20. Kravtsov A.F., Zaytseva E.V, Chuyko Yu.N. *Raschet avtomaticheskikh sistem kontrolya i regulirovaniya metallurgicheskikh protsessov*. Kiev - Donetsk: Vishcha shk., 1983; 317 s. [Kravtsov A.F., Zaytseva E.V, Chuyko Yu.N. *The calculation of automatic control and regulation systems of metallurgical processes*. Kiev - Donetsk: Vishcha shk., 1983; 317 p. (in Russ.)]
21. Simoyu M.P. *Opreделение koeffitsientov peredatochnykh funktsiy linearizovannykh zven'ev i sistem avtoregulirovaniya*. Avtomatika i telemekhanika. 1957;8(6):514–528. [Simoyu M.P. *Determination of transfer function coefficients of linearised links and automatic control systems*. Automation and Remote Control. 1957;8(6):514–528. (in Russ.)]
22. Arunyants G.G., Rutkovskii A.L., Salikhov Z.G., Stolbovskii D.N. *Computation of dynamic characteristics of control systems: an effectiveness enhancement method*. Automation and Control. 2005;66(4):562-569.
23. Ochkov V.F. *Mathcad-14 dlya studentov i inzhenerov: russkaya versiya*. SPb.: BKhV – Peterburg; 2009. 498 s. [Ochkov V.F. *Mathcad-14 for students and engineers: Russian version*. Saint-Petersburg: BKhV – Peterburg; 2009. 498 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Рутковский Александр Леонидович – д.т.н., профессор кафедры «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей».

Ковалева Мария Александровна – к.т.н., доцент кафедры «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей».

Аликов Алан Юрьевич – к.т.н., профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования».

Тедеева Надя Вадимовна – аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования».

Information about the authors:

Aleksandr L. Rutkovskiy - Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces.

Mariya A.Kovaleva - Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces.

Alan Yu. Alikov - Cand. Sci.(Technical), Prof., Department of Automated Design Systems.

Nadya V. Tedeeva -Postgraduate student, Department of Automated Design Systems.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 31.05.2017.

Received 31.05.2017.

Принята в печать 19.06.2017.

Accepted for publication 19.06.2017.

Для цитирования: Аристова Е.М. Установление взаимосвязи между методами аддитивной свертки и метрики. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):107-117. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-107-117

For citation: Aristova E.M. Regulation of the relationship between additive reduction and metrics methods. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):107-117. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-107-117

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.81

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-107-117

УСТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ И МЕТРИКИ

Аристова Е.М.

Воронежский государственный университет,

394018, Воронежская область, г. Воронеж, Университетская пл., д.1, Россия,

e-mail: ptim@yandex.ru

Резюме: *Цель.* Определение взаимосвязи между методами обобщенного критерия и целевого программирования. *Метод.* В работе рассматривается операция агрегирования, лежащая в основе многих процедур принятия решений, используемая в межотраслевом балансе, в нейросетевых технологиях, при исследовании многоцелевых систем. Использование некоторых метрик в рамках целевого программирования может приводить к решениям, которые не являются Парето-оптимальными. Поэтому в целевом программировании значительное место уделяется нахождению условий, при которых использование той или иной метрики заведомо приводит к Парето-оптимальным решениям. Для аддитивной свертки известны необходимые (теорема Карлина) и достаточные условия Парето-оптимальности. Для обобщенного критерия на основе порядковых операторов взвешенного агрегирования представлены доказанные автором теорема о включении множества оптимальных по Парето решений во множество эффективных решений и теорема о Парето-оптимальности полученного решения. **Результат.** Приведено доказательство теоремы о Парето-оптимальности решения, максимизирующего обобщенный критерий, полученный на основе порядковых операций взвешенного агрегирования, которая обосновывает использование операций данного типа для решения задач векторной оптимизации или многокритериального выбора. Теорема о существовании аддитивной свертки для метрики верна только в частном случае и основана на теореме Карлина, согласно которой подмножество точек Парето-множества максимизирует некоторую аддитивную свертку. **Вывод.** В статье установлена взаимосвязь между методами аддитивной свертки и метрики. Сформулировано и доказано утверждение о взаимосвязи параметров функции состояния в методе целевого программирования и весовых коэффициентов аддитивной свертки, которая обеспечивает эквивалентность оптимальных решений по Парето.

Ключевые слова: идеальное решение, аддитивная свертка, метрика, метод целевого программирования, набор критериев

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

REGULATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ADDITIVE REDUCTION AND METRICS METHODS

Ekaterina M. Aristova

Voronezh State University,

1 Universitetskaya square, Voronezh 394018, Russia,

e-mail: pmim@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the work is to determine the relationship between generalised criterion and target programming methods. **Methods** The paper considers the aggregation operation that underlies many decision-making procedures used in input-output models, in neural network technologies and in the study of multi-purpose systems. The use of certain metrics within the framework of target programming can lead to solutions that are not Pareto-optimal. Therefore, in targeted programming, a significant place is given to finding the conditions under which the use of one or another metric obviously leads to Pareto-optimal solutions. The necessary (Carlin's theorem) and sufficient conditions of Pareto-optimality are known to perform the additive reduction. For a generalised criterion on the basis of order operators of weighted aggregation, two theorems proven by the author (the theorem on the inclusion of the set of Pareto-optimal solutions into a set of effective solutions and the Pareto optimality theorem for the solution obtained) are presented. **Results** The proof of the Pareto optimality theorem of the solution is given, maximising the generalised criterion obtained on the basis of the order operations of weighted aggregation, which justifies the use of operations of this type for solving the problems of vector optimisation or multicriteria choice. The theorem on the existence of an additive reduction for a metric is true only in the particular case and is based on Carlin's theorem, according to which a subset of Pareto-set points maximises some additive reduction. **Conclusion** In the paper a relationship between the additive reduction and metrics methods is established. An assertion concerning the relationship between the parameters of the distance function in the target programming method and the weighting coefficients of the additive reduction is formulated and proved, which ensures the equivalence of the optimal Pareto solutions.

Keywords: perfect solution, additive reduction, metric, target programming method, set of criteria

Введение. Практически любой вид человеческой деятельности связан с ситуациями, когда имеется несколько возможностей, и человек волен из этих возможностей выбрать любую, наиболее подходящую ему, т.е. принимает решение.

Под принятием решений (ПР) подразумевается целенаправленный процесс, включающий определение целей ПР, постановку задачи ПР и саму процедуру ПР – выбор одной из имеющихся альтернатив, лучшей в некотором смысле. Основной субъект процесса ПР – лицо, принимающее решение (ЛПР) или группа ЛПР [1-5].

Теория принятия решений позволяет решать задачи наилучшего выбора. С ее помощью можно научиться осуществлять выбор более обоснованно и эффективно, используя имеющуюся в наличии информацию о предпочтениях. Эта теория помогает избежать принятия заведомо негодных решений и учесть возможные отрицательные последствия непродуманного выбора [1,6-11].

Чрезвычайно широкий и крайне важный с практической точки зрения класс задач выбора составляют многоцелевые (многокритериальные) задачи, в которых качество принимаемого решения оценивается по нескольким критериям одновременно [1].

Постановка задачи. Рассмотрим многоцелевую задачу линейного программирования [1]

$$\begin{cases} f_i(x) = \sum_{k=1}^p c_k^i x_k \rightarrow \max (i = \overline{1, p}), \\ x \in X \subseteq R^p, \end{cases} \quad (1)$$

где $f_i(x)$ – i -ая целевая функция, общее число которых равно p ,
 c_k^i – коэффициент i -ой целевой функции, стоящий на k -месте,
 X – множество допустимых значений переменной x .

По существу многоцелевая задача отличается от обычной задачи оптимизации только наличием нескольких целевых функций вместо одной [12-16].

Пусть X – множество вариантов решений в задаче многокритериальной максимизации, а каждой альтернативе $x \in X$ ставится в соответствие векторная оценка $f(x) = (f_1(x), \dots, f_p(x)) \in R^p$.

Решение $x^* \in X$ называется *оптимальным по Парето*, если для любого другого решения $x \in X$ для всех частных критериев выполняются неравенства $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ ($i = \overline{1, p}$) и имеется такой индекс $i_0 \in \{1, \dots, p\}$, что соответствующее неравенство выполняется как строгое, т.е. $f_{i_0}(x) < f_{i_0}(x^*)$ [1,17-18].

Множество Парето $P(X)$ представляет собой множество попарно несравнимых по предпочтению решений. Для окончательного выбора оптимального решения необходимо привлечение специальных методов.

Парето-оптимальность рассматривает множество значений переменных задачи (решений или альтернатив), в которых значение ни одной из локальных функций полезности не может быть улучшено, не ухудшив при этом величину какой-либо другой функции полезности.

Это множество в терминологии многокритериального выбора называют *множеством эффективных решений* [1,17].

Для решения многоцелевой задачи линейного программирования (1) существует много различных методов. Наиболее популярен – метод, основанный на скаляризации критериев. Идея метода заключается в формировании на основе дополнительной информации, полученной от лица, принимающего решение (ЛПР), функциональной зависимости между f_1, \dots, f_p и построение на ее основе скалярной функции для задачи оптимизации, которая бы сыграла роль нового принципа.

Данная функция называется *обобщенной функцией критериев* или *обобщенным критерием* [1-2, 4-5,14].

Рассмотрим задачу:

$$\begin{cases} \Phi(f_1(x), \dots, f_p(x)) \rightarrow \max \\ x \in P(X), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \rho(f(x), \dots, f(x^0)) \rightarrow \min \\ x \in P(X). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\Phi(\cdot)$ – обобщенный критерий, $P(X)$ – множество Парето (множество эффективных решений), $\rho(\cdot)$ – некоторая метрика.

Рассмотрим задачу определения взаимосвязи между методами обобщенного критерия и целевого программирования: если $x^* \in X$ является решением задачи (2), то существует ли метрика ρ такая, что x^* является решением задачи (3), и наоборот, если $x^* \in X$ – решение задачи (3), то существует ли аддитивная свертка, что x^* – решение задачи (2)?

Метод исследования. Проблема агрегирования достаточно активно обсуждается в отечественной и зарубежной литературе [1,7,15-17,19], поскольку лежит в основе многих процедур принятий решений (групповой выбор, многоцелевые модели), используется в межотраслевом балансе, нейросетевых технологиях, при исследовании многоцелевых систем.

В самом общем смысле под *агрегированием* понимается переход от векторной оценки размерности n к векторной оценке размерности m при $m < n$.

Зачастую агрегирование предполагает переход от векторной оценки к скалярной, которая называется *обобщенной* (групповой, комплексной, интегральной).

В основе аналитических приемов такого типа агрегирования лежит понятие оператора агрегирования [1].

Пусть X – заданное множество альтернатив; $A_i(x) = a_i$ – частная оценка альтернативы x , в качестве которой может выступать оценка по i -му критерию (показателю), или оценка, полученная от i -го эксперта; $(a_1, \dots, a_n)^T$ – векторная оценка альтернативы $x \in X$, тогда ее обобщенная (комплексная, интегральная) оценка может быть получена путем агрегирования компонент векторной оценки в соответствии с определенным принципом.

Как правило, каждый критерий K_i из множества критериев $K = \{K_1, \dots, K_n\}$ имеет свой вес $w_i, i = \overline{1, n}$, определяющий степень важности (значимости) оценки по этому критерию, а каждый эксперт E_j из группы экспертов $E = \{E_1, \dots, E_m\}$ характеризуется коэффициентом компетентности $c_j, j = \overline{1, m}$, позволяющим учитывать значимость его мнения.

Поэтому оператор агрегирования учитывает весовые коэффициенты w_i и/или c_j и имеет вид:

$$\alpha(x) = \text{Agg}(W, A),$$

где

$\text{Agg}(\cdot)$ – оператор агрегирования, формализующий некоторую стратегию агрегирования; x – альтернатива из заданного множества; $\alpha(x)$ – ее обобщенная оценка, $A = (a_1, \dots, a_n)$ – вектор частных оценок альтернативы; $W = (w_1, \dots, w_n)$ – вектор весовых коэффициентов (w_i определяют степень влияния частных оценок a_i на обобщенную оценку $\alpha(x)$).

Если A – вектор оценок альтернативы по критериям (показателям), а вектор W задает веса критериев, то $\alpha(x)$ – многокритериальная оценка альтернативы. Если компоненты вектора W – коэффициенты компетентности экспертов, а A – вектор оценок, полученных от этих экспертов, то $\alpha(x)$ – групповая (коллективная) оценка альтернативы [7, 19-21].

Заметим, что при формировании обобщенной оценки возможны две схемы агрегирования:

- 1) $\text{Agg}_1(W, A) = \text{Agg}_1(g(w_1, a_1), g(w_2, a_2), \dots, g(w_n, a_n)) = \alpha(x)$;
- 2) $\text{Agg}_2(W, A) = \text{Agg}_2(f_1(W), f_2(A)) = (w, \alpha(x))$.

В первом случае вначале строятся агрегаты $g(w_i, a_i)$ для всех $i = \overline{1, n}$, которые затем «сворачиваются» в обобщенную оценку $\alpha(x)$.

Во втором случае – агрегирование весов и частных оценок альтернативы осуществляют отдельно, причем собственно оценкой альтернативы является $\alpha(x)$, а w рассматривается как степень доверия к этой оценке.

Оператор агрегирования позволяет решать задачу наиболее радикальным способом – за счет свертки векторной оценки с соответствующим набором весов в скалярную величину, позволяя тем самым определить отношение линейного порядка на множестве альтернатив.

Исследователи определяют оператор агрегирования исходя из различных наборов свойств, среди которых определяющими являются монотонность, идемпотентность, наличие нейтрального элемента, а также дополнительные условия, накладываемые на обобщенную оценку.

Комбинирование перечисленных свойств порождает различные семейства операторов агрегирования, многие из которых являются параметрическими.

В связи с их многообразием проблема выбора подходящего оператора для конкретной прикладной задачи занимает центральное место, поскольку ее решение влияет на ключевые свойства модели, такие как: адаптивность, эффективность вычислений, учет типа исходных данных и стратегия агрегирования. Большое значение имеет параметрическое представление операторов агрегирования, поскольку именно за счет выбора подходящих значений параметров можно обеспечить гибкость оценочной модели и настроить ее информационную среду.

Информация о частных оценках может учитываться в двух различных аспектах. Если важно акцентировать внимание, прежде всего, на значимости источников информации (критериев, экспертов), то используются классические операторы (взвешенные мультипликативные и аддитивные свертки).

В случаях, когда первичной является важность значений аргументов, применяются порядковые операторы. Они агрегируют компоненты векторной оценки, упорядоченные определенным образом (порядковые операторы). К операторам данного класса относятся OWA-операторы (Ordered Weighted Averaging Aggregation operator) и различные их модификации и обобщения [1,7, 20].

Выбор оператора агрегирования – важнейший этап формирования моделей оценки, который напрямую зависит от качества исходной информации. Заметим, что как веса, так и оценки альтернатив могут быть как количественными, так и качественными [1,7].

Решение задачи (2) основано на формировании обобщенного критерия [1], а задача (3) является основой метода целевого программирования.

В основе этого метода лежит простое эвристическое соображение – стараться в качестве наилучшего выбрать такой возможный вектор, который в критериальном пространстве расположен ближе всех к некоторому «идеальному» вектору.

При этом в качестве «идеального» нередко берется вектор, составленный из максимальных значений компонент векторного критерия, а варьирование метрики для измерения расстояния в критериальном пространстве приводит к целому семейству однотипных вариантов метода целевого программирования, которые, однако, могут приводить к различным конечным результатам [1].

Для обоснованного выбора той или иной метрики никаких четких рекомендаций не выработано; здесь чаще всего исходят из соображений простоты, а именно, – применяют такую метрику, чтобы получающаяся в итоге экстремальная задача приближения была наиболее простой в вычислительном отношении.

Пусть имеется набор критериев f_1, \dots, f_p , каждый из которых желательно максимизировать на множестве возможных решений X .

В обозначениях нашей задачи в рамках метода целевого программирования в качестве лучшего, выбирается такое решение $x^* \in X$, для которого вектор $f(x^*) = (f_1(x^*), \dots, f_p(x^*))$ находится на наименьшем расстоянии от некоторого «идеального» вектора $f(x^0) = (\max_{x \in P(x)} f_1(x), \dots, \max_{x \in P(x)} f_p(x))$, составленного из максимальных значений частных критериев [1].

Необходимо отметить, что использование некоторых метрик в рамках целевого программирования может приводить к решениям, которые не являются Парето-оптимальными.

Поэтому в целевом программировании значительное место уделяется нахождению условий, при которых использование той или иной метрики заведомо приводит к Парето-оптимальным решениям [1].

Справедлива теорема Карлина. Если X – выпуклый метрический компакт, $f_i(x)$ вогнуты на нем, а x^0 – оптимальная по Парето альтернатива, то существует такой набор чисел

$$\lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1,$$

что критерий $\sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x)$ достигает своего максимума в точке $x^0 \in X$.

Пусть производится максимизация векторной функции $f(Y) = (f_1(Y), \dots, f_n(Y))$, $Y = (y_1, \dots, y_m)$ на критериальном пространстве $f(G)$, G – выпуклое замкнутое множество, при ограничениях $g(Y) \geq 0$, $Y \in G$ (предполагается, что векторные функции f и g вогнутые функции переменной Y).

Допустим, что точка Y^0 , удовлетворяющая ограничениям, является эффективной точкой, если не существует другого допустимого вектора Y , для которого $f(Y) \geq f(Y^0)$.

Согласно теореме, если Y^0 является эффективной точкой, то существует такой вектор $a = (a_1, \dots, a_n)$, $a_i \geq 0$, удовлетворяющими равенству $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, что максимум функции $\Phi(Y) = (\alpha, f(Y))$ на множестве всех Y , удовлетворяющих ограничениям $g(Y) \geq 0, Y \in G$, достигается для $Y = Y^0$.

Для аддитивной свертки известны необходимые (теорема Карлина) и достаточные условия Парето-оптимальности.

Для обобщенного критерия на основе порядковых операторов взвешенного агрегирования [7,12,19,21] в работе [1] приводятся:

Теорема 1. OWA-оператор является строго монотонным по каждому аргументу.

Доказательство. Пусть $A = (a_1, \dots, a_n), w = (w_1, \dots, w_n), F(W, A) = (W, B) = \sum_{i=1}^n w_i b_i$, где вектор B определяется из вектора A путем упорядочения элементов вектора A по невозрастанию.

Рассмотрим вектор $A' = (a_1, \dots, a_{l-1}, a_l + \delta, a_{l+1}, \dots, a_n)$, который получен из A увеличением компоненты a_l на величину $\delta > 0$.

Предположим, что a_l в векторе B соответствует компоненте b_i , тогда b_i также увеличится на δ , что приведет к переупорядочению вектора B , при этом b_i переместится на k -е место, причем $k < i$.

Компоненты полученного при этом вектора B' определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} b'_j &= b_j, j = \overline{1, k-1}, \\ b'_k &= b_i + \delta, \\ b'_j &= b_{j-1}, j = \overline{k+1, l}, \\ b'_j &= b_j, j = \overline{l+1, n}. \end{aligned}$$

В этом случае

$$F(W, A') = (W, B') = \sum_{j=1}^n w_j b'_j = \sum_{j=1}^{k-1} w_j b_j + w_k (b_i + \delta) + \sum_{j=k+1}^i w_j b_{j-1} + \sum_{j=i+1}^n w_j b_j.$$

Тогда

$$\begin{aligned} F(W, A') - F(W, A) &= \sum_{j=1}^n w_j b'_j - \sum_{j=1}^n w_j b_j = \\ &= \sum_{j=1}^{k-1} w_j b_j + w_k (b_i + \delta) + \sum_{j=k+1}^i w_j b_{j-1} + \sum_{j=i+1}^n w_j b_j - \sum_{j=1}^n w_j b_j = \\ &= \sum_{j=1}^{k-1} w_j b_j + w_k (b_i + \delta) + \sum_{j=k+1}^i w_j b_{j-1} + \\ &+ \sum_{j=i+1}^n w_j b_j - \sum_{j=1}^{k-1} w_j b_j - w_k b_k - \sum_{j=k+1}^i w_j b_j - \sum_{j=i+1}^n w_j b_j = \\ &= w_k (b_i + \delta - b_k) + \sum_{j=k+1}^i w_j (b_{j-1} - b_j) > 0, \end{aligned}$$

т.к. $b_i + \delta > b_k$ и $\forall i (b_{j-1} \geq b_j)$. Следовательно, $F(W, A') > F(W, A)$, и теорема доказана.

Теорема 2. Пусть X – множество вариантов решений; $f_i(x)$ – частная оценка решения $x \in X$ по i -му критерию; $f(x) = (f_1(x), \dots, f_p(x))$ – векторная оценка решения x (множество векторных оценок образует критериальное пространство).

Пусть обобщенная оценка решения $x \in X$ формируется на основе порядкового оператора агрегирования в виде

$$F(W, f(x)) = \sum_{i=1}^p w_i \hat{f}_i(x),$$

где, $\hat{f}(x) = f(x) \downarrow$, $W = (w_1, \dots, w_p)$ – вектор весов, причем $\forall i = \overline{1, p}$ ($w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^p w_i = 1$).

Тогда справедливо включение

$$X(W) \subset P(X),$$

где, $X(W) = \{\arg \max_{x \in P(X)} F(W, f(x))\}$, $P(X)$ – множество оптимальных по Парето решений.

Доказательство. Зафиксируем вектор весов $W = \tilde{W}$, тогда функция $F(W^0, f(x))$ на множестве X достигает своего максимума, т.е. $\exists x^* \in X(\tilde{W})$.

Покажем, что решение является оптимальным по Парето, т.е. для любого другого решения $y \in X \setminus P(X)$ выполняется соотношение

$$\forall i = \overline{1, n} (f_i(x^*) \geq f_i(y)) \text{ и } \exists i_0 (f_{i_0}(x^*) > f_{i_0}(y)).$$

Предположим противное: решение x^* не является Парето-оптимальным, т.е. $x^* \notin P(X)$. Это означает, что существует решение $x' \in X(W)$ такое, что

$$\forall i (f_i(x^*) < f_i(x')).$$

Вычислив обобщенные оценки $F(\tilde{W}, f(x'))$ и $F(\tilde{W}, f(x^*))$ для решений x' и x^* , получим, что в силу монотонности порядкового оператора агрегирования, выполняется

$$F(\tilde{W}, f(x')) > F(\tilde{W}, f(x^*)),$$

что противоречит тому факту, что $x^* \in X(\tilde{W})$.

Таким образом, предположение не верно, и $x^* \in P(X)$. Теорема доказана.

В [1] сформулирована и доказана следующая Теорема 3. Пусть x^* – решение задачи (2) для некоторого вектора весов $\hat{W} = (\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_p)^T$, т.е. $x^* = \arg \max_{x \in P(x)} \sum_{i=1}^p \hat{w}_i f_i(x)$, тогда для всякого целого m x^* является решением задачи (3) с метрикой

$$P_{\hat{W}}^{(m)}(f(x), f(x^0)) = \left(\sum_{i=1}^p \hat{w}_i |f_i(x) - f_i(x^0)|^m \right)^{1/m}.$$

Доказательство. Доказательство существования метрики сводится к доказательству существования положительных коэффициентов \tilde{w}_i и чисел $m \in \mathbb{N}$.

В силу того, что оптимальная точка x^* , полученная при решении задачи (2), должна минимизировать некоторую метрику на Парето-множестве, имеет место система из m неравенств с p неизвестными $\tilde{w}_i, i = \overline{1, p}$:

$$\begin{cases} \rho(x^*, x^0) \leq \rho(x^k, x^0), \forall k = 1, m, \\ \tilde{w}_i > 0, i = \overline{1, p}. \end{cases} \quad (4)$$

Из совместности данной системы и следует существование метрики.

Следовательно, необходимо доказать совместность данной системы, и, тем самым будет доказана теорема. Запишем данную систему (4) более подробно:

$$\begin{cases} \tilde{w}_1 |x_1^* - x_1^0| + \dots + \tilde{w}_p |x_p^* - x_p^0| \leq \tilde{w}_1 |x_1^k - x_1^0| + \dots + \tilde{w}_p |x_p^k - x_p^0|, \forall k = 1, m, \\ \tilde{w}_i > 0, i = \overline{1, p}. \end{cases} \downarrow$$

$$\begin{cases} \tilde{w}_1 |x_1^* - x_1^0| + \dots + \tilde{w}_p |x_p^* - x_p^0| - \tilde{w}_1 |x_1^k - x_1^0| - \dots - \tilde{w}_p |x_p^k - x_p^0| \leq 0, \forall k = 1, m, \\ \tilde{w}_i > 0, i = \overline{1, p}. \end{cases} \downarrow$$

$$\begin{cases} \tilde{w}_1(|x_1^* - x_1^0| - |x_1^k - x_1^0|) + \dots + \tilde{w}_p(|x_p^* - x_p^0| - |x_p^k - x_p^0|) \leq 0, \forall k = \overline{1, m}, \\ \tilde{w}_i > 0, i = \overline{1, p}. \end{cases}$$

Так как x^0 – идеальная точка, то $x^* \leq x^0$ и $x^k \leq x^0$, и система (4) примет вид

$$\begin{cases} \tilde{w}_1(x_1^k - x_1^*) + \dots + \tilde{w}_p(x_p^k - x_p^*) \leq 0, \forall k = \overline{1, m}, \\ \tilde{w}_i > 0, i = \overline{1, p}. \end{cases}$$

Предположим, что данная система решений не имеет, т.е.

$$\bigcap_k \left\{ (w_1, \dots, w_p) : \sum_{i=1}^p \tilde{w}_i(x_i^k - x_i^*) > 0 \right\} \cap \left\{ (w_1, \dots, w_p) : w_1 > 0, \dots, w_p > 0 \right\} = \emptyset.$$

Тогда

$$\left\{ \bigcap_k \left\{ (w_1, \dots, w_p) : \sum_{i=1}^p \tilde{w}_i(x_i^k - x_i^*) > 0 \right\} \right\} \cap \left\{ (w_1, \dots, w_p) : w_1 > 0, \dots, w_p > 0 \right\} = R^n \setminus$$

$$= R^n$$

или же

$$\bigcup_k \left\{ (w_1, \dots, w_p) : \sum_{i=1}^p \tilde{w}_i(x_i^k - x_i^*) > 0 \right\} \cup \left\{ (w_1, \dots, w_p) : w_1 > 0, \dots, w_p > 0 \right\} = R^n,$$

из чего следует, что

$$\left\{ (w_1, \dots, w_p) : w_1 > 0, \dots, w_p > 0 \right\} \subseteq \bigcup_k \left\{ (w_1, \dots, w_p) : \sum_{i=1}^p \tilde{w}_i(x_i^k - x_i^*) > 0 \right\}.$$

Значит, совокупность неравенств

$$\tilde{w}_1(x_1^k - x_1^*) + \dots + \tilde{w}_p(x_p^k - x_p^*) \geq 0, \forall k = \overline{1, m}$$

выполняется для любого набора $w_1 > 0, \dots, w_p > 0$, в том числе и для набора $\alpha_1 > 0, \dots, \alpha_p > 0$.

Тогда,

$$\begin{aligned} \alpha_1(x_1^k - x_1^*) + \dots + \alpha_p(x_p^k - x_p^*) &\geq 0, \forall k = \overline{1, m} \rightarrow \\ \exists l = \overline{1, m} : \alpha_1 x_1^l + \dots + \alpha_p x_p^l &> \alpha_1 x_1^* + \dots + \alpha_p x_p^*, \end{aligned}$$

что невозможно, т.к. точка (x_1^*, \dots, x_p^*) является точкой максимума линейной свертки. Фактически мы доказали, что набор $(\alpha_1, \dots, \alpha_p)$ является решением системы (4), что подтверждает ее совместность. Теорема доказана.

Обсуждение результатов. В работе [1] и в настоящей статье приведена и доказана теорема о Парето-оптимальности решения, максимизирующего обобщенный критерий, полученный на основе порядковых операций взвешенного агрегирования, которая обосновывает использование операций данного типа для решения задач векторной оптимизации или многокритериального выбора.

Теорема о существовании аддитивной свертки для метрики верна только в частном случае и основана на теореме Карлина, согласно которой подмножество точек Парето-множества максимизирует некоторую аддитивную свертку.

Для задачи (например, при наличии двух критериев) теорему Карлина нужно понимать следующим образом: если каждые две соседние точки из некоторого подмножества $P' \subset P(X)$ можно соединить отрезками так, что полученная ломаная вместе с осями координат ограничивает выпуклое множество, то любая из этих точек максимизирует некоторую аддитивную свертку.

Из доказательства утверждения следует, что в случае метрики со значением $m = 1$ аддитивная свертка существует всегда.

Также стоит отметить, что обратное верно не всегда: можно привести пример, показывающий, что точка, минимизирующая некоторую метрику, не всегда максимизирует аддитивную свертку.

Вывод. В статье рассматривается связь между множеством Парето и множеством выбора, которое включает решения, максимизирующие некоторую функцию агрегирования.

Сформулировано и доказано утверждение о взаимосвязи параметров функции расстояния в методе целевого программирования и весовых коэффициентов аддитивной свертки, которая обеспечивает эквивалентность оптимальных решений по Парето.

Библиографический список:

1. Аристова Е.М. Учет взаимодействия между целевыми функциями и их агрегирование в задачах оптимизации: дис. канд. физ.-мат. наук. – Воронеж, 2012. – 152 с.
2. Ашманов С.А. Теория оптимизации в задачах и упражнениях / С.А. Ашманов, А.В.Тимохов. – М.: Лань, 2012. – 448 с.
3. Зайцев М.Г. Методы оптимизации, управления и принятия решений. Примеры, задачи, кейсы. Учебное пособие / М.Г. Зайцев, С.Е. Варюхин. – М.:РАНХиГС, 2015. – 640 с.
4. Карманов В.Г. Математическое программирование / В.Г. Карманов. – М.: Физматлит, 2004. – 263 с.
5. Струченков В.И. Прикладные задачи оптимизации. Модели, методы, алгоритмы / В.И. Струченков. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 314 с.
6. Кравченко Т.К. Системы поддержки принятия решений / Т.К. Кравченко, Д.В. Исаев. – М.: Юрайт, 2017. – 292 с.
7. Леденева Т. М. Модели и методы принятия решений: учебное пособие / Т. М. Леденева. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – 189 с.
8. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях / В.Д. Ногин. – СПб.: Издательство ЮТАС, 2007. – 104 с.
9. Орлов А.И. Теория принятия решений / А.И. Орлов. – М.: Экзамен, 2006. – 573 с.
10. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев / В.В. Подиновский. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.
11. Трофимова Л.А. Методы принятия управленческих решений: учебник для бакалавров / Л.А. Трофимова, В.В. Трофимов. – М.: Юрайт, 2013. – 335 с.
12. Аристова Е.М. Упрощение задачи линейной многокритериальной оптимизации с помощью метода агрегирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Системный анализ и информационные технологии. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. – №2. – С.11-17.
13. Мелькумова Е.М. (Аристова, Е.М.) Один из подходов к решению задачи многокритериальной оптимизации // Вестник ВГУ. Серия Системный анализ и информационные технологии / Е.М. Мелькумова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2010. – №2. – С. 39-42.
14. Баева Н.Б. Основы теории и вычислительные схемы векторной оптимизации. Учебное пособие / Н.Б. Баева, Ю.В. Бондаренко. – Воронеж: Издательство ВГУ, 2003. – 86 с.
15. Carlsson C. Multiple Criteria Decision Making: The Case for Interdependence / C. Carlsson, R. Fuller // Computers and Operations Research. – №22. – 1995. – pp. 251-260.
16. Sakawa M., Nishizaki I., Katagiri H. Fuzzy stochastic multiobjective programming. New York, NY: Springer; 2011. № XII. 264.
17. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 250 с.

18. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации / В.В. Хоменюк. – М.: Наука, 1983. – 124 с.
19. Torra V. Modeling Decisions: Information Fusion and Aggregation Operators / V. Torra V, Y. Narukawa. – Springer: Berlin, 2007. – 284 p.
20. Liu X. The solution equivalence of minimax disparity and minimum variance problems for OWA operators / X. Lui // International Journal of Approximate Reasoning. – 2007. – №45. – PP. 68-81.
21. Юдин Д.Б. Линейное программирование. Теория, методы и приложения / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: Красанд, 2012. – 424 с.

References:

1. Aristova E.M. Uchet vzaimodeystviya mezhdru tselevymi funktsiyami i ikh agregirovanie v zadachakh optimizatsii. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Voronezh; 2012. 152 s. [Aristova E.M. Considering the interaction between target fuctions and their aggregation in optimisation problems. Dissertation of a PhD degree in Physics and Mathematical Sciences. Voronezh; 2012. 152 p. (in Russ.)]
2. Ashmanov S.A., Timokhov A.V. Teoriya optimizatsii v zadachakh i uprazhneniyakh. M.: Lan'; 2012. 448 s. [Ashmanov S.A., Timokhov A.V. Optimisation theory in tests and exercises. Moscow: Lan'; 2012. 448 s. (in Russ.)]
3. Zaytsev M.G., Varyukhin S.E. Metody optimizatsii, upravleniya i prinyatiya resheniy. Primery, zadachi, keysy. Uchebnoe posobie. M.: RANKhiGS; 2015. 640 s. [Zaytsev M.G., Varyukhin S.E. Methods of optimisation, control and decision-making. Examples, tests, cases. Tutorial. Moscow: RANKhiGS; 2015. 640 p. (in Russ.)]
4. Karmanov V.G. Matematicheskoe programmirovaniye. M.: Fizmatlit; 2004. 263 s. [Karmanov V.G. mathematical programming. Moscow: Fizmatlit; 2004. 263 p. (in Russ.)]
5. Struchenkov V.I. Prikladnye zadachi optimizatsii. Modeli, metody, algoritmy. M.: Solon-Press; 2016. 314 s. [Struchenkov V.I. Applied tasks of optimisation. Models, methods, algorithms. Moscow: Solon-Press; 2016. 314 p. (in Russ.)]
6. Kravchenko T.K., Isaev D.V. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy. M.: Yurayt; 2017. 292 s. [Kravchenko T.K., Isaev D.V. Decision-making support systems. Moscow: Yurayt; 2017. 292 s. (in Russ.)]
7. Ledeneva T.M. Modeli i metody prinyatiya resheniy: uchebnoe posobie. Voronezh: VGTU; 2004. 189 s. [Ledeneva T.M. Models and methods of decision-making: a tutorial. Voronezh: VGTU; 2004. 189 p. (in Russ.)]
8. Nogin V.D. Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh. SPb.: Izdatel'stvo YuTAS; 2007. 104 s. [Nogin V.D. Decision-making with multiple criteria. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo YuTAS; 2007. 104 p. (in Russ.)]
9. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy. M.: Ekzamen; 2006. 573 s. [Orlov A.I. Theory of decision-making. Moscow: Ekzamen; 2006. 573 p. (in Russ.)]
10. Podinovskiy V.V. Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev. M.: Fizmatlit; 2007. 64 s. [Podinovskiy V.V. Introduction to criteria importance theory. Moscow: Fizmatlit; 2007. 64 p. (in Russ.)]
11. Trofimova L.A., Trofimov V.V. Metody prinyatiya upravlencheskikh resheniy: uchebnyk dlya bakalavrov. M.: Yurayt; 2013. 335 s. [Trofimova L.A., Trofimov V.V. The methods of managerial decision-making: a tutorial for batchelors. Moscow: Yurayt; 2013. 335 p. (in Russ.)]
12. Aristova E.M. Uproshchenie zadachi lineynoy mnogokriterial'noy optimizatsii s pomoshch'yu metoda agregirovaniya. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii. 2012;2:11-17. [Aristova E.M. The simplification of linear multiple criteria optimisation problem using aggregation method. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies. 2012;2:11-17. (in Russ.)]
13. Mel'kumova E.M. (Aristova E.M.) Odin iz podkhodov k resheniyu zadachi mnogokriterial'noy optimizatsii. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii. 2010;2:39-42. [Mel'kumova E.M. (Aristova E.M.). One of the approaches to the solution of multiple criteria optimisation problem. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies. 2010;2:39-42. (in Russ.)]
14. Baeva N.B., Bondarenko Yu.V. Osnovy teorii i vychislitel'nye skhemy vektornoy optimizatsii. Uchebnoe posobie. Voronezh: Izdatel'stvo VGU; 2003. 86 s. [Baeva N.B., Bondarenko Yu.V. Theory

- fundamentals and calculation schemes of vector optimisation. A tutorial. Voronezh: Izdatel'stvo VGU; 2003. 86 p. (in Russ.)
15. Carlsson C., Fuller R. Multiple criteria decision making: The Case for Interdependence. *Computers and Operations Research*. 1995;22:251-260.
 16. Sakawa M., Nishizaki I., Katagiri H. *Fuzzy stochastic multiobjective programming*. New York, NY: Springer; 2011. № XII. 264 p.
 17. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach. M.: Nauka; 1982. 250 s. [Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal solutions of multiple criteria problems. Moscow: Nauka; 1982. 250 p. (in Russ.)]
 18. Khomenyuk V.V. Elementy teorii mnogotselevoy optimizatsii. M.: Nauka; 1983. 124 s. [Khomenyuk V.V. Elements of multi-objective optimisation theory. Moscow: Nauka; 1983. 124 p. (in Russ.)]
 19. Torra V., Narukawa Y. *Modeling Decisions: Information Fusion and Aggregation Operators*. Springer: Berlin; 2007. 284 p.
 20. Liu X. The solution equivalence of minimax disparity and minimum variance problems for OWA operators. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2007;45:68-81.
 21. Yudin D.B., Gol'shteyn E.G. Lineynoe programmirovaniye. Teoriya, metody i prilozheniya. M.: Krasand; 2012. 424 s. [Yudin D.B., Gol'shteyn E.G. Linear programming. Theory, methods and applications. Moscow: Krasand; 2012. 424 s. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Аристова Екатерина Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the author:

Ekaterina M. Aristova – Cand. Sci.(Physics and Mathematical), Assoc.Prof.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 15.05.2017.

Received 15.05.2017.

Принята в печать 26.06.2017.

Accepted for publication 26.06.2017.

Для цитирования: 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

For citation: 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. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА

Асланов Т.Г.

Дагестанский государственный технический университет
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, д.70, Россия,
e-mail: tabasik@gmail.com

Резюме. Цель. Целью исследования является определение гипоцентра землетрясения с одновременным использованием для расчетов методов сфер и гиперболоидов, с обеспечением минимально возможной ошибки, за счет соответствующего выбора сейсмодатчиков. **Метод.** Приводится метод определения гипоцентра землетрясения, с использованием для расчетов методов сфер и гиперболоидов, что позволяет минимизировать ошибку, за счет соответствующего выбора сейсмодатчиков. При этом исходим из того, что геометрическим местом точек пересечения гиперболоида и сферы, при условии размещения фокуса гиперболоида и центра сферы на одной прямой, является окружность. **Результат.** Для нахождения координат очага землетрясения необходимо использовать данные третьего сейсмодатчика, который не должен находиться на одной прямой с первыми двумя. Если третий сейсмодатчик определяет расстояние до очага землетрясения по разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн, то геометрическим местом положения очага землетрясения будет сфера. Точка пересечения этой сферы с вышеупомянутой окружностью и является очагом землетрясения. При нахождении зависимости ошибки в определении гипоцентра землетрясения от взаимного расположения двух сейсмодатчиков, предлагается в расчетах использовать значения скоростей продольной и поперечной сейсмических волн, разности времен пробега этих волн на сейсмодатчики, и разность времен пробега продольной сейсмической волны к двум разнесенным сейсмодатчикам. По двум приведенным методам можно определить направленность ошибок в определении расстояния от очага землетрясения до сейсмодатчика. Для этого находится расстояние Δ между эпицентрами землетрясений, вычисленных по комбинированному методу (с использованием сфер и гиперболоидов) и по методу сфер. Это же расстояние ∇ определяется после добавления преднамеренной ошибки ∇t к разностям времён пробега сейсмических волн $\Delta t + \nabla t$. По значению разности $\Delta - \nabla$ делается вывод о направленности ошибки. **Вывод.** Используя методы сфер, и метод сфер и гиперболоидов можно определить направленность ошибок. Метод при разнонаправленных ошибках измерения расстояний до очага, имеет меньшие ошибки в определении координат очага по сравнению с приведенным в работе методом сфер, но в тоже время при сонаправленных ошибках – наоборот, ошибки возникающие при использовании комбинированного метода выше.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмодатчик, окружность, гипербола, ошибка, уравнение

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

DEFINITION OF EARTHQUAKE FOCUS COORDINATES USING
A COMBINED METHOD

Tagirbek G. Aslanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: tabasik@gmail.com

Abstract Objectives The aim of the study is to determine earthquake hypocentres with the simultaneous use of both the sphere and hyperboloid methods of calculation, providing minimal possible error due to the appropriate choice of seismic sensors. **Methods** A method for determining the hypocentre of earthquakes is proposed that uses methods of spheres and hyperboloids for calculations making it possible to minimise error due to the appropriate choice of seismic sensors. In this case, we proceed from the fact that the circumference is the geometric position of the intersection points of the hyperboloid and the sphere, provided that the focus of the hyperboloid and the centre of the sphere are located on one straight line. **Results** In order to find the coordinates of the earthquake focus, it is necessary to use the data of the third seismic sensor, which should not lie on the same line with the first two. If the third seismic sensor determines the distance to the earthquake focus according to the difference in travel times of the longitudinal and transverse seismic waves, then the geometric location of the earthquake focus will be the sphere. The point of intersection of this sphere with the above-mentioned circumference is the earthquake focus. When locating the dependency of the earthquake hypocentre determination error in the relative location of the two seismic sensors, the values of the longitudinal and transverse seismic wave velocities, the difference in the travel times of these waves to the seismic sensors and the difference in the travel times of the longitudinal seismic wave to the two spaced seismic sensors are proposed for use in the calculations. Using the two methods listed above, it is possible to determine the error direction in determining the distance from the earthquake focus to the seismic sensor. For this purpose, the distance Δ is retrieved between the epicentres of earthquakes, calculated using the combined method (spheres and hyperboloids) and the sphere method. The same distance ∇ is determined after the addition of the deliberate error ∇t to the run time differences of the seismic waves $\Delta t + \nabla t$. The value of the $\Delta - \nabla$ difference leads to a conclusion concerning the direction of the error.

Conclusion The determination of the direction of errors is possible using the methods of spheres as well as the method of spheres and hyperboloids. The method having multidirectional errors in measuring the distances to the focus has fewer errors in determining its coordinates as compared to the method of spheres described in the work, while with co-directional errors, conversely, the errors arising when using the combined method are higher.

Keywords: earthquake, seismic sensor, circumference, hyperbola, error, equation

Введение. На сегодняшний день одним из наиболее часто используемых методов для определения координат очага землетрясения [1] является метод сфер [2-3]. По методу сфер определение координат очага производится по разности времен пробега продольной и поперечной волн [4-5] на разнесенные в пространстве сейсмодатчики [6]. При этом, поскольку поперечная волна не проходит через жидкости, приходится исключать из расчетов данные сейсмодатчиков, на пути распространения волн к которым располагаются водоемы или, например, залежи нефти [7-10].

В работе приводится метод определения гипоцентра землетрясения с одновременным использованием для расчетов методов сфер и гиперboloидов, с обеспечением минимально возможной ошибки, за счет соответствующего выбора сейсмодатчиков.

Постановка задачи. Для нахождения ошибок в определении гипоцентра землетрясения [11] в зависимости от взаимного расположения двух сейсмодатчиков, предлагается использовать значения скоростей продольной и поперечной сейсмических волн [12, 13], разности времен пробега этих волн на сейсмодатчики, и разность времен пробега продольной волны к двум сейсмодатчикам [14-16].

Зависимость ошибки в определении гипоцентра землетрясения от взаимного расположения сейсмодатчиков определяется по величине разности координат гипоцентров, вычисленных с учетом ошибок в определении разности времен пробега сейсмических волн на сейсмодатчики и без них [2].

Методы исследования. В работе [2] рассматриваются вопросы влияния взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения на ошибки определения координат эпицентра и гипоцентра [17]. Причем, в начале рассматриваются ошибки в определении гипоцентра в зависимости от перемещения одного из сейсмодатчиков на плоскости, проходящей через его начальное положение и неподвижные гипоцентр и другой сейсмодатчик, а после, и от результата пересечения фигур (сфер), соответствующих геометрическим местам положения гипоцентров землетрясения, определяемых по разностям времен пробега продольной и поперечной волн на сейсмостанции – окружности и третьего сейсмодатчика.

Координаты очага землетрясения могут быть вычислены с использованием комбинированного метода – сфер и гиперблоидов.

Геометрическим местом точек пересечения гиперблоида и сферы при условии размещения фокусов гиперблоида и сферы на одной прямой является окружность.

Для нахождения координат очага землетрясения необходимо использовать данные третьего сейсмодатчика, который не должен находиться на одной прямой с первыми двумя. Если третий сейсмодатчик определяет расстояние до очага землетрясения по разности времен пробега продольной и поперечной сейсмических волн, то геометрическим местом положения очага землетрясения будет сфера. Точка пересечения этой сферы с вышеупомянутой окружностью и является очагом землетрясения. Ошибки, возникающие при пересечении окружности со сферой, рассмотрены в работе [2].

Допустим, что сейсмодатчики 1 и 2 (рис.1) расположены в точках S_1 и S_2 .

Сейсмодатчик S_1 расположен на удалении R_1 от истинного очага землетрясения O_n .

Разность расстояний от истинного очага землетрясения до сейсмодатчиков равна $B - C = A$, и от расчетного местоположения очага землетрясения до сейсмодатчиков равна $B' - C' = A + \Delta_2$. O_p – расчетное местоположение очага землетрясения, с учетом ошибок Δ_1 в определении радиуса сферы и Δ_2 в определении разности расстояний.

Для удобства расчетов расположим сейсмодатчик S_1 в начале координат, и примем его за опорный.

Расстояние от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения по разности времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам, может быть вычислено по уравнению гиперболы в полярных координатах [18]:

$$R = \frac{X_2^2 - (t_r V_1)^2}{2t_r V_1 + 2X_2 \cos \varphi'} \quad (1)$$

В то же время расстояние от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения может быть вычислено по формуле:

$$R = \frac{V_1 V_2 t_1}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

где, V_2 – скорость распространения поперечной волны;

t_1 – разность времен прихода продольной и поперечной волн на опорный сейсмодатчик.

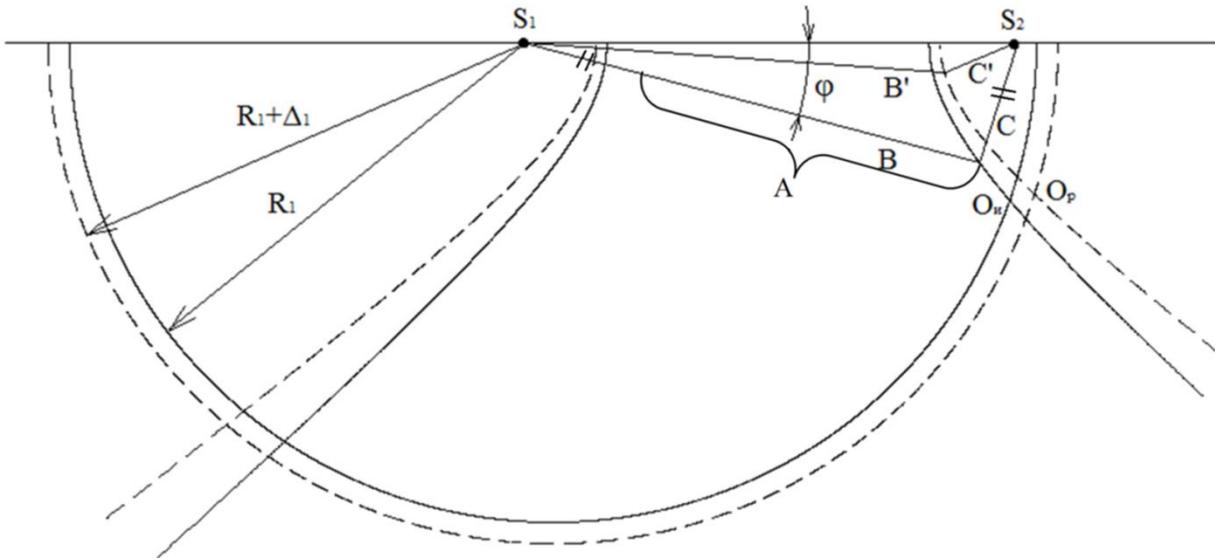


Рис. 1 Взаимное расположение сейсмоматчиков и очага землетрясения на вертикальной плоскости

Fig. 1 Mutual arrangement of seismic sensors and earthquake focus on the vertical plane

где, X_2 – расстояние от опорного до второго сейсмоматчика;

t_r – разность времен прихода продольной сейсмической волны к двум сейсмоматчикам;

V_1 – скорость распространения продольной волны;

φ – полярный угол, образующийся от отрезка между опорным и вторым сейсмоматчиком с началом координат в расположении опорного сейсмоматчика.

Подставляя R из уравнения (1) в уравнение (2) получим:

$$\frac{X_2^2 - (t_r V_1)^2}{2t_r V_1 + 2X_2 \cos \varphi} = \frac{V_1 V_2 t_1}{V_1 - V_2},$$

откуда:

$$\cos \varphi = \frac{X_2^2 (V_1 - V_2) - (t_r V_1)^2 (V_1 - V_2) - 2t_r V_1^2 V_2 t_1}{2V_1 V_2 t_1 X_2}. \quad (3)$$

Для проведения сравнительного анализа ошибок в определении координат гипоцентра с результатами, полученными в работе [2], запишем уравнение (3) в декартовой системе координат. Абсцисса гипоцентра землетрясения может быть найдена как произведение правых частей уравнений (3) и (2), т.е.

$$X = R \cos \varphi = \frac{X_2^2 (V_1 - V_2) - t_r^2 V_1^3 + t_r^2 V_1^2 V_2 - 2t_r V_1^2 V_2 t_1}{2X_2 (V_1 - V_2)}. \quad (4)$$

Ордината очага землетрясения может быть вычислена по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 - X^2}. \quad (5)$$

Пусть из-за временных ошибок Δt в показаниях сейсмоматчиков имеет место увеличение расстояния до очага землетрясения, тогда эпицентр землетрясения может быть вычислен по формуле:

$$X^* = \frac{X_2^2 (V_1 - V_2) - (t_r + \Delta t_2)^2 (V_1^3 + V_1^2 V_2) - 2(t_r + \Delta t_2) V_1^2 V_2 (t_1 + \Delta t_1)}{2X_2 (V_1 - V_2)}. \quad (6)$$

В то же время глубина очага землетрясения вычисляется по формуле:

$$Z^* = \sqrt{R^{*2} - X^{*2}}. \quad (7)$$

Вычтя из уравнения (6) уравнение (4) получим выражение для определения ошибки при нахождении эпицентра землетрясения,

$$\Delta X = \left| \Delta t_1 V_1^2 \frac{\Delta t_1 (V_2 + V_1) + 2t_r V_1 + 2V_2 \Delta t_2}{2X_2 (V_1 - V_2)} \right|. \quad (8)$$

Вычтя из уравнения (7) уравнение (5) получим выражение для определения ошибки при нахождении глубины очага землетрясения,

$$\Delta Z = \left| \sqrt{R^2 - X^2} - \sqrt{R^{*2} - X^{*2}} \right|. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены результаты моделирования в среде MatLab уравнений (8) и (9).

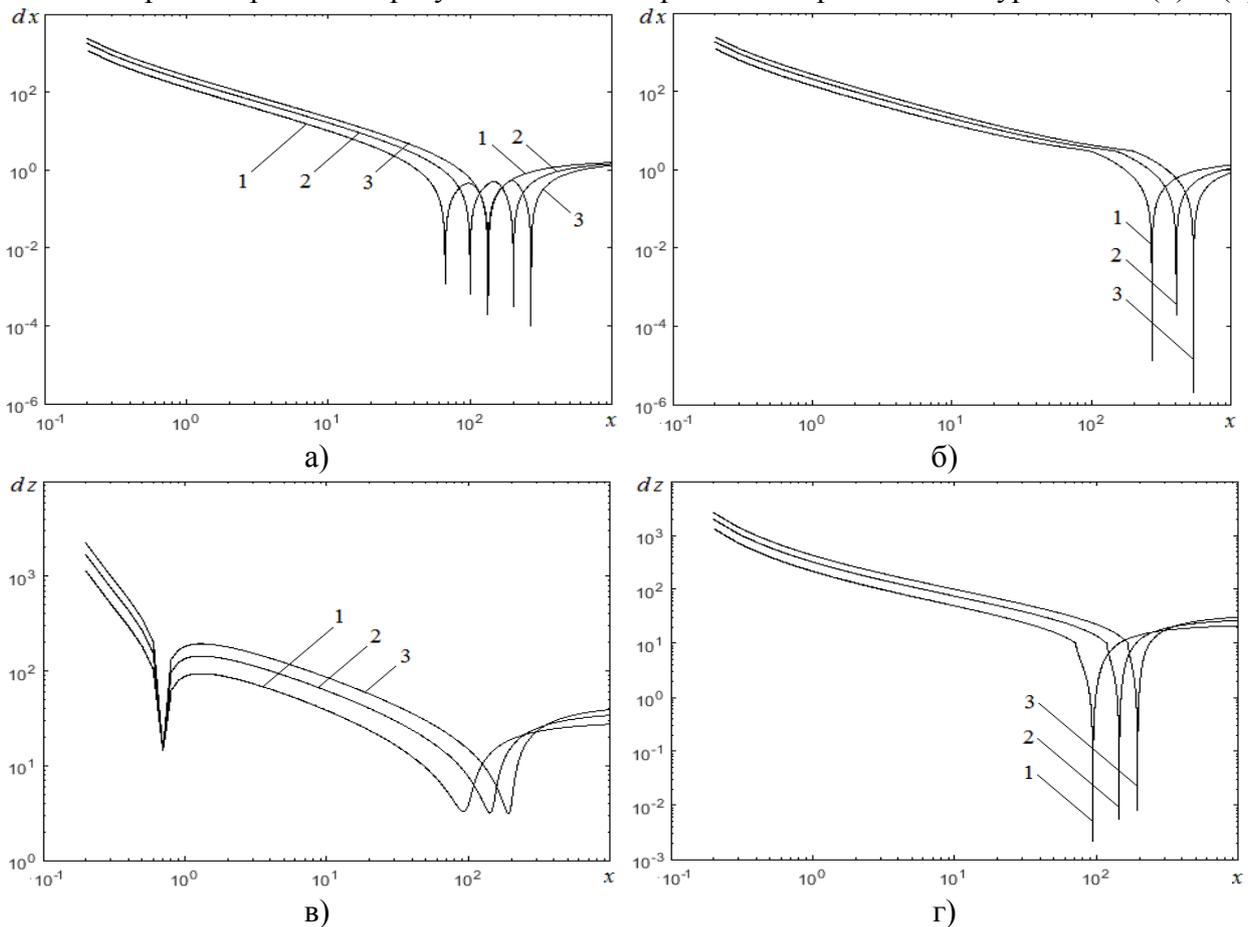


Рис.2. Ошибки в определении координат очага землетрясения в плоскости
Fig. 2. Errors in determining the coordinates of the earthquake focus in the plane

Рисунки а) и в) соответствуют случаям, когда знаки ошибок измерений сейсмодатчиков противоположны, а рисунки б) и г) когда ошибки приводят к увеличению расстояния от сейсмодатчиков до очага землетрясения. При моделировании ошибка измерения разности времен пробега сейсмических волн была принята равной 0,5 с.

Кривые 1, 2 и 3 соответствуют удалениям эпицентра землетрясения от опорного сейсмодатчика на расстояния 100, 150 и 200 км, соответственно. При этом, глубина очага землетрясения принята равной 10 км.

Рисунки 2а и 2б, а также рисунки 2а и 2б из работы [2] позволяют оценить направленность ошибки. Если найти расстояние между эпицентрами землетрясений, вычисленных по комбинированному методу и по методу окружностей приведенной в работе [2] – Δ , а далее определить это же расстояние после добавления преднамеренной ошибки в разности времен пробега сейсмических волн $\Delta t - \Delta_{\Delta t}$ то по значению разности $\Delta - \Delta_{\Delta t}$ можно судить о направленности ошибки (рис. 3).

На рис. 3 кривой 1 соответствует разность с приращением к разности времен прихода волны на 0,1 секунду для разнонаправленных ошибок, а кривой 2 для сонаправленных. Как видно из рисунка 3, от расстояния первого сейсмодатчика до эпицентра землетрясения для сонаправленной ошибки, разность не меняется.

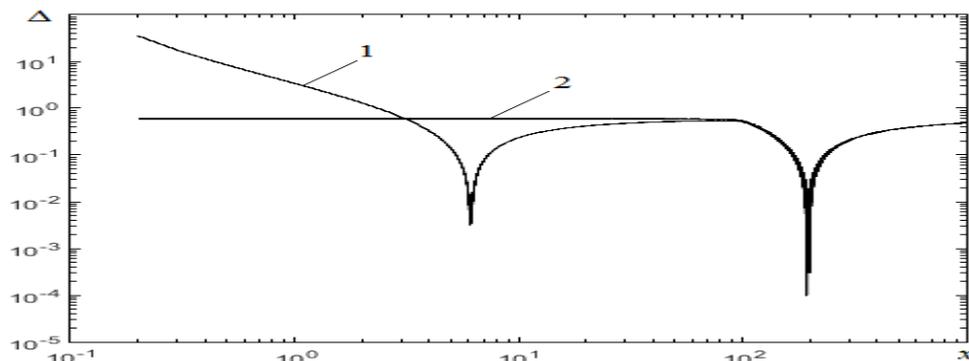


Рис. 3 Определение направленностей ошибок
Fig. 3 Definition of error directions

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы предложен метод определения координат очага комбинированным методом (окружностей и гипербол), а также получена зависимость ошибки определения глубины и гипоцентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения сейсмодатчиков.

Применение предложенного метода позволяет определять координаты очага землетрясения при отсутствии данных об одном из типов волн (продольной или поперечной). Предложенный метод может быть использован при выборе места расположения новых сейсмостанций в зависимости от места расположения существующих. Следует также отметить, что при решении задачи выбора сейсмодатчиков для определения координат очага землетрясения с меньшей ошибкой, задача решается методами комбинаторики, что может потребовать больших временных затрат. В связи с этим следует автоматизировать процесс выбора сейсмодатчиков.

Вывод. По результатам исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. По рисунку 2 – кривая зависимости ошибки от взаимного расположения двух сейсмодатчиков стремится к бесконечности в связи с малым расстоянием между ними. При этом происходит переход гиперболы в эллипс. Это приводит к тому, что из-за наличия в показаниях сейсмодатчиков в измерениях времен пробега сейсмических волн, эллипс и окружность не будут пересекаться, как и в случае двух окружностей в работе [2].

2. Используя методы сфер, и метод сфер и гиперболоидов можно определить направленность ошибок.

3. Рассмотренный в статье метод при разнонаправленных ошибках измерения расстояний до очага имеет меньшие ошибки в определении координат очага по сравнению с приведенным в работе [2] – методом сфер, но в тоже время при сонаправленных ошибках – наоборот, ошибки, возникающие при использовании комбинированного метода выше.

Библиографический список:

1. Shearer P.M. Introduction to Seismology. Cambridge University Press; 2009. 412 p.
2. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Магомедов Х.Д. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского

государственного технического университета. Технические науки. №4 (43), 2016 – Махачкала: ДГТУ, 2016. – С. 73-84.

3. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning/ S. D'Amico – InTech. Janeza Trdine, 2012. – 460 p.

4. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3

5. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.

6. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.

7. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.

8. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие / Т.Б. Яновская – Санкт-Петербург, 2008. - 222 с.

9. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография/ О.В. Мкртычев — М.: МГСУ, 2010.— 152 с.

10. 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.

11. Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров далеких землетрясений / Вулканология и сейсмология – 1994 – С. 68-79

12. 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.

13. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.

14. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton, New Jersey: Princeton University Press; 1949. 284 p.

15. 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

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

17. D'Amico S. (Ed.) Earthquake Research and Analysis - Seismotectonic and Earthquake Geology / S. D'Amico – InTech. Janeza Trdine, 2012. – 370 p.

18. Казаков А.Я., Жихарева А.А. Аналитическая геометрия [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Казаков А.Я. – Электронное учебное пособие для вузов, 2014. – 47 с. – Режим доступа: http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – ЭБС СПГУТД (Дата обращения: 20.08.2016)

References:

1. Shearer P.M. Introduction to Seismology. Cambridge University Press; 2009. 412 p.

2. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Magomedov Kh.D. Vliyanie prostranstvennogo raspolozheniya seysmodatchikov na tochnost' opredeleniya gipotsentra zemletryaseniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;4(43):73-84. [Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu., Magomedov Kh.D. Influence of seismic sensor spatial configuration onto earthquake hypocenter definition accuracy. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;4(43):73-84. (in Russ.)]

3. D'Amico S. (Ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning. InTech; 2012. 460 p.

4. Robert Garotta. Poperechnye volny: ot registratsii do interpretatsii. Kratkiy kurs lektsiy dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya №3. 2000. [Robert Garotta. Transversal waves: from registration to interpretation. Short lecture course for Higher Education Institutions. Series №3. 2000. (in Russ.)]

5. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory. University of Utah; 2007. 154 p.

6. Kasahara K. Earthquake mechanics. Cambridge University Press; 1981. 272 p.

7. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media. Australian National University Press; 2009. 298 p.
8. Yanovskaya T.B. Osnovy seysmologii: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg; 2008. 222 s. [Yanovskaya T.B. Seismology fundamentals: a tutorial. Saint-Petersburg; 2008. 222 p. (in Russ.)]
9. Mkrtychev O.V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri seysmicheskikh i avariynykh vozdeystviyakh. M.: MGSU; 2010. 152 s. [Mkrtychev O.V. Safety of buildings and constructions during seismic and emergency impacts. Moscow: MGSU; 2010. 152 p. (in Russ.)]
10. Shakhriyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoe modelirovanie kak sposob podderzhki prinyatiya resheniy v sluchae vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy. Katalog «Pozharnaya bezopasnost'»; 2003. S. 240-241. [Shakhriyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a method of decision-making support in case of emergency situation arising. Catalogue "Fire safety"; 2003. P. 240-241. (in Russ.)]
11. Burmin V.Yu. Novyy podkhod k opredeleniyu parametrov gipotsentrov dalekikh zemletryaseniy. Vulkanologiya i seysmologiya. 1994;1:68-79. [Burmin V.Yu. A new approach for the determination of remote earthquake hypocenter parameters. Vulcanology and seismology. 1994;1:68-79. (in Russ.)]
12. Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniem skorostey seysmicheskikh voln. Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN, Materialy. Makhachkala: Izdatelstvo DNTs RAN; 2010. 54-59. [Aslanov T.G., Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K. About the method of seismic center determination with simultaneous definition of speeds of seismic waves. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Makhachkala: DSCRAS Publ.; 2010. 54-59. (In Russ.)]
13. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
14. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton, New Jersey: Princeton University Press; 1949. 284 p.
15. Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Rukovodstvo po proizvodstvu i obrabotke nablyudeniya na seysmicheskikh stantsiyakh SSSR. Akad. nauk SSSR. Sovet po seysmologii. Moskva: Izd-vo Akad. nauk SSSR; 1954. [Arkhangel'skiy V.T., Vedenskaya I.A., Gayskiy V.N. Observation performance and processing guide on the seismic stations of USSR. USSR Academy of Sciences. Seismology Board. Moscow: Izd-vo Akad. nauk SSSR; 1954. (in Russ.)]
16. 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.)]
17. D'Amico S. (Ed.) Earthquake Research and Analysis - Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology. InTech; 2012. 370 p.
18. Kazakov A.Ya., Zhikhareva A.A. Analiticheskaya geometriya [Elektronnyy resurs]: Elektronnoe uchebnoe posobie dlya vuzov; 2014. 47 s. Rezhim dostupa: http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – EBS SPGUTD (Data obrashcheniya: 20.08.2016). [Kazakov A.Ya., Zhikhareva A.A. Analytical geometry [Electronic resource]: Electronic tutorial for Higher Education Institutions; 2014. 47 p. Available at: http://publish.sutd.ru/e_books/analit_geometr_2014/glava/anal_geom.pdf – EBS SPGUTD (Access date: 20.08.2016). (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, докторант кафедры «Управление и информатика в технических системах и вычислительной техники».

Information about the author:

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

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 10.06.2017.

Received 10.06.2017.

Принята в печать 27.06.2017.

Accepted for publication 27.06.2017.

Для цитирования: Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в прямых плоских каналах, а также в прямых круглых трубах с шероховатыми стенками при симметричном подводе теплоты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):126-141. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-126-141

For citation: Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat exchange in direct flat channels and direct round pipes with rough walls under the symmetric heat supply. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2):126-141. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-126-141

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-126-141

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПРЯМЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛАХ, А ТАКЖЕ В ПРЯМЫХ КРУГЛЫХ ТРУБАХ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ

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 плоских каналах с симметричным обогревом и круглых трубах с шероховатыми стенками. **Метод.** Расчет проводился методом Лопиталья-Бернулли. Решение задачи об интенсифицированном теплообмене в круглой трубе с шероховатыми стенками получено с помощью интеграла Лайона. **Результат.** В статье разработана методика теоретического расчётного детерминирования теплообмена для плоских шероховатых каналов и круглых труб с шероховатыми стенками на основе принципа суперпозиции полной вязкости в турбулентном пограничном слое, преимущественно отличающаяся от существующих теорий. Анализ полученных расчётных значений теплообмена и гидросопротивления для плоских шероховатых каналов и круглых шероховатых труб показывает, что повышение теплообмена всегда меньше, чем соответствующее повышение гидравлического сопротивления, что является недостатком по сравнению с каналами с турбулизаторами при прочих равных условиях. Результаты расчёта теплообмена для каналов с шероховатыми стенками для расширенного диапазона определяющих параметров, существенным образом отличающиеся от соответствующих данных для каналов с турбулизаторами, определяют уровень интенсификации теплообмена. **Вывод.** Увеличение расчётных значений относительного осреднённого теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ для плоских шероховатых каналов и шероховатых труб с очень большими значениями относительной шероховатости дает как увеличение относительной высоты шероховатости h/R_0 , так и увеличение числа Рейнольдса Re . Главное преимущество решений для осреднённого теплообмена для шероховатых плоских каналов с симметричным тепловым нагружением и круглых труб, 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. Полученные расчётные данные по осреднённому теплообмену показали, что в рассматриваемом диапазоне определяющих параметров для плоских шероховатых каналов с симметричным тепловым нагружением, при прочих равных условиях, осреднённый теплообмен выше на $(4,8 \div 11,7)\%$ по сравнению с круглыми шероховатыми трубами.

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

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN DIRECT FLAT CHANNELS
AND DIRECT ROUND PIPES WITH ROUGH WALLS UNDER THE SYMMETRIC HEAT
SUPPLY

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 present work was to carry out mathematical modelling of heat transfer with symmetrical heating in flat channels and round pipes with rough walls. **Methods** The calculation was carried out using the L'Hôpital-Bernoulli's method. The solution of the problem of intensified heat transfer in a round tube with rough walls was obtained using the Lyon's integral. **Results** Different from existing theories, a methodology of theoretical computational heat transfer determination for flat rough channels and round pipes with rough walls is developed on the basis of the principle of full viscosity superposition in a turbulent boundary layer. The analysis of the calculated heat transfer and hydroresistivity values for flat rough channels and round rough pipes shows that the increase in heat transfer is always less than the corresponding increase in hydraulic resistance, which is a disadvantage as compared to channels with turbulators, with all else being equal. The results of calculating the heat transfer for channels with rough walls in an extended range of determinant parameters, which differ significantly from the corresponding data for the channels with turbulators, determine the level of heat exchange intensification. **Conclusion** An increase in the calculated values of the relative average heat transfer Nu/Nu_{GL} for flat rough channels and rough pipes with very high values of the relative roughness is significantly contributed by both an increase in the relative roughness height and an increase in the Reynolds number Re . In comparison with empirical dependencies, the main advantage of solutions for averaged heat transfer in 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, 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 showed that in the range of determinant parameters for flat rough channels with symmetrical thermal loading, the average heat transfer is higher by (4.8÷11.7)% as compared to round rough pipes – all other things being equal.

Keywords: multilayer model, flat channel, round pipe, roughness, turbulence, modelling, heat exchange, turbulent, intensification, heating, heat supply, symmetric

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 могут 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.

Данная теория позволила получить более сложные, чем существующие, закономерности для числа Нуссельта для плоских шероховатых каналов с симметричным тепловым нагружением 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.

Постановка задачи. Математическое моделирование теплообмена в плоских каналах с симметричным обогревом и круглых трубах с шероховатыми стенками.

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 при изотермическом течении 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].

Косвенным подтверждением вышесказанного может служить предельный переход для плоского канала в формуле для гидравлического сопротивления кольцевого канала при $r_1/r_2 \rightarrow 1$ (r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы кольцевого канала соответственно), приведённой в [28]:

$$\frac{\xi_{\text{КОЛЬЦЕВОЙ}}}{\xi_{\text{ТРУБА}}} = \left(\frac{1 - r_1/r_2}{1 + \frac{1 - (r_1/r_2)^2}{\ln(r_1/r_2)^2}} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (1)$$

Определим коэффициент гидравлического сопротивления для плоского канала как:

$$\frac{\xi_{\text{ПЛОСКИЙ}}}{\xi_{\text{ТРУБА}}} = \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{\xi_{\text{КОЛЬЦЕВОЙ}}}{\xi_{\text{ТРУБА}}} \right). \quad (2)$$

В предельном переходе имеет место неопределённость, поэтому получим значение предела с помощью метода Лопиталья–Бернулли:

$$\begin{aligned} \frac{\xi_{\text{ПЛОСКИЙ}}}{\xi_{\text{ТРУБА}}} &= \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{1 - r_1/r_2}{1 + \frac{1 - (r_1/r_2)^2}{\ln(r_1/r_2)^2}} \right)^{\frac{5}{4}} = \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{\ln(r_1/r_2)^2 - (r_1/r_2)\ln(r_1/r_2)^2}{\ln(r_1/r_2)^2 + 1 - (r_1/r_2)^2} \right)^{\frac{5}{4}} = \\ &= \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{\frac{d}{d(r_1/r_2)} \ln(r_1/r_2)^2 - \frac{d}{d(r_1/r_2)} (r_1/r_2)\ln(r_1/r_2)^2}{\frac{d}{d(r_1/r_2)} \ln(r_1/r_2)^2 + \frac{d}{d(r_1/r_2)} (1 - (r_1/r_2)^2)} \right)^{\frac{5}{4}} = \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{\frac{2}{(r_1/r_2)} - (\ln(r_1/r_2)^2 + 2)}{\frac{2}{(r_1/r_2)} - 2(r_1/r_2)} \right)^{\frac{5}{4}} = \\ &= \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{\frac{d}{d(r_1/r_2)} \left(\frac{2}{(r_1/r_2)} - (\ln(r_1/r_2)^2 + 2) \right)}{\frac{d}{d(r_1/r_2)} \left(\frac{2}{(r_1/r_2)} - 2(r_1/r_2) \right)} \right)^{\frac{5}{4}} = \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{-\frac{2}{(r_1/r_2)^2} - \frac{2}{(r_1/r_2)}}{-\frac{2}{(r_1/r_2)^2} - 2} \right)^{\frac{5}{4}} = \\ &= \lim_{r_1/r_2 \rightarrow 1} \left(\frac{-2-2}{-2-2} \right)^{\frac{5}{4}} = 1. \quad (3) \end{aligned}$$

Последний результат полностью подтверждается расчётными и измеренными данными разных авторов, приведёнными в [28], для коэффициента сопротивления трения кольцевых и плоских каналов.

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 соответствующего интеграла для плоского канала при симметричном обогреве [17- 18]:

$$\text{Nu} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{\left(\int_0^R \frac{w_x}{w_x} dR \right)^2}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR - \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{\int_0^R \frac{w_x}{w_x} dR}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}, \quad (4)$$

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).

При принятии допущения $\frac{w}{w_x} \cong 1$, которое, как показывают теоретические исследования [2-6; 19-24] для каналов некруглого поперечного сечения с турбулизаторами, незначительно влияет на осреднённый интенсифицированный теплообмен, получим:

$$\text{Nu} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{R^2}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR - \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{R}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}, \quad (5)$$

Как видно из (5), решение для симметрично обогреваемого плоского канала отличается от «интеграла Лайона для плоского канала» [17- 18]:

$$\text{Nu} = \frac{2}{\int_0^1 \frac{R^2}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}. \quad (6)$$

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:

$$\text{Nu} = \frac{2}{\int_0^1 \frac{R^3}{1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{v_T}{v}} dR}, \quad (7)$$

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

Для получения решения относительно теплообмена, как для плоского канала с симметричным обогревом, так и круглой трубы с шероховатыми поверхностями, следует перейти к непосредственному рассмотрению параметров каждого из подслоев, поскольку они будут сходны при выбранных безразмерных координатах. Следует повториться, что для плоских каналов с шероховатыми поверхностями используется эквивалентный диаметр канала.

Непосредственно безразмерные параметры будут выглядеть следующим образом.

I. Вязкий (ламинарный) подслои.

Вязкий подслои 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]:

$$\frac{v_T}{v} = \beta \frac{\eta^3}{\eta_1^2} = \frac{\beta}{\eta_1^2} \text{Re}^3 (1-R)^3 \left(\frac{\xi}{32} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (8)$$

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:

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

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

$$\frac{v_T}{v} = \frac{\eta}{5} - 1 = \frac{\text{Re}}{5} (1-R) \sqrt{\frac{\xi}{32}} - 1. \quad (9)$$

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]:

$$\frac{v_T}{v} = \frac{\sum_i v_i}{v} = 1 + \frac{\text{Re}}{4} \sqrt{\frac{\xi}{2}} a(\bar{y} + \bar{h} - 2\bar{\delta}) \sqrt{(1-\bar{y})(1-k_0^2 \bar{y})}, \quad (10)$$

\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); δ — константа [11—13].

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

$$\frac{v_T}{v} = \frac{\sum_i v_i}{v} = 1 + \frac{\text{Re}}{4} \sqrt{\frac{\xi}{2}} a \left(1 - R + \bar{h} - \delta \frac{8}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} \right) \sqrt{R(1 - k_0^2(1 - R))}, \quad (11)$$

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:

$$\frac{v_T}{v} = \frac{\sum_i v_i}{v} = \left[1 - R + \bar{h} - \delta \frac{8}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} + \bar{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta \frac{4}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} - \bar{h}}{\bar{\sigma}} \right)^2 \right]}{1 - \text{erf} \left[\frac{\delta \frac{4}{\text{Re}} \sqrt{\frac{2}{\xi}} - \bar{h}}{\sqrt{2} \bar{\sigma}} \right]} \right] \sqrt{R(1 - k_0^2(1 - R))}. \quad (12)$$

В дальнейшем необходимо провести расчёты теплообмена для плоских каналов с симметричным обогревом и круглых труб с шероховатыми стенками по полученной в исследовании методике с использованием формул (5) и (7) совместно с соотношениями для подслоев (9), (10), (11) для различных относительных высот шероховатости и чисел Рейнольдса по эквивалентному диаметру канала.

Для сравнения необходимо привести 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 симметричным обогревом 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).

Из представленных данных видно, что увеличение теплообмена в круглых трубах вследствие шероховатости происходит определенно меньше, чем увеличение гидравлического сопротивления, что особенно заметно при больших числах Рейнольдса 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 ($\text{Re}=4 \cdot 10^4$) теплообмен в шероховатых трубах приблизительно равен теплообмену в трубах с турбулизаторами с большими относительными шагами между турбулизаторами ($\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{ГЛ}}=1,60; 1,45; 1,30$ для $t/D=0,25; 0,50; 1,00$ соответственно) при увеличении числа Рейнольдса до $\text{Re}=10^5$ теплообмен в шероховатых трубах приближается к теплообмену в трубах с турбулизаторами со средними относительными шагами между ними ($\text{Nu}/\text{Nu}_{\text{ГЛ}}=1,62; 1,48; 1,34$ для $t/D=0,25; 0,50; 1,00$ соответственно).

Таблица 1. Теплообмен на воздухе в плоских каналах с шероховатыми стенками с симметричным обогревом (нижние значения), а также в круглых шероховатых трубах (верхние значения), рассчитанный по формулам (5), (7)-(12) 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 with symmetric heating (lower values), as well as in round rough pipes (upper values) calculated according to formulas (5), (7) - (12) for relative heights turbulence $h/R_0=1/70$ и $h/R_0=1/50$

$h/R_0 \downarrow$	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
$1/70=$ $=1,43 \cdot 10^{-2}$	теоретическое решение	113,98	167,05	219,58	271,87	2509,00	22124,58
	Nu/Nu _{ГЛ}	1,18	1,25	1,30	1,35	1,97	2,76
		1,27	1,33	1,39	1,44	2,10	2,93
$1/50=$ $=2,00 \cdot 10^{-2}$	теоретическое решение	124,04	181,74	239,12	296,40	2705,26	27015,57
	Nu/Nu _{ГЛ}	1,28	1,36	1,42	1,47	2,13	3,36
		1,37	1,45	1,52	1,57	2,27	3,59

Из табл. 1 также видно, что теплообмен в плоских каналах с симметричным обогревом с шероховатыми стенками для этих условий, рассчитанный по интегральному соотношению (5), больше примерно на $(6,2 \div 7,6)\%$, чем в шероховатых трубах при прочих равных условиях, в то время как для гладких каналов вышеуказанное увеличение общеизвестно и составляет для воздуха при $Re=5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ — $(6,1 \div 3,5)\%$ [1,11-14, 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 $((Nu/Nu_{ГЛ})/(\xi/\xi_{ГЛ})=0,58 \div 0,84)$. В таблице 2 приводятся соответствующие данные и для плоских шероховатых каналов с симметричным тепловым нагружением, для которых соотношение между теплообменом и гидросопротивлением повышенные по отношению к круглой трубе $((Nu/Nu_{ГЛ})/(\xi/\xi_{ГЛ})=0,63 \div 0,91)$.

Соответствующие данные для условий табл. 1 составили $(Nu/Nu_{ГЛ})/(\xi/\xi_{ГЛ})=0,64 \div 0,81$, а для условий табл. 2 для плоских каналов с симметричным тепловым нагружением составили $(Nu/Nu_{ГЛ})/(\xi/\xi_{ГЛ})=0,68 \div 0,87$, что на $(4 \div 6)\%$ больше, чем для аналогичных данных для шероховатых труб.

Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми поверхностями с симметричным тепловым нагружением при прочих равных условиях для $h/R_0=1/15; 1/30,6; 1/60; 1/126; 1/252; 1/507$ увеличивается по отношению к круглым трубам с шероховатыми стенками на $(4,8 \div 11,7)\%$ (табл. 2), что также больше, чем аналогичное значение увеличения для гладких плоских каналов.

В дальнейшем необходимо провести расчёты теплообмена для плоских каналов с шероховатыми поверхностями при симметричном тепловом нагружении и шероховатых труб, полученные по зависимостям (5), (7)–(12), для очень больших значений относительных высот шероховатости: $h/R_0=0,15 \div 0,30$.

Таблица 2. Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми стенками с симметричным обогревом (нижние значения) и в круглых шероховатых трубах (верхние значения) на воздухе в зависимости от числа Рейнольдса, рассчитанный теоретически на основании решений (5), (7)-(12) для широкого диапазона относительных высот турбулизаторов
Table 2. Heat transfer in planar channels with rough walls with symmetrical heating (lower values) and in round rough pipes (upper values) in air, depending on the Reynolds number, calculated theoretically on the basis of solutions (5), (7) - (12) 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	—	—	—	—	—	—	—	434,01 482,51	650,97 707,80	1020,08 1075,31	1599,58 1684,51
	относительное	—	—	—	—	—	—	—	1,03 1,15	1,07 1,16	1,16 1,22	1,26 1,32
3,97× ×10 ⁻³	абсолютное	—	—	—	—	—	—	310,79 336,02	485,95 514,85	759,90 803,94	1191,49 1259,37	1873,53 1978,98
	относительное	—	—	—	—	—	—	1,07 1,15	1,15 1,22	1,25 1,32	1,35 1,43	1,47 1,56
7,94× ×10 ⁻³	абсолютное	—	—	—	—	—	235,27 250,72	366,26 389,55	572,24 607,83	897,44 952,41	1411,90 1497,51	2221,23 2354,99
	относительное	—	—	—	—	—	1,17 1,24	1,26 1,34	1,36 1,44	1,47 1,56	1,60 1,70	1,75 1,85
1,67× ×10 ⁻²	абсолютное	—	—	—	117,99 126,59	182,05 194,81	282,71 301,97	441,59 471,10	692,91 738,63	1090,78 1162,16	1681,95 1791,41	2595,86 2764,23
	относительное	—	—	—	1,22 1,31	1,30 1,40	1,40 1,50	1,51 1,62	1,64 1,75	1,79 1,91	1,91 2,03	2,04 2,17
3,27× ×10 ⁻²	абсолютное	—	60,10 64,99	91,13 98,13	139,79 150,23	216,55 232,14	337,90 361,80	530,05 567,11	823,39 880,52	1271,93 1359,78	1957,73 2092,56	3040,21 3249,17
	относительное	—	1,30 1,41	1,36 1,47	1,45 1,56	1,55 1,66	1,68 1,79	1,82 1,95	1,95 2,09	2,09 2,23	2,22 2,38	2,39 2,55
6,67× ×10 ⁻²	абсолютное	47,66 51,67	71,33 76,98	108,93 117,22	168,27 180,76	262,22 281,94	408,52 438,04	631,68 677,03	978,02 1047,94	1515,52 1623,59	2350,09 2517,40	3646,15 3905,46
	относительное	1,49 1,62	1,54 1,67	1,63 1,76	1,74 1,87	1,88 2,02	2,03 2,17	2,17 2,32	2,32 2,49	2,49 2,67	2,67 2,86	2,87 3,07
0	Диттус—Бозлтер	31,96	46,20	66,78	96,53	139,53	201,68	291,51	421,37	609,06	880,36	1272,51

В таблице 3 приведены расчётные значения теплообмена на воздухе для плоских каналов с симметричным обогревом и круглых труб с шероховатыми поверхностями для очень больших относительных высот шероховатости ($h/R_0=0,15\div0,30$) для характерного диапазона чисел Рейнольдса ($Re=10^4\div10^6$), 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 таблицы 3 видно, что теплообмен в шероховатых трубах на воздухе для больших высот шероховатости увеличивается при малых числах Рейнольдса 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 это увеличение составляет уже примерно 2,5 и 2,9 раз соответственно, для больших – 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 $1,15\div1,19$ раз, т.е. несколько меньше, чем соответствующее повышение гидравлического сопротивления.

Таблица 3. Теплообмен (число Нуссельта) на воздухе в плоских каналах с симметричным обогревом с шероховатыми стенками (нижние значения) и в круглых шероховатых трубах (верхние значения), рассчитанный теоретически на основании решений (5), (7) – (12) 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 planar channels with symmetrical heating with rough walls (lower values) and in round rough pipes (upper values), calculated theoretically on the basis of solutions (5), (7) – (12) 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
	61,38	273,81	530,16	2480,70	4833,81
0,20	60,52	272,55	529,10	2494,82	4873,51
	64,93	290,99	564,61	2670,05	5198,06
0,25	63,26	285,81	556,11	2634,74	5156,57
	67,65	304,50	591,92	2803,38	5486,39
0,30	65,48	296,68	578,30	2750,43	5391,79
	69,81	315,12	614,00	2919,30	5722,62
0	31,96	115,83	201,68	730,86	1272,51

Теплообмен в плоских каналах с шероховатыми поверхностями с симметричным тепловым нагружением при прочих равных условиях для очень больших относительных высот шероховатости ($h/R_0=0,15\div 0,30$) увеличивается по отношению к круглым шероховатым трубам на $(6,1\div 7,7)\%$.

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 при симметричном обогреве соответствующее увеличение теплоотдачи ещё более существенно, чем для круглых шероховатых труб.

При очень высоких относительных высотах шероховатости увеличение теплообмена в плоских каналах с шероховатыми стенками с симметричным обогревом и в шероховатых трубах сопровождается гораздо большим увеличением гидравлического сопротивления, чем для меньших относительных высот шероховатости, 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 (5), (7)-(12), для плоских каналов с шероховатыми стенками при симметричном тепловом нагружении, для шероховатых труб и для труб с турбулизаторами при прочих равных условиях (равенство относительных высот шероховатости и турбулизаторов, чисел Рейнольдса).

С этой целью в таблице 4 приведены для удобства значения относительного теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ для плоских каналов с шероховатыми стенками при симметричном обогреве, круглых шероховатых труб на воздухе, рассчитанных как по разработанной в исследовании теории, 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 таблице 4, показывает, что при малых относительных высотах шероховатости ($h/R_0=1/100$) теплообмен в шероховатых трубах при небольших числах Рейнольдса немного меньше, чем в трубах с турбулизаторами с большими относительными шагами.

При увеличении числа Рейнольдса теплообмен приближается к теплообмену в трубах с турбулизаторами средних и малых относительных шагов соответственно; а при больших числах Рейнольдса теплообмен в шероховатых трубах примерно на 15% больше чем в трубах с турбулизаторами.

Таблица 4. Сравнительный анализ значений относительного теплообмена на воздухе $Nu/Nu_{ГЛ}$ для плоских каналов с симметричным обогревом 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 symmetric heating with rough walls (lower values) and round rough pipes (upper values) calculated from the developed theory with experimental data [1] for tubes with transverse transverse arranged by 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	$\frac{Nu}{Nu_{ГЛ}}$	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 1,19	1,23 1,32	1,38 1,47	1,56 1,66	1,83 1,94	2,54 2,69	5,15 5,47
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 1,51	1,48 1,59	1,62 1,74	1,88 2,02	2,09 2,23	2,31 2,48	2,66 2,85	3,79 4,06	7,93 8,49
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 1,76	1,75 1,88	1,94 2,08	2,23 2,38	2,48 2,67	2,75 2,94	3,19 3,41	4,61 4,94	9,86 10,56
0,11	0,25	Калинин	2,65	2,85	2,80	2,82	2,92	3,12	—	—	—
	—	теория	1,67 1,80	1,79 1,92	1,99 2,14	2,28 2,44	2,54 2,72	2,83 3,04	3,27 3,50	4,74 5,08	10,17 10,89
0,12	0,50	Калинин	2,28	2,72	2,70	2,70	2,85	3,00	—	—	—
	—	теория	1,70 1,83	1,83 1,97	2,03 2,18	2,33 2,48	2,59 2,78	2,89 3,09	3,35 3,59	4,86 5,20	10,46 11,40
0,13	1,00	Калинин	2,54	2,70	2,66	2,67	2,68	2,74	—	—	—
	—	теория	1,73 1,86	1,86 2,00	2,07 2,22	2,37 2,53	2,64 2,83	2,95 3,15	3,42 3,66	4,98 5,33	10,74 11,49

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; при больших числах Рейнольдса теплообмен в шероховатых трубах приблизительно соответствует теплообмену в трубах с турбулизаторами со средним относительным шагом.

При больших относительных высотах шероховатости ($h/R_0=1/10$) теплообмен в шероховатых трубах для небольших и средних числах Рейнольдса 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; при больших числах Рейнольдса значение теплообмена в шероховатых трубах находится примерно посередине между значениями теплообмена для труб с турбулизаторами со средним и большим относительным шагом.

Для очень высоких относительных высот шероховатости ($h/R_0>1/10$) теплообмен в шероховатых трубах при небольших и средних числах Рейнольдса, в среднем, приблизительно наполовину меньше, чем для труб с турбулизаторами; при больших числах Рейнольдса 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 при симметричном тепловом нагружении имеет место увеличение теплообмена по сравнению с прямыми круглыми шероховатыми трубами при прочих равных условиях для данного диапазона определяющих параметров примерно на $(6\div 8)\%$ (табл. 4).

Данные по теплообмену на воздухе для плоских каналов с шероховатыми стенками при симметричном обогреве и шероховатых труб для очень высоких чисел Рейнольдса ($Re \geq 10^6$), приведённые в таблице 4, указывают на то, с увеличением числа Рейнольдса сначала (после $Re > 10^6$) происходит довольно небольшое снижение относительного теплообмена— гидросопротивления $(Nu/Nu_{г\text{л}})/(\xi/\xi_{г\text{л}})$, после чего (ближе к $Re \approx 10^9$) оно несколько возрастает, что характерно, например, для т.н. предельного теплообмена третьего рода при турбулентном течении в круглых трубах, но при более низких числах Рейнольдса [2-7, 15 – 16, 29].

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 при симметричном тепловом нагружении увеличение теплообмена для этих условий выше приблизительно на $(6\div 9)\%$, чем для круглых шероховатых труб (таблица 4).

Вывод:

1. Разработана методика теоретического расчётного детерминирования осреднённого теплообмена для плоских каналов с шероховатыми поверхностями с симметричным тепловым нагружением и круглых труб с шероховатыми стенками на основе принципа суперпозиции полной вязкости в турбулентном пограничном слое, преимущественно отличающаяся от существующих теорий; ее необходимо применять при расчёте теплообмена, несмотря на определено более высокую сложность.

2. Теоретические решения, полученные в данном исследовании, показали, что в увеличение расчётных значений относительного осреднённого теплообмена $Nu/Nu_{г\text{л}}$ для плоских шероховатых каналов и шероховатых труб с очень большими значениями относительной шероховатости существенный вклад дает как увеличение относительной высоты шероховатости h/R_0 , так и увеличение числа Рейнольдса Re .

3. Сравнительный анализ расчётных значений относительного осреднённого теплообмена в шероховатых трубах с аналогичными экспериментальными значениями для труб с периодическими поперечно расположенными турбулизаторами потока показал, что в очень больших относительных высот шероховатости осреднённый теплообмен в шероховатых трубах почти во всех случаях несколько ниже, чем для труб с турбулизаторами при прочих равных условиях и приблизительно равен при больших числах Рейнольдса; для малых, средних и больших относительных высот найдены границы их приблизительного соответствия при прочих равных условиях: чем больше число Рейнольдса Re , тем меньше должен быть относительный шаг между турбулизаторами h/R_0 .

4. Главное преимущество решений для осреднённого теплообмена для шероховатых плоских каналов с симметричным тепловым нагружением и круглых труб, 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, например, для труб малых диаметров и узких плоских каналов.

5. Расчёты по относительному теплообмену—гидросопротивлению для шероховатых плоских каналов с симметричным тепловым нагружением и круглых труб показали, что повышение относительного теплообмена на воздухе вследствие увеличения относительной высоты шероховатости или числа Рейнольдса сопровождается еще более существенным повышением гидравлического сопротивления.

6. Анализ полученных расчётных значений теплообмена—гидросопротивления для плоских шероховатых каналов с симметричным обогревом и круглых шероховатых труб показывает, что повышение теплообмена всегда меньше, чем соответствующее повышение гидрав-

лического сопротивления, что является недостатком по сравнению с каналами с турбулизаторами при прочих равных условиях.

7. На основании приведённых расчётов по относительному теплообмену— гидросопротивлению для плоских шероховатых каналов с симметричным обогревом и круглых шероховатых труб можно заключить, что они могут иметь преимущество по сравнению с трубами с турбулизаторами с точки зрения вышеуказанного параметра при прочих равных условиях в области высоких значений относительной высоты шероховатости при высоких числах Рейнольдса.

8. Полученные в работе расчётные данные по осреднённому теплообмену показали, что в рассматриваемом диапазоне определяющих параметров для плоских шероховатых каналов с симметричным тепловым нагружением при прочих равных условиях осреднённый теплообмен выше на $(4,8 \div 11,7)\%$ по сравнению с круглыми шероховатыми трубами.

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 компаундных 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 гидродинамики, 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 ххiv 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 поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной 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. – 2012. – № 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.
28. Субботин В.И., Ушаков Н.А. Приближённые расчёты гидродинамических характеристик турбулентного потока жидкости в кольцевых каналах // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10. – № 5. – С. 1025–1030.
29. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Предельный теплообмен при интенсифицированном турбулентном течении в каналах. – М.: Издательство МАИ, 2013. — 168 с.

References:

1. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. i dr. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena. M.: Energoatomizdat; 1998. 408 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. et al. Effective heat-exchange surfaces. Moscow: Energoatomizdat; 1998. 408 p. (in Russ.)]
2. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Mos-

kva; 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 intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom I. Matematicheskoe modelirovanie intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniem osnovnykh analiticheskikh i chislennykh metodov. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 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'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2009. 405 p. (in Russ.)]

4. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom II. Matematicheskoe modelirovanie intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniem neosnovnykh analiticheskikh i chislennykh metodov. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2010. 290 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'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2010. 290 p. (in Russ.)]

5. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparaty s intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom III. Matematicheskoe modelirovanie intensivitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniem mnogosloynnykh, supermnogosloynnykh i kompaundnykh modeley turbulentnogo pogrannichnogo sloya. 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 intensivitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensivitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskom proizvodstve.) V 4-kh tomakh Tom IV. Spetsial'nye aspekty matematicheskogo modelirovaniya gidrogazodinamiki, teploobmena, a takzhe teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh s intensivitsirovannym 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.: MIKKHiS; 2008. 194 s. [Lobanov I.E., Dotsenko A.I. Mathematical modeling of terminal heat-exchange for turbulated flow in channels. Moscow: MIKKHiS; 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. Effekt teplovoy, ili diffuzionnoy, 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 pogranichnom 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. Atomnaya energiya. 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 sherokhovatymi stenkami. Atomnaya energiya. 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 intensivatsii teploobmena v trubakh za schet 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'naya intensivatsiya 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 chteniy po kosmonavtike "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 intensivirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheski poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo sloya. Fundamental'nye i prikladnye problemy 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 intensivirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheski poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo 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 poverkhnostno raspolozhennymi odnostoronnnimi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogo 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 boundary layer. *Moskovskoe nauchnoe obozrenie*. 2012;4(1):7-12. (in Russ.)]

23. Lobanov I.E. Analiticheskoe reshenie zadachi ob intensivitsirovannom teploobmene pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheski poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy 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 ploskikh kanalakh s ravnomerno raspolozhennymi poverkhnostnymi 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.)]

28. Subbotin V.I., Ushakov N.A. Priblizhennyye raschety gidrodinamicheskikh kharakteristik turbulentnogo potoka zhidkosti v kol'tsevykh kanalakh. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 1972; 10(5):1025-1030. [Subbotin V.I., Ushakov N.A. Approximate calculations of hydrodynamic characteristics of liquid turbulent flow in ring channels. *High Temperature*. 1972; 10(5):1025-1030. (in Russ.)]

29. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Predel'nyy teploobmen pri intensivitsirovannom turbulentnom techenii v kanalakh. M.: Izdatel'stvo MAI; 2013. 168 s. [Lobanov I.E., Paramonov N.V. Terminal heat exchange under intensified turbulent flow in channels. Moscow: Izdatel'stvo MAI; 2013. 168 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. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 24.05.2017.

Received 24.05.2017.

Принята в печать 16.06.2017.

Accepted for publication 16.06.2017.

Для цитирования: Магомедова М.Р. Математическое моделирование процессов массообмена между потоком и речными наносами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):142-150. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

For citation: Magomedova M.R. Mathematical modelling of mass exchange processes between flow and alluvial sediments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):142-150. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-142-150

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА МЕЖДУ ПОТОКОМ И РЕЧНЫМИ НАНОСАМИ

Магомедова М. Р.

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

Резюме. Цель. Целью исследования является совершенствование математической модели движения руслоформирующих наносов в части уточнения одного из основных соотношений, от которого зависит расход наносов: частоты пульсаций вертикальной составляющей скорости жидкости с гидравлическими параметрами потока. **Метод.** Математическая модель разработана с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов. **Результат.** В результате проведенного моделирования были получены сведения об объемах и площадях зон влияния повышенной мутности на водные биоресурсы реки Гизельдон. Эксплуатация Гизельдонской гидроэлектростанции привела к утере ареалов обитания зообентоса, разрушению донных биоценозов, гибели кормовых организмов планктона и бентоса, снижению кормовой базы рыб и непосредственной гибели ихтиофауны. Произведена оценка ущерба водным биоресурсам от эксплуатации Гизельдонской гидроэлектростанции, в результате которой доказано, что негативное влияние «шлейфа мутности» в нижнем бьефе реки с учетом критических показателей концентрации взвешенных веществ в воде, будет прослеживаться на протяжении 3,7 км. Размер вреда водным биоресурсам в натуральном выражении при этом составит около 1,5 т за счет гибели кормовой базы рыб и ухудшения условий обитания в зоне повышенной мутности. **Вывод.** Результаты математического моделирования апробированы на материалах натурных данных, применялись для расчета мутности потока реки Гизельдон при реконструкции Гизельдонской гидроэлектростанции. Приведены результаты апробации математической модели движения руслоформирующих наносов для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным ресурсам реки Гизельдон.

Ключевые слова: транспорт наносов, взвешенные наносы, донные наносы, скорость потока, расход наносов, турбулентный поток, средняя глубина

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**MATHEMATICAL MODELLING OF MASS EXCHANGE PROCESSES BETWEEN FLOW
AND ALLUVIAL SEDIMENTS**

Milada R. Magomedova

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

Abstract Objectives The aim is to improve the mathematical model of the motion of channel-fill deposits in terms of clarifying one of the main relationships on which the sediment flow rate depends: the frequency of pulsations of the vertical fluid velocity component with hydraulic flow parameters. **Methods** The mathematical model is developed using probability theory and the theory of runs of random processes, taking into account the normal distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities and the Rayleigh law of the distribution of their maxima. **Results** As a result of the modelling, information was obtained concerning the volumes and areas of the zones of influence of increased turbidity on the aquatic bioresources of the Gizeldon River. The operation of the Gizeldon hydroelectric power station have led to the loss of zoobenthos habitats, the destruction of bottom biocenoses, the loss of food organisms of plankton and benthos, a decrease in the fodder base of fish and the direct death of the ichthyofauna. An assessment of the damage caused to aquatic bioresources from the operation of the Gizeldon hydroelectric power station was carried out. As a result, it was proved that the negative influence of the "turbidity loop" in the lower tail of the river, taking into account the critical values of suspended matter concentration in water will be traced for 3.7 km. The amount of damage to aquatic bioresources in physical terms is about 1.5 tons due to the destruction of the fodder base of fish and the deterioration of habitat conditions in the zone of increased turbidity. **Conclusion** The results of mathematical modelling were tested on field data materials and used to calculate the turbidity of the Gizeldon River flow during the reconstruction of the Gizeldon hydroelectric power station. The results of the approbation of the mathematical model of the motion of channel-fill sediment are presented in order to identify the areas of increased turbidity during the assessment of the damage to the water resources of the Gizeldon River.

Keywords: sediment transport, suspended sediments, bottom sediments, flow velocity, sediment flow, turbulent flow, mean depth

Введение. Сложный характер движения речных наносов и отсутствие единой теории движения обусловили многообразие методов расчета твердого расхода [1-6].

При всем разнообразии имеющихся в литературе расчетных схем и методов определения расхода наносов можно выделить два различных подхода к расчету транспорта разнородного грунта.

Первый, которого придерживается большинство исследователей, заключается в том, что определение расхода смеси наносов основывается на зависимостях для расчета расхода однородного грунта, в которые вводится некоторый репрезентативный диаметр.

Второй подход состоит в определении расходов отдельных фракций по формулам для однородного грунта при последующем их суммировании в соответствии с весовым содержанием отдельных фракций в исходном грунте.

Несвязные грунты, слагающие русла водотоков, представляют собой сыпучие минеральные частицы, образующиеся в результате происходящих в природе процессов выветривания, денудации и эрозии изверженных и осадочных пород и прикрывающих их почв.

Количественные закономерности мутности потока определяются статистическими характеристиками турбулентности потока, концентрацией и гранулометрическим составом дон-

ных наносов, размерами и формами частиц. Под влиянием указанных факторов в стационарном потоке устанавливается динамическое равновесие между количеством взвешиваемых частиц и опускающихся на дно под воздействием силы тяжести.

Размеры частиц и их форма связаны со свойствами пород, условиями образования и существования частиц. Поступая в речной поток, зерна пород в результате соударения друг с другом стираются и приобретают окатанную форму, однако последняя зависит от исходной формы обломков породы. Исследования процессов формирования гранулометрического состава показывают, что основные факторы – выветривание, перенос и отложение – вызывают изменение первоначального гранулометрического состава. Этим объясняется наличие в русловых отложениях зерен разных форм.

К основным линейным размерам зерен несвязанных грунтов относятся: длина зерна, ширина, толщина. Эти величины могут быть определены либо непосредственным измерением каждого из зерен образца, либо с помощью соответствующих сит.

Вследствие преобладания в составе русловых несвязных грунтов и наносов некоторых немногих пород, удельный вес их колеблется в небольших пределах от 2,45 до 2,76, составляя в среднем $2,65 \text{ т/м}^3$. Геометрические размеры зерен несвязных грунтов, а также их гранулометрический состав обуславливают величину шероховатости речного русла. Наиболее точной и полной количественной характеристикой гранулометрического состава является математическая интерпретация закона распределения размеров частиц, т.е. аналитическое выражение кривой распределения.

Стохастический характер турбулентности водных потоков, вследствие интенсивного перемешивания жидкости, определяет случайный характер мгновенных скоростей и гидродинамических сил P , W_y и W_x , действующих на частицы русловых грунтов и транспортируемых русловых наносов [7].

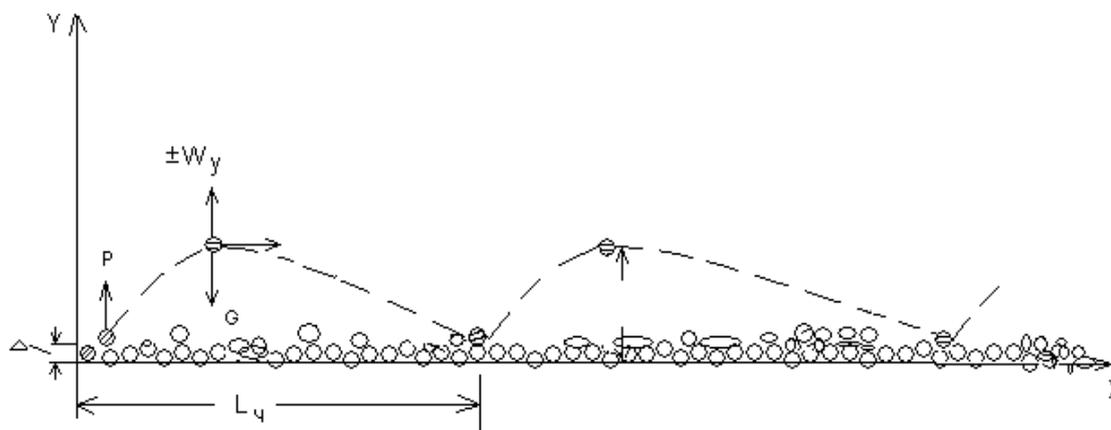


Рис.1. Силы, действующие на частицы наносов

Fig.1. Forces acting on sediment particles

Постановка задачи. Все вышеизложенное свидетельствует о чрезвычайной сложности анализа механизма движения частиц грунта при транспорте наносов неустановившимся потоком. Исследование процесса движения наносов и разработка методов расчета транспортирующей способности взвесенесущих потоков ведется по двум направлениям: по пути обобщения данных натуральных наблюдений и по пути создания и развития различных теорий движения наносов. Существующее состояние проблемы расчета распространения наносов в руслах рек, определение их расхода, когда отсутствуют даже нормативные документы по применению тех или иных методов в проектной практике, где более надежные методы достаточно сложны, вызывает необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета твердого расхода.

Разработанная в [6] модель больше соответствует физической природе процесса транспорта придонных наносов и лучше согласуется с экспериментальными и натурными данными, чем другие модели. Однако, в данной модели требует дальнейшего уточнения одно из основных соотношений, от которого зависит расход наносов, – связь частоты пульсаций вертикаль-

ной составляющей скорости жидкости с гидравлическими параметрами потока принята по приближенной зависимости, не проверенной на натурных данных.

Методы исследования. Анализ математических моделей транспорта твердых частиц водным потоком показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений движения твердых частиц, исходя из стохастической природы турбулентности водных потоков и случайного характера процессов распространения наносов, с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов [7-10].

Структура формулы предельного расхода наносов имеет следующий вид:

$$q_T = \rho_s \frac{\pi d^3}{6} \rho_N V, \quad (1)$$

где, $\pi d^3/6$ – объем твердой частицы, m^3 , ρ_N – среднее значение предельной счетной концентрации твердых частиц над единицей площади дна в наносонесущем слое потока высотой h ; $V = l/t$ – осредненная скорость транспортируемых частиц наносов; h , l и t – средние значения высоты, длины и длительности скачков.

Предельная концентрация частиц в слое потока определяется средним числом частиц N_c , срывааемых и транспортируемых одним вихревым возмущением, и концентрацией срывающих вихревых возмущений над поверхностью русла:

$$\rho_N = N_c \nu_c / \bar{u}_\Delta, \quad (2)$$

где, ν_c – средняя частота срывающих возмущений, s^{-1} ;

$$N_c = n_s d \eta_c \frac{t}{t_\Delta} \frac{l_c}{l}, \quad (3)$$

$n_s = 6\beta/\pi d^2$ – количество частиц поверхностного слоя грунта на единице площади дна, m^{-2} ; $l_c = \bar{u}_\Delta \tau_c$ – средний продольный размер срывающих возмущений, m ; τ_c – средняя длительность воздействия срывающего возмущения на частицу грунта, s ; η_c – вероятность срыва частиц одним вихревым возмущением; $t_\Delta = d/v_{r\Delta}$ – длительность срыва твердых частиц, s ; $v_{r\Delta}$ – вертикальная скорость сорванной частицы грунта на уровне $y = \Delta$.

Подстановка всех выражений в формулу (1) приводит ее к виду [6]:

$$q_T = \rho_{омл} d^2 \eta_c \tau_c \nu_c / t_\Delta, \quad (4)$$

где, $\rho_{омл} = \beta \rho_s$ – плотность условных отложений, $кг/м^3$.

Для определения действующих на сорванные частицы грунта взвешивающих сил, а также расчета параметров траекторий наносов необходимо знать вероятностные характеристики взвешивающих областей турбулентных образований. Они могут быть выражены через амплитудные и частотные характеристики выбросов эйлеровой и лагранжевой вертикальной скорости течения за уровень гидравлической крупности с учетом критериев руслоформирующих наносов. Величины η_c , τ_c и ν_c определяются выражениями:

$$\eta_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} f(x_2) & \text{при } \bar{u}_\Delta < u_{\Delta c} \\ 1 & \text{при } \bar{u}_\Delta \geq u_{\Delta c} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\tau_c = \frac{1 - \Phi(x_1)}{\sqrt{2\pi\bar{v}_u} f(x_1)}, \quad (6)$$

$$v_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi\bar{v}_u} f(x_1) & \text{при } \bar{u}_\Delta < u_{\Delta n}; \\ \bar{v}_u & \text{при } \bar{u}_\Delta \geq u_{\Delta n}; \end{cases} \quad (7)$$

Экспериментальными исследованиями Б.А. Фидмана по изучению пульсации вертикальной составляющей скорости частиц жидкости, измеренной вдоль их траекторий, было установлено, что колебания вертикальной скорости, обладающие наиболее значительной энергией, сосредоточены в узкой полосе низких частот. Средняя длина волны этих колебаний вдоль потока составляет примерно:

$$\lambda = 23h, \quad (8)$$

где h – глубина потока.

Средний период пульсаций будет равен:

$$\bar{\tau}_u = \frac{\bar{\lambda}}{V} = \frac{23h}{V}, \quad (9)$$

а средняя частота пульсаций:

$$\bar{v}_u = \frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{V}{23h}. \quad (10)$$

Средняя частота пульсаций эйлеровой скорости связано с измерениями числа Струхала, которое для натуральных условий в среднем может быть принято равным 0,75:

$$Sh = \frac{\bar{v}_u h}{V} \quad (11)$$

$$\bar{v}_u = \frac{0,75V}{h} \quad (12)$$

Большинство формул для расчета расхода наносов разработаны для условий движения наносов по плоскому дну и в них не учитывается влияние образующихся на дне рифелей и гряд. При грядовой форме дна частицы наносов под воздействием турбулентных возмущений перемещаются скольжением, качением и скачкообразно по пологому верховому откосу гряды и, достигнув гребня гряды, скатываются вниз по крутому низовому откосу, накапливаясь там.

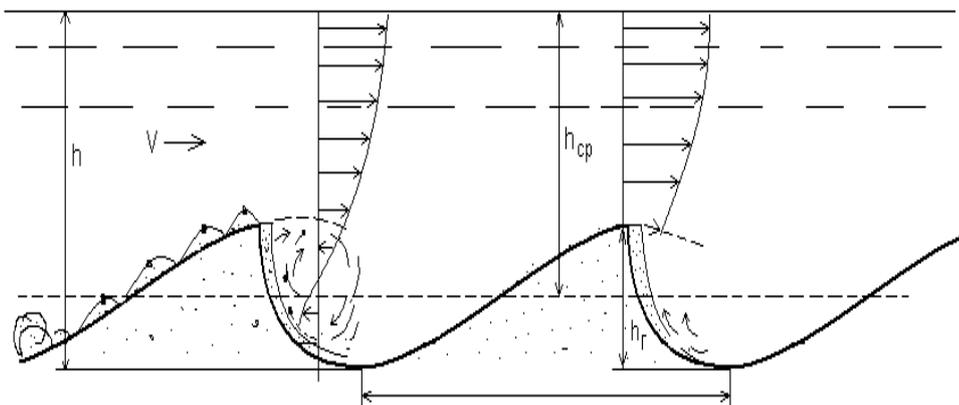


Рис. 2. Грядовое движение наносов
 Fig. 2. Sediment movement of sediments

С возрастанием средних скоростей потока увеличивается высота подъема зерен над поверхностью верхового откоса гряды и над ее гребнем, что приводит к увеличению числа зерен, поступающих на следующую гряду транзитом через водоворотную зону.

Полувзвешенные придонные наносы переносятся турбулентными возмущениями непосредственно на верховой откос передней гряды. В результате происходит наращивание низового откоса гряд и перемещение их гребней вниз по течению. За гребнем расположена зона повышенной турбулизации, характерная для водоворотной области, в которой происходит турбулентный обмен на границах данной области с основным потоком, вращение массы жидкости вокруг горизонтальной оси, параллельной гребню.

В водоворотной зоне возникают возмущения, которые существенно отличаются от рождающихся на дне основных возмущений, которые турбулизируют весь поток, формируя поле скоростей. Влияние этих возмущений ограничивается в основном воздействием на само углубление, т. е. характер турбулизации основного потока определяется именно возмущениями, возникающими на верховом откосе донных гряд.

Турбулизация основного потока, определяющая профиль продольных скоростей, зависит от размеров выступов зерен, формирующих гряду, поэтому процесс транспорта наносов будет определяться в основном возмущениями, зависящими от диаметра частиц, образующих гряду. Мелкие частицы наносов непрерывно циркулируют в водоворотной зоне, часть их задерживается на откосе и прикрывается более крупными, и на смену им в эту зону поступают новые [6, 11-15].

С учетом пульсаций скорости течения, гидродинамических сил и путем введения в формулу вероятностных критериев срыва частиц, полученных на основе предположения о нормальном законе распределения пульсаций гидродинамических сил, а также образующихся на дне рифелей и гряд, влияющих на кинематические характеристики потока, а следовательно, и транспорт наносов построена формула:

$$q_T = \rho_z \beta P_0 d^2 \eta_c l_c \bar{v}_u / t_{\Delta} \bar{u}_{\Delta} \quad (13)$$

Дальность переноса донных и взвешенных наносов, определяем по зависимостям:

$$l_{\text{вз}} = V_{\text{вз}} t_{\text{вз}} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} V_{\text{вз}} t_{\text{вз}} \right] \quad (14)$$

$$l_{\text{дон}} = \bar{v}_{\Delta c} t_{\text{дон}} - \frac{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2}{g(\rho_{\Gamma} - \rho)} \ln \left[1 + \frac{g(\rho_{\Gamma} - \rho)}{(\rho_{\Gamma} + \rho / 2) \omega^2} \bar{v}_{\Delta c} t_{\text{дон}} \right]. \quad (15)$$

Длину участка, на котором выпадут наносы, т.е. путь, на протяжении которого выпадут наносы рассматриваемой крупности, определяем по формуле:

$$L = \frac{H}{\omega} V, \quad (16)$$

где, H - средняя глубина на участке длиной L , ω - гидравлическая крупность наносов, V - скорость течения воды.

Обсуждение результатов. Случайный характер процесса транспорта наносов обуславливает правильность применения данного подхода, так как все физически реальные случайные процессы представляют собой непрерывные функции «времени» [6].

Результаты моделирования применялись для определения мутности потока в реке Гизельдон при реконструкции Гизельдонской ГЭС [10].

Наносы реки Гизельдон представлены следующим гранулометрическим составом (табл.1).

Массив охватывает следующий диапазон изменения гидравлических характеристик потока и русла: расход воды $Q = 2,16 \dots 11,20 \text{ м}^3/\text{с}$, глубина потока $h = 0,3 \dots 2,5 \text{ м}$, ширина потока $b = 3,5 \text{ м}$, средняя скорость потока $V = 0,5-1 \text{ м/с}$, диаметр частиц наносов $d = 0,005 \dots 2 \text{ м}$, измеренный уклон на участке $i = 0,011 \dots 0,092$, коэффициент шероховатости $n = 0,042 \dots 0,096$.

Таблица 1. Гранулометрический состав р. Гизельдон
Table 1. The granulometric composition of the river Giseldon

d, мм	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0.01
%	18,8	7,4	4,1	6,5	3,0	0,3	0,1	0,1

Результаты моделирования сгруппированы в таблицу 2.

Таблица 2. Расстояние от створа гидроузла до места выпадения наносов
Table 2. Distance from the site of the hydrosystem to the site of sedimentation

Концентрация взвеси в воде, кг/м ³					
≥ 0,100	≥ 0,050	≥ 0,020	≥ 0,010	≥ 0,005	≥ 0,001
340	740	1850	3703,7	7407,4	37037

1. Относительное содержание взвешиваемых фракций в грунте 0, 65286.
2. Максимальный диаметр взвешиваемых фракций, $d = 0,001610 \text{ м}$.
3. Средний диаметр взвешиваемых фракций, $d = 0,000528 \text{ м}$.
4. Средняя гидравлическая крупность взвешиваемых фракций, $w = 0,05382 \text{ м/с}$.
5. Средняя частота взвешивающих вихревых возмущений, $nub = 0,9195 \text{ 1/с}$.
6. Вероятность взвешивания сорванных частиц, $eb = 0,0759$.
7. Эффективная скорость продольного переноса частиц, $v = 0,765 \text{ м/с}$.
8. Высота подъема взвешенных наносов, $h = 0,1362 \text{ м}$.
9. Длительность переноса частиц взвешенных наносов, $t = 6,25624 \text{ с}$.
10. Удельный расход придонных наносов, $q = 0,016259 \text{ кг/с/м}$.
11. Удельный расход взвешенных наносов, $q = 0,024303 \text{ кг/с/м}$.
12. Удельный расход руслоформирующих наносов, $q = 0,040562 \text{ кг/с/м}$.
13. Средняя мутность потока, $r = 0,06142 \text{ кг/м}^3$.

Вывод. Учитывая сложность описания процессов транспортировки наносов водным потоком, а также значительные расхождения между экспериментальными и натурными данными, получаемыми по многим полуэмпирическим формулам определения расхода наносов, соответствие предложенной математической модели и полученной на ее основе формулы расхода наносов экспериментальным и натурным данным можно считать удовлетворительным.

В результате проведенного моделирования были получены сведения об объемах и площадях зон влияния повышенной мутности на водные биоресурсы р. Гизельдон. Строительство и эксплуатация Гизельдонской ГЭС привели к утере ареалов обитания зообентоса, разрушению донных биоценозов, гибели кормовых организмов планктона и бентоса, снижению кормовой базы рыб и непосредственной гибели ихтиофауны.

Произведена оценка ущерба водным биоресурсам от эксплуатации Гизельдонской ГЭС, в результате, которой получено, что негативное влияние «шлейфа мутности» в нижнем бьефе реки с учетом критических показателей концентрации взвешенных веществ в воде, будет прослеживаться на протяжении 3,7 км. Размер вреда водным биоресурсам в натуральном выражении при этом составит около 1,5 т за счет гибели кормовой базы рыб и ухудшения условий обитания в зоне повышенной мутности.

Библиографический список:

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ. 1998. – С.95-114.
2. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.

3. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел// Журнал университета водных коммуникаций. – СПб, т.2 , 2010. – С.90-93.
4. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках: сборник работ по гидрологии. – СПб.:Гидрометеиздат, 2004. – № 27. – С. 25–40.
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
6. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.98-108.
7. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – С.53-68.
8. Магомедова А.В., Магомедова М.Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2013. – Т.29. – №2– С.58-64.
9. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2016. –Т.42, - №3 - С.106-109.
10. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2015. –Т.37, - №2 - С.84-91.
11. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – С.127-130.
12. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. *TheJournalofGeology*, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.
13. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, CoastalandShelfScience*. 2005, pp.251-258.
14. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. *Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation*. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
15. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *JournalofHydraulicEngineering*. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.

References:

1. Alekseevskiy N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov. M.: Izd-vo MGU; 1998. S. 95-114. [Alekseevskiy N.I. Formation and moving of the river sediments. Moscow: Izd-vo MGU; 1998. P. 95-114. (in Russ.)]
2. Alekseevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'efa. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1990;9:100-105. [Alekseevskiy N.I. The transport of moving sediments with the developed structure of the bed relief. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1990;9:100-105. (in Russ.)]
3. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Gidravlichesкое soprotivlenie rechnykh rusel. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy*. 2010;2:90-93. [Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Hydraulic resistance of the river beds. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2010;2:90-93. (in Russ.)]
4. Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Raschety raskhoda donnykh nanosov v rekakh: sbornik rabot po gidrologii. SPb.: Gidrometeoizdat. 2004;27:25–40. [Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Calculations of sediment flow rates in rivers: work collection on hydrology. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat. 2004;27:25–40. (in Russ.)]
5. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nye issledovaniya i gidravlichesкое modelirovanie rechnykh potokov i ruslovogo protsessa. SPb.: Nestor-Istoriya; 2011. S. 103–107. [Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and bed process. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya; 2011. P. 103–107. (in Russ.)]
6. Magomedova A.V. Erozionnye protsessy v ruslakh rek i kanalov. M.: VZPI; 1990. S.98-108. [Magomedova A.V. Erosion processes in river beds and channels. M.: VZPI; 1990. P.98-108. (in Russ.)]
7. Magomedova M.R. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh. Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A.; 2014. S.53-68. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of near-bottom sediment movement in open beds. Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A.; 2014. P.53-68. (in Russ.)]
8. Magomedova A.V., Magomedova M.R. O faktorakh, obuslovlivayushchikh protsess transporta rusloformiruyushchikh nanosov. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*.

- Tekhnicheskie nauki. 2013;29(2):58-64. [Magomedova A.V., Magomedova M.R. About the factors determining the transport process of bed-forming sediments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013;29(2):58-64. (in Russ.)]
9. Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoe matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016;42(3):106-109. [Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitation mathematical modeling of suspended particle distribution for the determination of high turbidity zones during the harm evaluation of the river Cherek water biological resources. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42(3):106-109. (in Russ.)]
 10. Magomedova M.R. Prakticheskoe primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2015;37(2):84-91. [Magomedova M.R. Practical application of an original transport model of mineral particles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015;37(2):84-91. (in Russ.)]
 11. Rzhnitsyn N.A. Rusloformiruyushchie protsessy rek. L.: Gidrometeoizdat; 1985. S.127-130. [Rzhnitsyn N.A. River bed-forming processes. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. P.127-130. (in Russ.)]
 12. Dade W.B., Friend P.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology. 2011;106(6):662-673.
 13. Camenen B., Larson M. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005;63:249-260.
 14. Kopalani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow. 2007;3:175-181.
 15. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003;129(2):120-128.

Сведения об авторе:

Магомедова Милада Руслановна – кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства, докторант кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Information about the author:

Milada R. Magomedova—Cand. Sc.(Technical), Doctoral student, Department of Building Constructions and Hydraulic Structures

Конфликт интересов

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

Поступила в редакцию 03.05.2017.

Received 03.05.2017.

Принята в печать 20.05.2017.

Accepted for publication 20.05.2017

Для цитирования: Апкаров Ш.И., Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Мажиев Х.Н. Оценка трещиностойкости ячеистобетонных изделий и конструкций при влажностных и карбонизационных деформациях с учетом релаксации напряжений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):151-161. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

For citation: Apkarov Sh.I., Bataev D.K.-S., Gaziev M. A., Mazhiev Kh.N. Assessment of cracking resistance of cellular concrete products under moisture and carbonisation deformations with stress relaxation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):151-161. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.327.332-333

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВЛАЖНОСТНЫХ И КАРБОНИЗАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Апкаров Ш.И.⁴, Батаев Д. К.-С.¹, Газиев М.А.³, Мажиев Х.Н.²

^{1-2,4}Комплексный научно-исследовательский институт

имени Х.И.Ибрагимова Российской академии наук,

^{1-2,4}364051, г.Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а,

³Грозненский государственный нефтяной технический университет

имени академика М.Д.Миллионицикова,

³364905, г.Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100,

¹⁻²e-mail: kniiran@mail.ru, 3e-mail: mgaziev56@mail.ru,

4e-mail: apkarov.shamil@mail.ru

Резюме. Цель. Целью работы является разработка мероприятий технологического характера для повышения эксплуатационной трещиностойкости наружных поверхностных слоев конструкций за счет снижения влажностной и карбонизационной усадки ячеистого бетона путем введения в его состав необходимого по расчету крупного или мелкого пористого заполнителя на стадии изготовления. **Метод.** Применен ряд аналитических уравнений, которые устанавливают зависимость усадки тяжелого бетона обычного твердения от количества введенного заполнителя и модуля его упругости, водоцементного отношения и расхода цемента, а также от влажностного состояния бетона. **Результат.** Зная объемы структурного заполнителя и ячеистобетонной массы, а также их модули упругости, рассчитан коэффициент снижения усадки ячеистого бетона при добавке легкого пористого заполнителя, а затем определены предельно допустимые по трещиностойкости усадочные деформации бетона в поверхностном слое наружной ограждающей конструкции вследствие влагообменных и карбонизационных воздействий в условиях эксплуатации с учетом релаксации растягивающих напряжений за счет ползучести бетона. **Вывод.** Теоретические расчеты, выполненные на основе рекомендуемого метода оценки трещиностойкости ячеистобетонных ограждающих конструкций при влагообменных и карбонизационных процессах, с учетом релаксации усадочных напряжений показали, что для исключения в стадии эксплуатации появления трещин в стеновых панелях толщиной 280 мм из газозолотобетона плотностью 700 кг/м³ с модулем упругости 2500 МПа, необходимо керамзита или гранулированного шлака 70-80 %, а каменной крошки (или дробленого камня из гранита или мрамора) в пределах 50-60 % от объема ячеистого бетона в поверхностном слое 30-50 мм.

Ключевые слова: ячеистые бетоны, трещиностойкость, влажностная усадка, карбонизационная усадка, легкий заполнитель, градиент влажности, степень карбонизации, ползучесть, релаксация напряжений

TECHNICAL SCIENCE

BUILDING AND ARCHITECTURE

ASSESSMENT OF CRACKING RESISTANCE OF CELLULAR CONCRETE PRODUCTS UNDER MOISTURE AND CARBONISATION DEFORMATIONS WITH STRESS RELAXATION

*Shamil' I. Apkarov*⁴, *Dena K.-S. Bataev*¹, *Gaziev M.A.*³, *Khasan N. Mazhiev*²

^{1-2,4} *H.I. Ibragimov Complex Scientific-Research Institute,*

Russian Academy of Sciences,

21a, Staropromyslovskoye Shosse, Grozny 364051, Russia,

³ *M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,*

100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 3364905, Russia,

¹⁻² *e-mail: kniiran@mail.ru,* ³ *e-mail: mgaziev56@mail.ru,* ⁴ *e-mail: apkarov.shamil@mail.ru*

Abstract Objectives On the basis of the experimental, theoretical and field studies, an engineering calculation method was developed for assessing the cracking resistance of external enclosing constructions made of cellular concrete, with the maximum gradient development of moisture and carbonisation forced deformations along their thickness, taking into account the relaxation of the shrinkage stresses. In this regard, the aim of the work is to provide technological measures at the manufacturing stage in order to increase the operational cracking resistance of the construction's outer surface layers by reducing the moisture and carbonation shrinkage of cellular concrete by introducing a large or fine porous aggregate in calculated amounts. **Methods** A number of analytical equations were applied to establish the dependence of the shrinkage of heavy concrete of conventional hardness on the amount of aggregate introduced and its elasticity modulus, water-cement ratio and cement consumption, as well as the concrete's moisture content. **Results** Knowing the volumes of the structural aggregate and the cellular concrete mass, as well as their modulus of elasticity, the shrinkage reduction factor of the cellular concrete was calculated with the addition of a lightweight porous aggregate. Subsequently, the shrinkage deformations of concrete in the surface layer of the outer enclosing construction, maximising crack resistance due to moisture exchange and carbonation influences under operating conditions, were defined, taking into account the relaxation of tensile stresses due to creep of concrete. **Conclusion** Theoretical calculations, based on the recommended method of assessing the cracking resistance of cellular concrete enclosing constructions under moisture exchange and carbonisation processes, taking into account the relaxation of shrinkage stresses, showed that in order to exclude the appearance of cracks in wall panels 280 mm thick made of 700 kg/m³ gas ash concrete with elasticity modulus of 2500 MPa, it is necessary to have 70-80% of keramzite or granulated slag, and 50-60% of stone crumb (granite or marble crushed stone) of the volume of cellular concrete in the surface layer of 30-50 mm.

Keywords: cellular concretes, cracking resistance, moisture shrinkage, carbonisation shrinkage, lightweight aggregate, moisture gradient, degree of carbonisation, creep, stress relaxation

Введение. Высокие теплозащитные и строительно-эксплуатационные показатели наружных ограждающих изделий и конструкций из ячеистого бетона, низкая энергоемкость их производства, а также практически неограниченная сырьевая база различных промышленных отходов и вторичных ресурсов, обуславливают эффективность этого материала и всевозрастающий интерес к нему со стороны проектировщиков и строителей.

В эксплуатационных условиях на ячеистобетонных изделиях и конструкциях возможно образование трещин, обусловленных карбонизационно-влажностными воздействиями и склонностью бетона к трещинообразованию вследствие самопроизвольных деформаций усадки.

Постановка задачи. Конструкционная трещиностойкость ячеистого бетона в крупно-размерных изделиях, определяемая его эксплуатационной деформируемостью при влагообменных и карбонизационных процессах, по мнению Е.С.Силаенкова, Е.М.Чернышова и Г.С.Славчевой, является основным и определяющим критерием (критическим свойством) для долговечности ячеистобетонных конструкций [1- 3,5].

Они рассматривают механизм влажностных деформаций через изменение напряженного состояния материала в результате действия сил связи его твердой фазы и порового пространства с водой, а механизм карбонизационных деформаций раскрывается в рамках макрокинетики физико-химических гетерогенных процессов взаимодействия структуры углекислотой воздуха.

Показано, что основными причинами карбонизационной усадки автоклавного ячеистого бетона являются собственные напряжения кристаллического сростка и преобразования геля кремнекислоты, выделившегося при карбонизации гидросиликатов кальция. При этом мера деформирования и деструкции материала зависит от степени карбонизации и величины ее градиента по толщине строительной конструкции. Сформулированы структурные факторы управления эксплуатационной деформируемостью макропористого (ячеистого) бетона, приведена система рецептурно-технологических факторов их регулирования, а также разработаны алгоритмы конструирования для них оптимальных параметров состава и структуры твердой фазы и порового пространства по комплексу задаваемых свойств.

Проведенные нами натурные обследования и экспериментально-теоретические исследования влияния фактора карбонизации на напряженно-деформированное состояние ячеистобетонных стеновых панелей с учетом ползучести материала показали, что процессы карбонизации ячеистого бетона по толщине ограждающих конструкций протекают неравномерно, и в их поверхностных слоях могут образоваться усадочные трещины при условии, если значения собственных растягивающих напряжений в этих слоях превысят предел прочности бетона на растяжение [6].

В связи с этим становится актуальным дальнейшее совершенствование методов расчета для оценки эксплуатационной трещиностойкости изделий и конструкций из автоклавных ячеистых бетонов в целях повышения их долговечности и надежности.

Как известно, введение крупного или мелкого легкого заполнителя в ячеистый бетон уменьшает его усадку и повышает трещиностойкость.

Так, согласно ранее проведенным в Уральском ПромстройНИИпроекте и НИИЖБ им.А.А.Гвоздева исследованиям под руководством Е.С.Силаенкова и Л.М.Розенфельда было установлено, что добавка в ячеистый бетон, мелкого или крупного легкого заполнителя, различного по виду, количеству и размеру, не только повышает его стойкость при переменном замораживании и оттаивании, увлажнении и высушивании, но и в два-три раза уменьшает влажностные и карбонизационные усадочные деформации [4].

Методы исследования. В научной литературе имеются ряд аналитических уравнений, полученных С.В. Александровским, Г.В. Вишневецким, Р. Лермитом и А.Е.Шейкиным, которые устанавливают зависимость усадки тяжелого бетона обычного твердения от количества введенного заполнителя и модуля его упругости, водоцементного отношения и расхода цемента, а также от влажностного состояния бетона [7-10].

Анализ указанных зависимостей, выполненный Е.С. Силаенковым, показал, что наиболее близко отвечает особенностям ячеистого бетона формула, предложенная Г.Д. Вишневецким [4].

Однако для применения данной формулы, целесообразно представить частичку ячеистого бетона с заполнителем в виде системы, где в центре находится сферическая гранула пористого заполнителя, а вокруг нее оболочка из ячеистого бетона (рис. 1).

Такая схема реально учитывает форму легкого заполнителя и тот участок ячеистого бетона, на который распространяется влияние заполнителя.

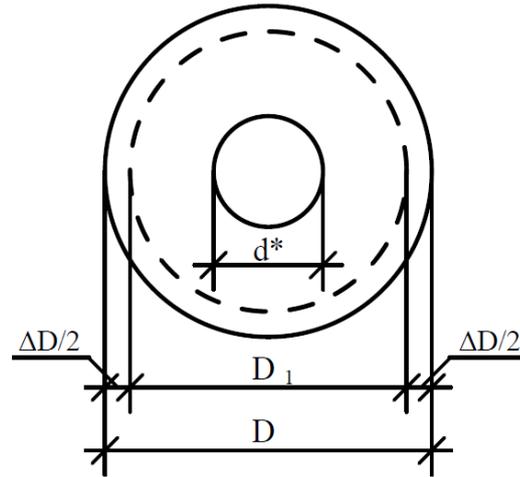


Рис. 1. Схема частицы ячеистого бетона с гранулой мелкого пористого заполнителя
Fig. 1. Diagram of particles of cellular concrete with a small granule of a porous filler

d^* – диаметр гранулы заполнителя;
 D – начальный диаметр системы (ячеистый бетон+заполнитель);
 D_1 – диаметр деформированной системы.

Из условий совместной работы ячеистобетонной оболочки и пористого заполнителя можно записать:

$$kE_3S_3\varepsilon_3 = E_{\text{я}}(\varepsilon_{\text{я}} - \varepsilon_3) F_{\text{я}}, \quad (1)$$

где, k – эмпирический коэффициент, учитывающий степень вовлечения заполнителя в совместную деформацию с ячеистобетонной оболочкой; при добавке заполнителя до 20% по объему $k = 1$, при большей добавке $k = 0,8$;

E_3 и $E_{\text{я}}$ – модули упругости заполнителя и ячеистого бетона;

ε_3 – относительная деформация заполнителя;

$\varepsilon_{\text{я}}$ – относительная деформация (усадка или набухание) ячеистого бетона;

S_3 – поверхность полусферы заполнителя, соприкасающаяся с ячеистым бетоном;

$F_{\text{я}}$ – площадь диаметрального сечения ячеистобетонной оболочки.

Разделив обе части уравнения (1) на E_3S_3 и сделав преобразования, получим по аналогии с формулой Г.Д. Вишневецкого следующую аналитическую зависимость между усадкой ячеистого бетона и количеством пористого заполнителя:

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_{\text{я}} \frac{1}{M} \left[(M - 1) + \frac{M^2 - 1}{2k\psi + (M^2 - 1)} \right], \quad (2)$$

здесь ε_6 – относительная деформация (усадка или набухание) ячеистого бетона с заполнителем;

$\varepsilon_{\text{я}}$ – усадка ячеистого бетона;

$\psi = E_3/E_{\text{я}}$;

$$M = \sqrt[3]{1 + \theta}; \theta = v_{\text{я}}/v_3,$$

$v_{\text{я}}$ и v_3 – объемы ячеистобетонной оболочки и заполнителя.

Обозначив выражение

$$\frac{1}{M} \left[(M - 1) + \frac{M^2 - 1}{2k\psi + (M^2 - 1)} \right] = f, \quad (3)$$

окончательно получим: $\varepsilon_6 = f \varepsilon_{\text{я}}$, (4)

где f – коэффициент снижения усадки.

На рис. 2 приведены результаты теоретических вычислений, показавших, что аналитическая зависимость в виде формулы (3) близко отвечает экспериментальным данным, полученным при исследовании влияния пористого заполнителя на усадку ячеистых бетонов при высушивании и карбонизации.

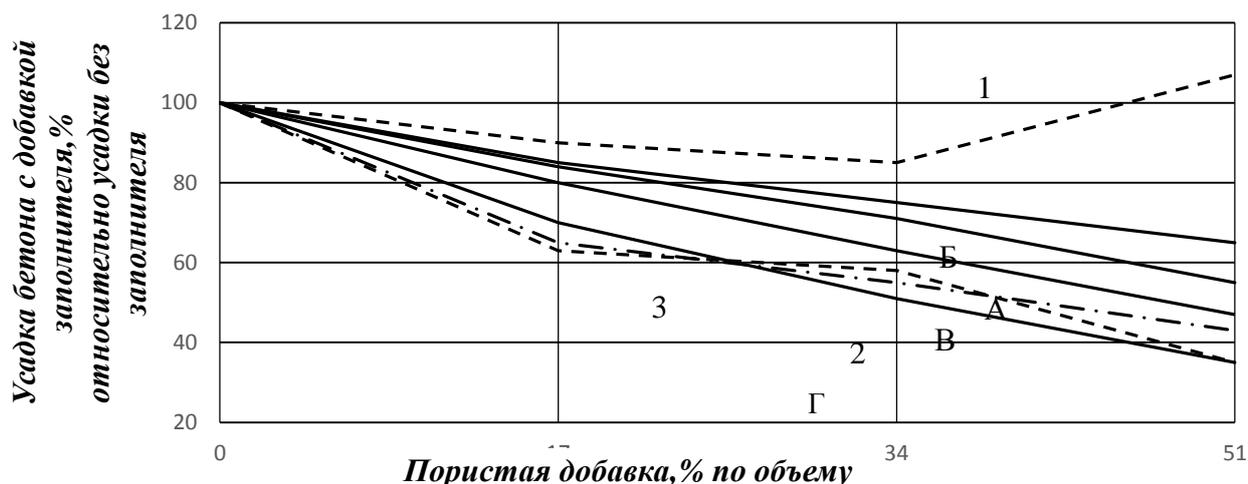


Рис. 2. Зависимость усадки ячеистого бетона от вида и количества мелкого пористого заполнителя

Fig. 2. The dependence of the shrinkage of the cellular concrete, the type and number of small porous filler

А, Б, В, Г – зависимость, определенная соответственно по формулам Лермита, Александровского, Вишневецкого (3);

1, 2, 3 – экспериментальные кривые, полученные при добавке соответственно дробленого пенобетона, керамзита и гранулированного шлака

А, Б, В, Г - dependence, determined, respectively, according to the formulas of Lermite, Aleksandrovsky, Vishnevetsky (3);

1, 2, 3 - experimental curves obtained with the addition of crushed concrete, claydite and granulated slag, respectively

Обсуждение результатов. Зная объемы структурного заполнителя и ячеистобетонной массы, а также их модули упругости, можно подсчитать коэффициент снижения усадки ячеистого бетона при добавке легкого пористого заполнителя, а затем определить предельно допустимые по трещиностойкости усадочные деформации бетона в поверхностном слое наружной ограждающей конструкции вследствие влагообменных и карбонизационных воздействий в условиях эксплуатации (при максимальном перепаде между характеристиками состояния материала на поверхности панели и в ее середине) с учетом релаксации растягивающих напряжений за счет ползучести бетона.

Рассмотрим симметричное изменение характеристики состояния материала по толщине панели. Такое протекание процесса характерно при карбонизации и для высыхания ячеистобетонных панелей в условиях их эксплуатации. При этом развитие собственных напряжений от вынужденных деформаций во времени характеризуется двумя этапами.

Первый – когда эти напряжения растут в связи с увеличением перепада между характеристиками состояния материала на поверхности панели и в ее середине.

Второй этап – когда после достижения своего максимума характеристики состояния материала начинают выравниваться по толщине панели, что ведет к уменьшению этих напряжений. Естественно, что наибольший интерес с точки зрения оценки трещинообразования ячеистобетонных ограждающих конструкций имеет именно первый этап, и его мы и будем рассматривать.

Графики распределения влажности и степени карбонизации по толщине газозобетонных и газобетонных панелей в различные сроки эксплуатации (рис.3), построенные по значениям, полученным при многолетних натурных исследованиях жилых объектов в Свердловске и Перми, послужили расчетной схемой для определения закона их изменения с учетом максимального перепада в слоях панелей [11-12].

Градиентное состояние материала по влажности и степени карбонизации в ограждении обуславливают неравномерность деформации бетона по сечению панели с возможным трещинообразованием в ее поверхностных слоях из-за усадочных напряжений [6, 15,17-21].

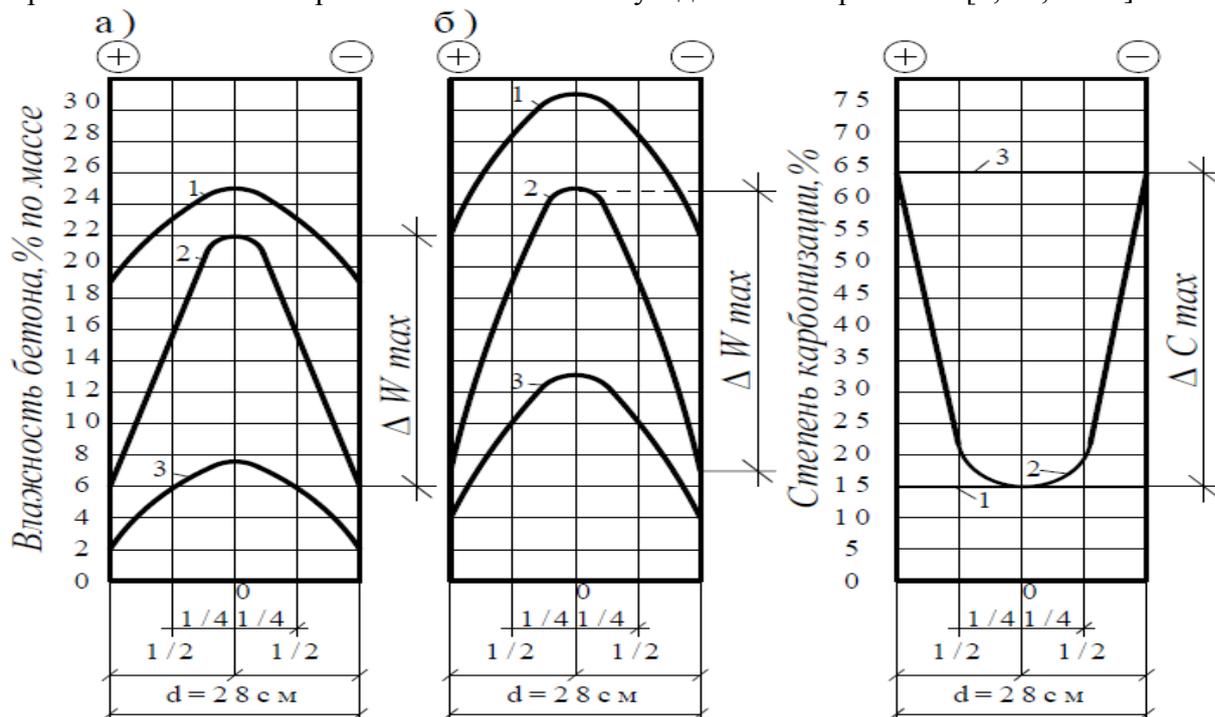


Рис. 3. Распределение влажности и карбонизации по сечению панелей в эксплуатационных условиях

Fig. 3. Distribution of humidity and the carbonization of the cross section of panels in a production environment

а – влажность газобетонных панелей; *б* – влажность газозобетонных панелей; 1 – начальное положение; 2 – положение, соответствующее максимальному градиенту; 3 – стабилизированное состояние

Упруго-мгновенные напряжения, возникающие в поверхностных слоях панели от неравномерных вынужденных деформаций, вызванных влагообменными и карбонизационными процессами, можно определить методами теории упругости, например, по формуле:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\eta_{w,c} E}{1-\mu} \left[-\Delta W_{(z)} + \frac{12z}{d^3} \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \Delta W_{(z)} z dz + \frac{1}{d} \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \Delta W_{(z)} dz \right], \quad (5)$$

где, σ_{xx} и σ_{yy} – нормальные напряжения;

E – модуль упругости бетона;

μ – коэффициент Пуассона;

$\eta_{w,c}$ – коэффициент влажностных или карбонизационных деформаций бетона;

d – толщина панели;

z – координата точки по толщине панели (при расположении центра координат на оси симметрии $z=0$);

$\Delta W_{(z)}$ – изменение влажности по сравнению с начальной.

Если в формулу (5), вместо $\Delta W_{(z)}$ подставить $\Delta C_{(z)}$ (изменение степени карбонизации по сравнению с начальной), то получим напряжение, явившиеся следствием неравномерной карбонизации.

Данная формула получена интегрированием уравнений совместности деформаций для случая плоского напряженного состояния.

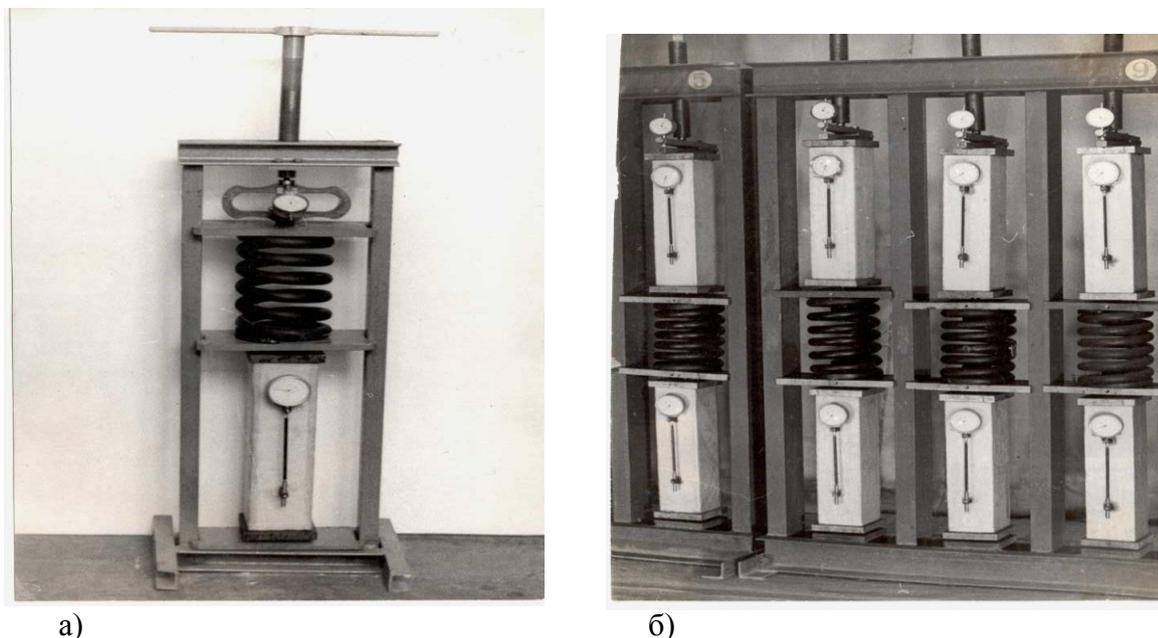
При этом влажностные и карбонизационные процессы приняты протекающими одинаково по всей боковой поверхности панели, т.е. не зависящими от координат x и y , а изменяющимися лишь по толщине z .

Для определения действительных усадочных напряжений при влажностно-карбонизационных деформациях, с учетом влияния на их величину фактора ползучести ячеистого бетона, в формулу (5) вводится коэффициент релаксации (затухания) напряжений, полученный нами в виде следующей функциональной зависимости [13-20]:

$$H(t) = e^{-\varphi(t)}, \quad (6)$$

где, $\varphi(t)$ – характеристика ползучести ячеистого бетона;
 e – основание натурального логарифма;
 t – время испытания на ползучесть, сут.

Характеристика ползучести ячеистого бетона $\varphi(t)$, необходимая для определения теоретических значений коэффициента релаксации напряжений $H(t)$, получена из опытов по исследованию ползучести на призмах-близнецах размерами 10x10x40см, загруженных на длительное испытание одновременно с такими же призмами, на которых исследовался релаксационный процесс с учетом и без учета фактора карбонизации (рис.4).



а) б)
Рис. 4. Пружинные установки для исследования релаксации напряжений (а) и деформации ползучести (б) ячеистых бетонов

Fig. 4. Spring setting to study stress relaxation (a) and creep strain (b) cellular concrete

Для вычисления коэффициентов влажностной усадки η_w и карбонизационной усадки η_c значения коэффициентов релаксации напряжений были приняты равными соответственно 0,6 и 0,3. Эти значения соответствовали срокам испытаний ячеистого бетона на ползучесть в 365 суток (максимальный перепад влажности по сечению панели) и 2000 суток (максимальный перепад степени карбонизации).

Из формулы (5), подставив величину прочности ячеистого бетона при растяжении R_p , вместо $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$, можно найти предельные значения коэффициентов влажностных или карбонизационных деформаций бетона, при которых не будут возникать усадочные трещины.

Для определения η_w и η_c необходимо аппроксимировать опытные кривые изменения градиентов влажности и степени карбонизации по сечению панелей $\Delta W_{(z)}$ и $\Delta C_{(z)}$ (рис. 3).

В нашем случае эти кривые аппроксимируются уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta W_{(z)} &= 4 + 72z^2 - 128z^4; \\ \Delta C_{(z)} &= 853,3z^4 - 13,3z^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где, z – координата точки по толщине панели.

После введения в первый множитель формулы (5) коэффициента релаксации напряжений, учитывающего ползучесть бетона и вычисления интегралов, получились следующие зависимости для определения коэффициентов влажностной и карбонизационной усадки:

$$\begin{aligned}\eta_w &= (1 - \mu)R_p / [0,6E(10 - \Delta W_{(z)})]; \\ \eta_c &= (1 - \mu)R_p / [0,3E(4,8 - \Delta C_{(z)})]\end{aligned}\quad (8)$$

Затем, как будут найдены η_w и η_c , необходимо на основании рис. 3, вычислить предельно допустимую деформацию бетона в поверхностном слое стены от влажностных и карбонизационных воздействий ε_w и ε_c :

$$\varepsilon_w = \eta_w \Delta W_{max}, \quad \varepsilon_c = \eta_c \Delta C_{max} \quad (9)$$

Как видно из рис. 3, максимальный градиент по влажности ΔW_{max} для газозолобетона равняется 18%, а для газобетона – 16%, а наибольший перепад по степени карбонизации ΔC_{max} для обоих бетонов составляет 50%. Из двух значений ε_w и ε_c для дальнейших расчетов выберем меньшее.

Это можно сделать, так как оба значения предельной деформации определены исходя из условия: напряжение в поверхностном слое панели от неравномерного высыхания или карбонизации не должно превышать R_p .

Такой путь, хотя и является некоторым допущением, но значительно упрощает решение прикладных задач. Вместе с тем, выбор для дальнейших операций меньшего значения допустимых деформаций идет в запас трещиностойкости.

Для того чтобы определить количество заполнителя, при котором деформации поверхностного слоя панели не будут превосходить допустимые деформации, найденные по уравнениям (9), вычислим сначала коэффициент снижения усадки f , исходя из формулы (4):

$$f = \varepsilon_p / \varepsilon_{я},$$

где, $\varepsilon_{я}$ – усадка ячеистого бетона в эксплуатационных условиях;

ε_p – допускаемое значение деформации бетона ε_w или ε_c , определенное по формулам (9).

Далее, по формуле (3) находим

$$M_3 = \sqrt[3]{1 + \theta} \text{ и } \theta = v_{я} / v_3, \quad (10)$$

где, $v_{я}$ – объем ячеистобетонной массы, v_3 – объем структурного заполнителя.

Из соотношения $v_{я} / v_3$ определяем расход соответствующего мелкого или крупного пористого заполнителя, который обеспечит требуемую по трещиностойкости в условиях эксплуатации конструкционную усадку ячеистого бетона ε_{σ} .

Вывод. Теоретические расчеты, выполненные нами на основе вышеизложенного метода оценки трещиностойкости ячеистобетонных ограждающих конструкций при влагообменных и карбонизационных процессах, с учетом релаксации усадочных напряжений показали, что для исключения в стадии эксплуатации появления трещин в стеновых панелях толщиной 280мм из газозолобетона плотностью 700 кг/м³ с модулем упругости 2500 МПа, необходимо керамзита или гранулированного шлака 70-80 %, а каменной крошки (или дробленого камня из гранита или мрамора) в пределах 50-60 % от объема ячеистого бетона в поверхностном слое 30-50 мм.

В практике жилищного строительства отделка ячеистобетонных панелей каменными дроблеными материалами широко использовалась с 1961 г. на Среднем Урале и в других регионах России.

Натурные исследования этой отделки, проведенные Уральским ПромстройНИИпроектом и Воронежским ИСИ на протяжении 25-40 лет, показали, что отделка каменным дробленным материалом в 1,5-2 раза уменьшает градиент вынужденных деформаций по сечению панелей из газозолобетона и газосиликата при изменении их влажности или карбонизации, и за этот период эксплуатации свойства отделки не ухудшились, на ней нет никаких трещин и дефектов и она не требует ремонта.

Библиографический список:

1. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
2. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов Ч.1/ Контекст проблемы и вопросы теории// Строительные материалы. 2014 №1. С.105-112.
3. Повышение долговечности конструкций и изделий из мелкозернистых ячеистых бетонов при эксплуатационных воздействиях / Силаенков Е.С., Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Гагиев М.А. Грозный, 2015. 355 с.
4. Силаенков Е.С. Повышение долговечности панелей из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1965. 215с.
5. Славчева Г.С., Чернышев Е.М. Алгоритм конструирования структуры цементных пенобетонов по комплексу задаваемых свойств// Строительные материалы. 2016. № 9. С. 58-64.
6. Батаев Д.К.-С., Гагиев М.А., Пинскер В.А., Чепурненко А.С. Теория расчета усадочных напряжений в ячеистобетонных стеновых панелях при карбонизационных процессах с учетом ползучести// Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 11-22.
7. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 417с.
8. Вишневецкий Г.Д. Об усадочных характеристиках бетонов. Труды ЛИСИ. 1952. Вып.13, С.112-117.
9. Лермит Р. Изменение объема бетона // Четвертый международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1964. С.475-485.
10. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
11. Гагиев М.А., Флорова М.Р. Карбонизация и ползучесть газозолобетона в панелях жилых зданий на среднем Урале. / Влияние климатических условий и режимов нагружения на деформации и прочность конструкционных бетонов и элементов железобетонных конструкций// Тбилиси. 1985. С.15-16.
12. Гагиев М.А. Релаксация напряжений в автоклавных ячеистых бетонах с учетом их старения вследствие карбонизации.// Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: Межвузовский сборник /КИСИ. Казань. 1985. С.44-46.
13. Релаксация сжимающих напряжений в мелкозернистом ячеистом бетоне/ Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Муртазаев С.-А.Ю., Гагиев М.А. // Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Грозный, 2015. С.166-171.
14. H.Samouh, E. V.Wishiewski, A.Loukili. Consequences of longer sealed curing on drying shrinkage, cracking and carbonation of concrete. Cement and Concrete Research, Volume 95, May 2017, P. 117-131.
15. G. Li, L. Dong, Zh. Bai, M. Lei, J. Du. Predicting carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects. Construction and Building Materials, Volume 142, 1 July 2017, P. 59-65.
16. E. Possan, W.A. Thomaz, G.A. Aleandri, E.F. Felix, A.C.P. dos Santos. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation. A case study. Case Studies in Construction Materials, Volume 6, June 2017, P. 147-161.
17. V.L. Та, S. Bonnet, T.S. Kiese, A. Ventura. A new meta model to calculate carbonation front depth within concrete structures. Construction and Building Materials, Volume 129, 30 December 2016, P. 172-181.
18. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. Construction and Building Materials, Volume 127, 30 November 2016, P. 306-320.
19. Х. Шугуан, В.Ф. Чжоу. Легкие бетоны: Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 304 с.
20. Ю. Юань, В. Лин, Т. Пе. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. – Москва: Издательство АСВ, 2014. – 448 с.

References:

1. Silaenkov E.S. Dolgovechnost' izdeliy iz yacheistykh betonov. M.: Stroyizdat; 1986. 176 s. [Silaenkov E.S. Durability of cellular concrete products. Moscow: Stroyizdat; 1986. 176 p. (in Russ.)]
2. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Upravlenie ekspluatatsionnoy deformiruemost'yu i treshchinostoykost'yu makroporistykh (yacheistykh) betonov Ch.1. Kontekst problemy i voprosy teorii. Stroitel'nye materialy. 2014;1:105-112. [Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Exploitational deformation and crack-resistance management of macroporous (cellular) concretes. Part 1. Problem's context and theoretical questions. Stroitel'nye materialy. 2014;1:105-112. (in Russ.)]
3. Silaenkov E.S., Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. Povyshenie dolgovechnosti konstruksiy i izdeliy iz melkozernistykh yacheistykh betonov pri ekspluatatsionnykh vozdeystviyakh. Grozny; 2015. 355 s. [Silaenkov E.S., Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. The increase of durability of thin-grain cellular concrete constructions and products during exploitational impacts. Grozny; 2015. 355 p. (in Russ.)]
4. Silaenkov E.S. Povyshenie dolgovechnosti paneley iz yacheistykh betonov. M.: Stroyizdat; 1965. 215 s. [Silaenkov E.S. The increase of durability of cellular concrete panels. Moscow: Stroyizdat; 1965. 215 p. (in Russ.)]
5. Slavcheva G.S., Chernyshev E.M. Algoritm konstruirovaniya struktury tsementnykh penobetonov po kompleksu zadavaemykh svoystv. Stroitel'nye materialy. 2016;9:58-64. [Slavcheva G.S., Chernyshev E.M. Algorithm of construction of cement aerated concrete structure based on a set of pre-defined properties. Stroitel'nye materialy. 2016;9:58-64. (in Russ.)]
6. Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Teoriya rascheta usadochnykh napryazheniy v yacheistobetonnykh stenovykh panyakh pri karbonizatsionnykh protsessakh s uchetom polzuchesti. Vestnik MGSU. 2016;12:11-22. [Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Computational theory of shrinking stresses in cellular concrete wall panels during carbonation processes accounting for creep. Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture. 2016;12:11-22. (in Russ.)]
7. Aleksandrovskiy S.V. Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmeneniya temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti. M.: Stroyizdat; 1973. 417 s. [Aleksandrovskiy S.V. Calculaton of concrete and iron-concrete constructions during temperature and humidity alterations accounting for creep. Stroyizdat; 1973. 417 p. (in Russ.)]
8. Vishnevetskiy G.D. Ob usadochnykh kharakteristikakh betonov. Trudy LISI. 1952;13:112-117. [Vishnevetskiy G.D. About the concrete's shrinkage chatacteristics. Work collection of LISI (Leningrad Engineering - Building Institute). 1952;13:112-117. (in Russ.)]
9. Lermi R. Izmenenie ob"ema betona. Chetvertyy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa. M.: Stroyizdat; 1964. S.475-485. [Lermi R. Concrete's volume alteration. The 4th International congress on cement chemistry. Moscow: Stroyizdat; 1964. P. 475-485. (in Russ.)]
10. Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov. M.: Stroyizdat; 1979. 344 s. [Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. tructure and properties of cement concretes. Moscow: Stroyizdat; 1979. 344 p. (in Russ.)]
11. Gaziev M.A., Florova M.R. Karbonizatsiya i polzuchest' gazozolobetona v panyakh zhilykh zdaniy na srednem Urale. Vliyanie klimaticheskikh usloviy i rezhimov nagruzheniya na deformatsii i prochnost' konstruksionnykh betonov i elementov zhelezobetonnykh konstruksiy. Tbilisi; 1985. S.15-16. [Gaziev M.A., Florova M.R. Carbonation and creep of gas-ash concrete in panels of the Middle Ural's domestic buildings. Climate conditions and loading modes impact onto deformation and strength of constructional concretes and iron-concrete construction elements. Tbilisi; 1985. P.15-16. (in Russ.)]
12. Gaziev M.A. Relaksatsiya napryazheniy v avtoklavnykh yacheistykh betonakh s uchetom ikh stareniya vsledstvie karbonizatsii. Rabotosposobnost' kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov. Mezhvuzovskiy sbornik KISI. Kazan'. 1985. S. 44-46. [Gaziev M.A. Stress relaxation in autoclave cellular concretes taking into account their ageing due to carbonation. Operability of composite building materials under the conditions of various exploitation factors. Inter-University work collection of KISI. Kazan'. 1985. P. 44-46. (in Russ.)]
13. Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Murtazaev S-A.Yu., Gaziev M.A. Relaksatsiya szhimayushchikh napryazheniy v melkozernistom yacheistom betone. Covremennye stroitel'nye materialy, tekhnologii i konstruksii. Grozny; 2015. S.166-171. [Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Murtazaev S-A.Yu., Gaziev

- M.A. Compressing stress relaxation in fine-grained cellular concrete. Modern building materials, technologies and constructions. Grozny; 2015. P.166-171. (in Russ.)
14. Samouh H., Wishiewski E. V., Loukili A. Consequences of longer sealed curing on drying shrinkage, cracking and carbonation of concrete. Cement and Concrete Research. 2017;95:117-131.
 15. Li G., Dong L., Bai Zh., Lei M., Du J.. Predicing carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects. Construction and Building Materials. 2017;142:59-65.
 16. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., dos Santos A.C.P. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation. A case study. Case Studies in Construction Materials. 2017;6:147-161.
 17. Ta V.L., Bonnet S., Kiese T.S., Ventura A.. A new meta model to calculate carbonation front depth within concrete structures. Construction and Building Materials. 2016;129:172-181.
 18. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. Construction and Building Materials. 2016;127:306-320.
 19. Shuguan Kh., Chzhou V.F. Legkie betony. M.: Izdatel'stvo ASV; 2016. 304 s. [Shuguan Kh., Chzhou V.F. Light concretes. Moscow: Izdatel'stvo ASV; 2016. 304 p. (in Russ.)]
 20. Yuan' Yu., Lin V., Pe T. Vysokokachestvennyy tsementnyy beton s uluchshennymi svoystvami. Moskva: Izdatel'stvo ASV; 2014. 448 s. [Yuan' Yu., Lin V., Pe T. High-quality cement concrete with improved properties. Moscow: Izdatel'stvo ASV; 2014. 448 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Апкаров Шамиль Идрисович – аспирант.

Батаев Дена Карим-Султанович – доктор технических наук, профессор.

Газиев Минкаил Ахметович – кандидат технических наук, доцент.

Мажиев Хасан Нажоевич – доктор технических наук, профессор.

Information about the author:

Shamil' I.Apkarov -Postgraduate Student.

Dena K.-S.Bataev - Dr. Sci. (Technical), Prof.

Minkail A.Gaziev - Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof.,

Khasan N.Mazhiev - Dr. Sci. (Technical), Prof.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 31.05.2017.

Принята в печать 16.06.2017.

Conflict of interest.

Received 31.05.2017.

Accepted for publication 16.06.2017.

Для цитирования: Дибиргаджиев А.М., Муртазалиев Г.М., Чикаев М.А. Разновидности энергетического метода исследования устойчивости конструкции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):162-172. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-162-172

For citation: Dibirgadzhiyev A.M., Murtazaliev G.M., Chikaev M.A. Variations of the energy method for studying construction stability. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(2):162-172. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-162-172

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

РАЗНОВИДНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИИ

УДК 539.3:624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-162-172

Дибиргаджиев А.М.², Муртазалиев Г.М.¹, Чикаев М.А.³
Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,
¹e-mail: murtazaliev.gelani@mail.ru,
²e-mail: d.a.m.-001@mail.ru,
³e-mail: chikaev.magomed@mail.ru

Резюме. Цель. Целью работы является поиск наиболее рациональной формы выражения потенциальной энергии нелинейной системы с последующим использованием алгебраических средств и геометрических образов теории катастроф для изучения поведения конструкции под нагрузкой. Исследуются различные формы критериев устойчивости равновесных состояний конструкций. Рассматриваются некоторые аспекты использования различных форм выражений полной энергии системы, ориентированные на последующее использование методов теории катастроф для решения нелинейных задач расчета конструкций, связанных с разрывными явлениями. **Метод.** По форме записи выражения потенциальной энергии устанавливается связь математического описания решаемой задачи с конкретной катастрофой универсального характера из списка катастроф, после чего поведение рассматриваемой системы может быть предсказано на основе фундаментальных положений, сформулированных в теории катастроф, без интегрирования соответствующей системы нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка в частных производных, к которой сводится решение такого рода задач. **Результат.** Представлен в виде единых геометрических образов, содержащих всю необходимую качественную и количественную информации о деформировании под нагрузкой целых классов конструкции для широкого диапазона изменения значений внешних (управляющих) и внутренних (поведенческих) параметров. **Вывод.** Методы теории катастроф являются эффективным математическим инструментарием при решении нелинейных краевых задач с параметрами, связанных с разрывными явлениями, труднее поддающимся анализу традиционными методами. Но они пока не получили должного внимания со стороны исследователей, особенно в области расчетов на устойчивость, остающейся сложной, актуальной и привлекательной проблемой механики конструкций. Для решения конкретной нелинейной краевой задачи расчета конструкций алгебраическими средствами и геометрическими образами теории катастроф установлена связь математического описания решаемой задачи, характеризующее функционалом разновидности энергетического метода с универсальными задачами, решаемыми на основе фундаментальных положений теории катастроф. Данная работа призвана к возрождению интереса к методам теории катастроф и их использованию для решения различных задач.

Ключевые слова: устойчивость, равновесие, деформация, энергетический критерий, ветвление решений, теория катастроф

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

VARIATIONS OF THE ENERGY METHOD FOR STUDYING CONSTRUCTION
STABILITY

Anvar M. Dibirgadzhiyev², Gelani M. Murtazaliev¹, Magomed A. Chikaev³

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

¹e-mail: murtazaliev.gelani@mail.ru,

²e-mail: d.a.m.-001@mail.ru,

³e-mail: chikaev.magomed@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the work is to find the most rational form of expression of the potential energy of a nonlinear system with the subsequent use of algebraic means and geometric images of catastrophe theory for studying the behaviour of a construction under load. Various forms of stability criteria for the equilibrium states of constructions are investigated. Some aspects of the using various forms of expression of the system's total energy are considered, oriented to the subsequent use of the catastrophe theory methods for solving the nonlinear problems of construction calculation associated with discontinuous phenomena. **Methods** According to the form of the potential energy expression, the mathematical description of the problem being solved is linked to a specific catastrophe of a universal character from the list of catastrophes. After this, the behaviour of the system can be predicted on the basis of the fundamental propositions formulated in catastrophe theory without integrating the corresponding system of nonlinear differential equations of high order in partial derivatives, to which the solution of such problems is reduced. **Results** The result is presented in the form of uniform geometric images containing all the necessary qualitative and quantitative information about the deformation of whole construction classes under load for a wide range of changes in the values of external (control) and internal (behavioural) parameters. **Conclusion** Methods based on catastrophe theory are an effective mathematical tool for solving non-linear boundary-value problems with parameters associated with discontinuous phenomena, which are poorly analysable by conventional methods. However, they have not yet received due attention from researchers, especially in the field of stability calculations, which remains a complex, relevant and attractive problem within structural mechanics. To solve a concrete nonlinear boundary value problem for calculating structures by algebraic means and using geometric images of catastrophe theory, it is necessary to establish the connection between the mathematical description of the problem being solved, characterised by the functional of the variety of the energy method and universal problems solved on the basis of the fundamental provisions of catastrophe theory. Present work is an effort to revive interest in the methods of catastrophe theory and their use for solving various problems.

Keywords: stability, equilibrium, deformation, energy criterion, branching of solutions, catastrophe theory

Введение. Основным принципом аналитической механики, справедливым как для консервативных, так и для неконсервативных систем, работающих в упругой или пластической области, является принцип возможных перемещений [1-4]. В случае консервативных систем данный принцип сводится к энергетическому принципу Лагранжа, строго доказанному Лежен-Дерихле: если в положении изолированного равновесия консервативной системы потенциальная энергия имеет минимум, это положение равновесия системы устойчиво.

Полная потенциальная энергия упругой системы \mathcal{E} (с точностью до постоянного слагаемого) складывается из потенциальной энергии деформации системы U и потенциала внешних сил Π :

$$\mathcal{E}=U+\Pi \quad (1)$$

В качестве начала отсчета функции $\Delta\mathcal{E}$ выбирается либо нулевая точка пространства обобщенных перемещений, либо деформированное исходное равновесное состояние системы, которое каждый раз должно быть специально оговорено. В виду своей фундаментальности, соответствующее (1) выражение может иметь большое разнообразие записей.

Постановка задачи. Энергетический подход является основой для решения задач равновесия, изучения устойчивости равновесия и послекритического поведения конструкций.

Этот подход является также основой к использованию методов, средств и образов теории катастроф, поскольку основываются на выражении потенциальной функции, совпадающей с выражением полной потенциальной энергии системы, по виду которой устанавливаются основные особенности поведения системы под нагрузкой.

Так же как решение многих прикладных задач становится ясным и понятным при его сведении к известному виду систем уравнений, так и по виду выражения потенциальной энергии можно предсказать поведение системы при изменении внешних и внутренних параметров системы на основе геометрических образов элементарных катастроф [1, 13-19, 25].

Методы исследования. Традиционный метод исследования устойчивости равновесных состояний, вытекающий из указанного принципа, основан на анализе изменения полной потенциальной энергии системы $\Delta\mathcal{E}$ при ее переходе из исходного положения в смежное бесконечно близкое положение: если потенциальная энергия в смежном положении больше потенциальной энергии в исходном положении, то последнее устойчиво; если меньше – то неустойчиво; если приращение полной потенциальной энергии системы при указанном переходе равно нулю имеет место случай безразличного равновесия.

Как известно, энергетический критерий устойчивости может быть записан в различных формах. В основном он записывается по форме С.П.Тимошенко и по форме Дж. Брайана [5].

Разница между указанными формами заключается в том, что при записи энергетического критерия в форме С.П. Тимошенко $\Delta\mathcal{E}$ выражается непосредственно через внешние нагрузки, а в форме Дж. Брайана $\Delta\mathcal{E}$ выражается через внутренние усилия основного состояния.

Схематично сказанное представлено на рис 1.



Рис.1. Возможные схемы записи энергетического критерия
Fig.1. Possible schemes for recording the energy criterion

Схема А соответствует записи энергетического критерия в форме С.П.Тимошенко, схема Б – в форме Дж. Брайана.

При решении нелинейных задач по определению напряженно – деформированного состояния основного процесса, когда учитываются изменения, происходящие в докритическом состоянии, с последующим исследованием устойчивости каждого достигнутого равновесного состояния, предпочтительна запись энергетического критерия в форме Дж.Брайана [6].

В обеих указанных формах подсчитывается изменение полной потенциальной энергии $\Delta\mathcal{E}$ рассматриваемой системы при переходе ее из основного в смежное, в бесконечно близкое к нему, побочное (вторичное) равновесное состояние.

Рассмотрим основные моменты общего алгоритма решения задач для описания возмущенного состояния равновесия, смежного с начальным невозмущенным состоянием. Восполь-

зуюемся представлением перемещений в виде ряда разложенного по степеням малого параметра α , не зависящим от координат и сохраним слагаемые до α^2 :

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \alpha u_1 + \alpha^2 u_2; \\ v &= v_0 + \alpha v_1 + \alpha^2 v_2; \\ w &= w_0 + \alpha w_1 + \alpha^2 w_2; \end{aligned} \quad (2)$$

где, $u_0 = u_0(x, y, z)$; $v_0 = v_0(x, y, z)$; $w_0 = w_0(x, y, z)$; — перемещения точек тела в начальном невозмущенном состоянии равновесия; — $u_1 = u_1(x, y, z)$; $v_1 = v_1(x, y, z)$; $w_1 = w_1(x, y, z)$; $u_2 = u_2(x, y, z)$; $v_2 = v_2(x, y, z)$; $w_2 = w_2(x, y, z)$; — конечные функции координат.

Компоненты напряженно-деформированного состояния, представим также с точностью до слагаемых, имеющих множитель α^2 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + \alpha \varepsilon_x' + \alpha^2 \varepsilon_x''; \\ &\dots\dots\dots \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^0 + \alpha \gamma_{xy}' + \alpha^2 \gamma_{xy}'' \end{aligned} \quad (3)$$

Компоненты деформаций и напряжений в начальном состоянии $\varepsilon_{x, \dots, y}^0, \gamma_{xy}^0$, определяются в зависимости от характера решаемой исходной задачи - линейной или нелинейной. Компоненты с коэффициентом α определяют возникшую новую побочную равновесную ветвь, начало которой находится (в общем случае) в точке ветвления решений исходной системы уравнений. Компоненты с коэффициентом α^2 характеризуют начальный этап посткритического (послебифуркационного) поведения конструкций.

Обсуждение результатов. Такой алгоритм решения задачи соответствует принятой в теории ветвления решений нелинейных уравнений схеме [20] и использован в работах [6-12, 21-23] для решения конкретных нелинейных краевых задач и заключается в решении трех взаимосвязанных и последовательных этапов:

- решение исходной нелинейной краевой задачи и определение возможных форм равновесия, последующее выделение реальных состояний от нереальных и определение способов перехода от одной возможной формы к другой – теория существования;
- определение внешних (управляющих) параметров, при которых происходит ветвление равновесных форм исходного состояния, отыскание числа новых решений и их кратности и установление вида этих форм – теория кратности;
- определение характера начального этапа послекритического поведения – спектральная теория.

В соответствии с этим, исследование поведения под нагрузкой различных конструкций, названное автором работы [6] общей нелинейной краевой задачей, условно разбито на три этапа, в каждом из которых решаются отдельные, но последовательные и взаимосвязанные задачи, позволяющие, в конечном итоге, выявить все характерные особенности их деформирования в широком диапазоне изменения внешних (управляющих) и внутренних (поведенческих) параметров. Каждый из указанных этапов, в зависимости от поставленных целей, может рассматриваться и как отдельная задача.

В конечном итоге, нужно установить зависимость вида [2]:

$$P/P_{кр} = 1 + C_1 \alpha + C_2 \alpha^2 + \dots \quad (4)$$

По знакам коэффициентов C_1 и C_2 может быть предсказан глобальный характер послекритического поведения конструкции, ее чувствительность к несовершенствам и соотношение между критической и предельной нагрузками для рассчитываемой конструкции.

Наиболее подходящим алгоритмом решения этих задач является использование разновидности энергетического метода с последующим использованием алгебраических средств и геометрических образов теории катастроф.

О наличии катастрофы в семействе потенциальных функций, которыми описывается поведение системы можно судить по основным признакам катастроф, или «флагам катастроф» к числу которых, относятся [1-4, 15-19]:

- модальность – свойство системы, характеризующее тем, что при конкретных значениях управляющих параметров возможно несколько положений равновесия системы;
- недостижимость – в системе имеется одно из положений равновесия, которое не достигается и не наблюдается (существует область недостижимых неустойчивых состояний равновесия, к которым нельзя прийти, выходя из каких-либо устойчивых состояний);
- катастрофические скачки – внезапные переходы системы из одного положения равновесия в другое (малые изменения в значениях управляющих параметров могут вызвать большие изменения в значениях переменных состояния системы по мере того, как система перескакивает из одного локального минимума в другой);
- расходимость – небольшое вначале изменение пути в пространстве параметров, приводит к существенному конечному состоянию системы (малые изменения заданных начальных значений переменных состояния могут привести к серьезным изменениям конечных значений этих переменных);
- гистерезис – переход системы из одного состояния в другое и обратно происходит при разных значениях управляющих параметров.

Если в ходе анализа системы зафиксирован один из признаков катастрофы, то, изменяя ее управляющие параметры, можно обнаружить и остальные.

Классификация потенциальных функций – элементарных катастроф, их основные алгебраические свойства и характеристики поведения представлены в таблице 1 [25]. Так же могут быть представлены и соответствующие им геометрические образы.

В работах [6-10, 21-24] на основе такого алгоритма решены несколько разновидностей нелинейных краевых задач, касающихся расчета тонкостенных систем, в которых может произойти потеря устойчивости равновесных состояний.

Таблица 1. Классификация потенциальных функций (катастроф), свойства и характеристики поведения

Table 1. Classification of potential functions (catastrophes), properties and characteristics behavior

Тип катастроф	Число параметров	Канонические уравнения	Поверхность равновесия	Множество сингулярности	Бифуркационное множество
Складка	$l=1 \quad k=1$	$V(x, u) = x^3 + ux$	$M: 3x^2 + u = 0$	$S: 6x = 0, x = 0$	$U = 0$
Сборка	$l=1 \quad k=1$	$V(x, u, v) = x^4 - ux^2 + vx$	$M: 4x^2 - 2ux = 0$	$S: 12x^2 - 2u = 0$	$B: 8u^3 - 27v^2 = 0$
Ласточкин хвост	$l=1 \quad k=3$	$V = x^5 + ux^3 + vx + \omega x$	$M: 5x^4 + 3ux^2 - 2vx + \omega = 0$	$S: 20x^3 + 6ux + 2v = 0$	$B: \exists x: 5x^4 + 3ux^2 + 2vx + \omega = 0$ $20x^3 + 6ux + 2v = 0$
Бабочка	$l=1 \quad k=4$	$V = \pm x^6 + ux^4 + ux^3 + ux^2 + ux$	$M: = 6x^5 + 3ux^2 - 2vx^3 + \omega$	$S: 30x^4 + 12tx^2 + 6ux + 2v = 0$	$B: \exists x: 7x^5 + 4tx^3 + 3ua^2 + 2vx + \omega = 0$ $30x^4 + 12tx^2 + 6ux + 2v = 0$
Вигвам	$l=1 \quad k=5$	$V = x^7 + a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x$	$M: = 7x^6 + 5a_1x^4 + 4a_2x^3 + 3a_3x^2 + 2a_4x + a_5$	$S: 42x^5 + 20a_1x^3 + 12a_2x^2 + 6a_3x + 2a_4 = 0$	$B: \exists x: 7x^6 + 5a_1x^4 + 4a_2x^3 + 3a_3x^2 + 2a_4x + a_5 = 0$ $42x^5 + 20a_1x^3 + 12a_2x^2 + 6a_3x + 2a_4 = 0$
Гиперболическая омбионика	$l=2 \quad k=3$	$V(x, y, u, \omega) = x^3 + y^3 + \omega xy - ux - vy$	$M: \begin{cases} 3x^2 + \omega y - u = 0 \\ 3y^2 + \omega x - v = 0 \end{cases}$	$S: \det \begin{vmatrix} 6x & \omega \\ \omega & 6y \end{vmatrix} = 0$ $= 36xy - \omega^2 = 0$	$B: \exists (x, y): u = + 3x^2 + \omega y$ $v = 3x^2 + \omega x + \omega^2 + 36xy$
Эллиптическая омбионика	$l=2 \quad k=3$	$V = \frac{x^3}{3} + xy^3 + \omega(x^2 + y^2) - ux - vy$	$M: \begin{cases} x^2 + y^2 - \omega x - u = 0 \\ -2xy^2 + 2\omega y - v = 0 \end{cases}$	$S: \det \begin{vmatrix} 2x + 2\omega & -2y \\ -2y & -2x + 2\omega \end{vmatrix} = 0$ $\Leftrightarrow x^2 + x^2 = \omega^2$	$B: \exists (x, y): u - x^2 - y^2 + 2\omega x$ $v = 2xy + 2\omega y$ $\omega^2 = x^2 + y^2$
Параболическая омбионика	$l=2 \quad k=4$	$V = x^2y^2 + y^4 + \omega x^2 + ty^2 - ux - vy$	$M: \begin{cases} 2xy + 2\omega x - u = 0 \\ x^2 + 4y^3 + 2ty - v = 0 \end{cases}$	$S: \det \begin{vmatrix} 2x + 2\omega & -2y \\ 2x & -12y + t \end{vmatrix} = 0$ $\Leftrightarrow x^2 = (y + \omega)(y^2 + t^2)$	$B: \exists (x, y): 2xy + 2\omega x - u = 0$ $x^2 + 4y^3 + 2ty - v = 0$ $x^2 = (y + \omega)(y^2 + t^2)$

u, v – параметры; ω – устойчивость; t – время.

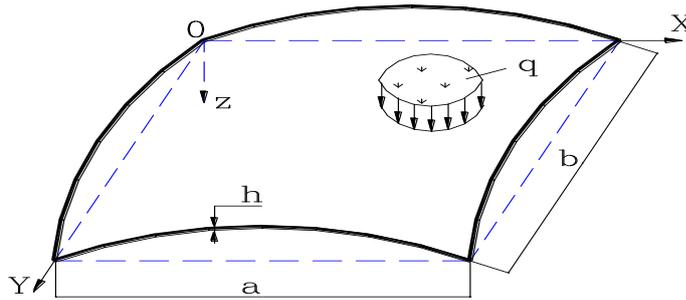


Рис. 2. Геометрия и схема загрузки оболочки
Fig. 2. Geometry and scheme of loading the shell

В качестве примера рассмотрим геометрическую нелинейную задачу расчета свободно опертой по контуру полой сферической оболочки при действии осесимметричной равномерной нагрузки интенсивности q (рис.2). Для решения задачи воспользуемся энергетическим методом. Полная потенциальная энергия \mathcal{E} системы равна сумме потенциальных энергий изгиба U_b , растяжения-сжатия срединной поверхности оболочки U_m и потенциала внешних сил Πq :

$$\mathcal{E} = U_b + U_m + \Pi q, \quad (5)$$

Слагаемые U_b , U_m , Πq определяются по формулам:

$$U_b = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left[(\nabla^2 W)^2 - 2(1 - \mu) \cdot L(W, W) \right] dx dy; \quad (6)$$

$$U_m = \frac{1}{2Eh} \int_0^a \int_0^b \left[(\nabla^2 F)^2 - 2(1 + \mu) \cdot L(F, W) \right] dx dy; \quad (7)$$

$$\Pi = - \int_0^a \int_0^b q \cdot W \cdot dx dy; \quad (8)$$

где, W , F – функции прогибов и усилий;

E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки;

$D = Eh^2 / (12(1 - \mu^2))$ – цилиндрическая жесткость;

$$\nabla^2() = \frac{\partial^2()}{\partial x^2} + \frac{\partial^2()}{\partial y^2}; \quad (9)$$

$$\nabla_k^2() = k_1 \cdot \frac{\partial^2()}{\partial x^2} + k_2 \cdot \frac{\partial^2()}{\partial y^2}; \quad (10)$$

$$L(W, F) = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}; \quad (11)$$

$$L(W, W) = 2 \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Примем (в первом приближении) аппроксимирующую функцию прогибов W в виде, удовлетворяющей граничным условиям шарнирного –опирания оболочки с одним произвольным параметром A , представляющим прогиб в центре оболочки, подлежащий определению:

$$W(x, y) = A \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right); \quad (13)$$

Подставив (13) в (6-8), вычислив эти интегралы, используя известную процедуру П.Ф. Папковича и просуммировав по (5) получим следующее выражение полной потенциальной энергии \mathcal{E} для случая квадратной в плане оболочки (при $a=b$):

$$\mathcal{E} = \frac{2\pi^2 Eh}{9a} A^4 - \frac{\pi^2 Eh}{6Ra^2} A^3 + \frac{D\pi^6}{8a^4} A^2 + \frac{\pi^2 Eh}{32R^2} A - qA; \quad (14)$$

Из условия стационарности (14) получим кубическое уравнение, связывающее внешние (управляющие) параметры с внутренним (поведенческим) параметром A :

$$\frac{8\pi^2 Eh}{9a^4} A^3 - \frac{\pi^2 Eh}{2Ra^2} A^2 + \left(\frac{D\pi^6}{4a^4} + \frac{\pi^2 Eh}{16R^2}\right) A = q. \quad (15)$$

Обычно для установления связи A от q строятся кривые зависимости (15) представляющие кривые равновесных состояний для различных значений кривизны k оболочки, определяя каждую точку каждой кривой по уравнению (15), что является довольно трудоемкой численной процедурой, к тому же связанная с возможной расходимостью процесса при приближении значения нагрузки к предельной.

Выражение полной энергии (13) в терминах теории катастроф соответствует каноническому уравнению элементарной катастрофы сборки (табл.1).

Используя безразмерные параметры $u=A/h$ и $P=qa^4/Eh^4$ и подстановку $u=v+1,125k/3$ приведем (15) к каноническому виду:

$$v^3 - (0,140625k^2 - 2,50882) v + 0,94081k - 0,11399P = 0, \quad (16)$$

В терминах теории катастроф выражение (16) соответствует двумерному многообразию канонической катастрофы сборки – сборки Уитни [1, 6, 15-19, 25], представляемое единой геометрической картиной (рис.3), содержащей все качественные и количественные характеристики поведения оболочки.

Внутри области 3, имеющей форму сборки, функция энергии \mathcal{E} имеет три изолированные критические точки, в области I – всего одну, вдоль кривых складок 2 и 2' – две вырожденные критические точки, причем вдоль кривой 2 совпадают два значения соответствующие верхним, а вдоль кривой 2' – два значения нижних критических нагрузок (рис. 3 и 4).

Для вычисления координат точки O – начала сборки (рис.3) продифференцируем уравнение (16) два раза подряд:

$$3v^2 - 0,140625k^2 + 2,50882 = 0; \quad (17)$$

$$6v = 0 \quad (18)$$

Решив полученную систему уравнений (16) - (18) в обратном порядке, получим следующие значения координат точки O:

$$u_0 = 1,58392; \quad k_0 = 4,22380; \quad P_0 = 34,8609. \quad (19)$$

Эти значения хорошо согласуются с известными в литературе данными [3].

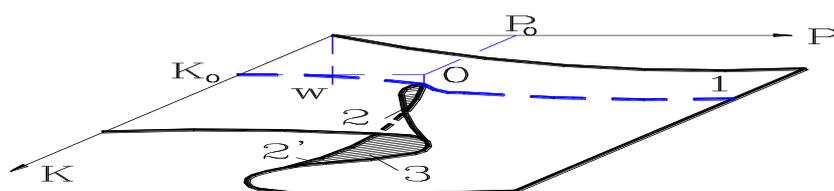


Рис. 3. Многообразие катастрофы сборки – поверхность равновесных состояний оболочек
Fig. 3. The variety of the catastrophe of assembly - the surface of the equilibrium states of the shells

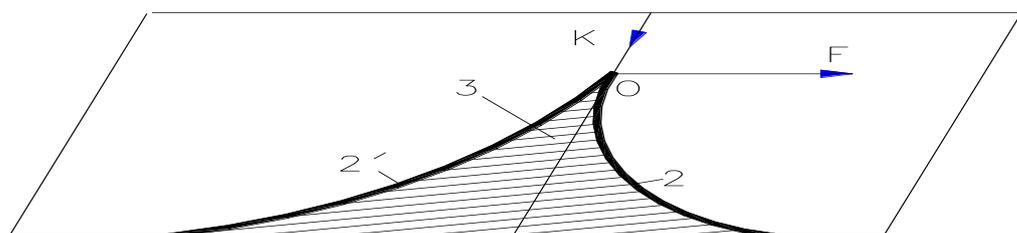


Рис.4. Отображение катастрофы сборки на плоскость управляющих параметров K и F
Fig.4. Displays the catastrophe of the assembly on the plane of the control parameters K and F

Как видно, использование алгебраических средств и геометрических образов теории катастроф позволяет получить, представить и интерпретировать в единообразной, наглядной и компактной форме наиболее ценные и важные результаты решения конкретных задач, охватывающие полную картину процесса сложного нелинейного поведения целых классов различных видов конструкций, которые обычно рассматриваются разрозненно, с разных точек зрения и требуют получения и обработки большого объема численных данных.

Вывод. Наличие широкого комплекса пакетов прикладных программ для численного решения линейных и нелинейных задач расчета конструкций не исключает необходимости поиска эффективных, хотя и приближенных, аналитических методов решения нелинейных краевых задач с параметрами, связанными с разрывными явлениями, которые трудно анализировать традиционными математическими методами. Одной из эффективных теорий для решения таких задач является теория катастроф.

Для решения конкретной нелинейной краевой задачи расчета конструкций алгебраическими средствами и геометрическими образами теории катастроф следует установить связь математического описания решаемой задачи, характеризуемую функционалом разновидности энергетического метода с универсальными задачами, решаемыми на основе фундаментальных положений теории катастроф.

В этой формулировке содержится алгоритм решения нелинейных краевых задач методами теории катастроф.

Не заменяя численные методы, обладающие большими возможностями для решения инженерных задач, аналитические методы теории катастроф эффективны в изучении разрывных явлений.

В ближайшем будущем, эффективным математическим инструментарием для решения нелинейных краевых задач не только механики конструкции, связанных с необходимостью анализа разрывных явлений, станут средства и образы теории катастроф, не получившие пока должного внимания, но обретающие широкую популярность.

Библиографический список:

1. Постон Т. Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980. 607с.
2. Koiter W. T. The non-linear buckling problem of a complete spherical shell under uniform external pressure.- Proc. K. ned. Akad. Wet., Ser., B, 1969 72, p. 40.
3. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Наука, 1967. - 984с.
4. Thomson J. M. T., Hunt G. W. Elastic Instability Phenomena.- London: Wiley, 1984.
5. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1991. - 336 с.
6. Муртазалиев Г.М. Методы теории катастроф в задачах устойчивости оболочек. ДГТУ. Махачкала 2004. -200с.
7. Mukharlyamov R. G., Amabili M., Garziera R., Riabova K. Устойчивость нелинейных колебаний пологих оболочек двойной кривизны // Вестн. РУДН. сер. Мат. Информат. Физ.— 2016 № 2.— С. 53-63.
8. Баженов В. А., Кривенко О. П., Соловей Н. А. Нелинейное деформирование и устойчивость упругих оболочек неоднородной структуры. Модели, методы, алгоритмы, малоизученные и новые задачи. — Москва: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013. — 329 с.
9. Баженов В. Г., Гоник Е. Г., Кибец А. И., Шошин Д. В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагружениях / Прикладная механика и техническая физика— 2014 т. 55 № 1.— С. 13-22.
10. Ганеева М. С., Моисеева В. Е. Нелинейный изгиб и устойчивость сферических и эллипсоидальных оболочек при неосесимметричном нагружении / Пробл. прочн. и пластич.— 2013 № 75 ч. 2.— С. 105-114.
11. Малых К. С., Новичков А. А., Придатыко И. С. Устойчивость сферических оболочек с учетом начальных неправильностей формы / Молодежь. Техника. Космос: Труды 6 Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 19-21 марта, 2014.— 2014.— С. 62-64.
12. Петров В. В., Кривошеин И. В. Влияние неоднородности материала на устойчивость нелинейно деформируемых пологих оболочек двоякой кривизны / Вестн. СГТУ.— 2014 № 4.— С. 20-25.
13. Пикуль В. В. Устойчивость оболочек / Пробл. машиностр. и автоматиз.— 2012 № 2.— С. 81-87.
14. Семко В. В., Кривошеин И. В. / Моделирование влияния вида граничных условий на устойчивость нелинейно деформируемых пологих оболочек / Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-26): Сборник трудов 26 Международной научной конференции, Нижний Новгород, 27-30 мая, —2013.— С. 53-55.
15. Арнольд В.И. Теория катастроф//Издание четвертое, дополненное - Москва: Ленанд, 2016 - с.134.
16. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф: Учебное пособие для студентов вузов. — Москва: Издательство "Высшая школа", 2005. — 327с.
17. Postle D. Calastrophe Theory.- London: Fontana, 1980.
18. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2 кн. – М.: Наука, 1990. Кн.1.- 350с.
19. Томпсон Д.М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. – М.: Мир, 1985. 256с.
20. Келлер Дж. Б., Антман С. Теория ветвления и нелинейные задачи на собственные значения. М.: Мир, 1974. 254с.
21. Муртазалиев Г.М. К расчету гибких оболочек методами теории катастроф // Прочность и надежность сооружений: Сб. научных тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.-М: Стройиздат, 1989.-С34-41.
22. Муртазалиев Г.М. К использованию методов теории катастроф для анализа поведения цилиндрических панелей переменной толщины // Деп. в ВИНТИ 24.09.92, N 2839 – В92.
23. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М., Гусейнова С.В. Геометрические образы теории катастроф в нелинейных задачах //Теория сооружений: достижения и проблемы: сборник статей по материалам всероссийской научно-практической конференции, 19-20 ноября 2012г. Махачкала/ ДГТУ. – Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2012.-126с.
24. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М. Методы теории катастроф в механике конструкций //Теория сооружений: достижения и проблемы: сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, 27-28 ноября 2015г. Махачкала/ ДГТУ. – Махачкала: Типография RIZO-PRESS, 2015.-132с.

25. Бородин А.И., Новикова Н.Н., Шаш Н.Н. Применение синергетических методов и теории катастроф // Журнал “Эффективное антикризисное управление”. - №2(89)/2015.-с. 84-90.

References:

1. Poston T., Stuart I. Teoriya katastrof i ee prilozheniya. M.: Mir; 1980. 607 s. [Poston T., Stuart I. Catastrophe theory and its applications. Moscow: Mir; 1980. 607 p. (in Russ.)]
2. Koiter W.T. The non-linear buckling problem of a complete spherical shell under uniform external pressure. Proc. K. ned. Akad. Wet., Ser. B. 1969;72:40.
3. Vol'mir A.S. Ustoychivost' deformiruemykh sistem. M.: Nauka; 1967. 984 s. [Vol'mir A.S. Stability of deforming systems. Moscow: Nauka; 1967. 984 s. (in Russ.)]
4. Thomson J. M. T., Hunt G. W. Elastic Instability Phenomena. London: Wiley; 1984.
5. Alfutov N.A. Osnovy rascheta na ustoychivost' uprugikh sistem. M.: Mashinostroenie; 1991. 336 s. [Alfutov N.A. Calculation fundamentals for stability of elastic systems Osnovy rascheta na ustoychivost' uprugikh sistem. Moscow: Mashinostroenie; 1991. 336 p. (in Russ.)]
6. Murtazaliev G.M. Metody teorii katastrof v zadachakh ustoychivosti obolochek. DGTU. Makhachkala; 2004. 200 s. [Murtazaliev G.M. Methods of catastrophe theory in shell stability problems. DGTU. Makhachkala; 2004. 200 p. (in Russ.)]
7. Mukharlyamov R. G., Amabili M., Garziera R., Riabova K. Ustoychivost' nelineynykh kolebaniy pologikh obolochek dvoynoy krivizny. Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Matematika. Informatika. Fizika. 2016;2:53-63. [Mukharlyamov R. G., Amabili M., Garziera R., Riabova K. Stability of non-linear vibrations of doubly curved shallow shells. RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics. 2016;2:53-63. (in Russ.)]
8. Bazhenov V. A., Krivenko O. P., Solovey N. A. Nelineynoe deformirovanie i ustoychivost' uprugikh obolochek neodnorodnoy struktury. Modeli, metody, algoritmy, maloizuchennyye i novyye zadachi. Moskva: Knizhnyy dom "LIBROKOM"; 2013. 329 s. [Bazhenov V. A., Krivenko O. P., Solovey N. A. Non-linear deformation and stability of elastic shells with heterogeneous structure. Models, methods, algorithms, poorly-studied and new problems. Moscow: Knizhnyy dom "LIBROKOM"; 2013. 329 p. (in Russ.)]
9. Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibets A. I., Shoshin D. V. Ustoychivost' i predel'nye sostoyaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzheniyakh. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2014;55(1):13-22. [Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibets A. I., Shoshin D. V. Stability and ultimate states of elastic-plastic spherical shells at static and dynamic loadings. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014;55(1):13-22. (in Russ.)]
10. Ganeeva M. S., Moiseeva V. E. Nelineynyy izgib i ustoychivost' sfericheskikh i ellipsoidal'nykh obolochek pri neosesimmetrichnom nagruzhenii. Probl. prochn. i plastich. 2013;75(2):105-114. [Ganeeva M. S., Moiseeva V. E. Non-linear bend and stability of spherical and ellipsoidal shells at non-axis-symmetrical loading. Problems of Strength and Plasticity. 2013;75(2):105-114. (in Russ.)]
11. Malykh K. S., Novichkov A. A., Pridat'ko I. S. Ustoychivost' sfericheskikh obolochek s uchetom nachal'nykh nepravil'nostey formy. Trudy 6 Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Molodezh'. Tekhnika. Kosmos". Sankt-Peterburg. 2014. S. 62-64. [Malykh K. S., Novichkov A. A., Pridat'ko I. S. stability of spherical shells accounting for initial form irregularities. Proceedings of the 6th All-Russian scientific-technical conference "Youth. Technics. Cosmos". Sankt-Peterburg. 2014. P. 62-64. (in Russ.)]
12. Petrov V. V., Krivoshein I. V. Vliyanie neodnorodnosti materiala na ustoychivost' nelineyno deformiruemykh pologikh obolochek dvoynoy krivizny. Vestnik SGTU. 2014;4:20-25. [Petrov V. V., Krivoshein I. V. Material heterogeneity influence on stability of non-linear deformed shallow shells of double curvature. Vestnik Saratov State Technical University. 2014;4:20-25. (in Russ.)]
13. Pikul' V. V. Ustoychivost' obolochek. Probl. mashinostr. i avtomatiz. 2012;2:81-87. [Pikul' V. V. Shell stability. Engineering and Automation Problems. 2012;2:81-87. (in Russ.)]
14. Semko V. V., Krivoshein I. V. Modelirovanie vliyaniya vida granichnykh usloviy na ustoychivost' nelineyno deformiruemykh pologikh obolochek. Sbornik trudov 26 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-26)". Nizhniy Novgorod; 2013. S. 53-55. [Semko V. V., Krivoshein I. V. Modelirovanie vliyaniya vida granichnykh usloviy na ustoychivost' nelineyno deformiruemykh pologikh obolochek. Proceedings of the 26 International scientific conference "Mathematical modeling in technics and technologies (MMTT-26)". Nizhniy Novgorod; 2013. P. 53-55. (in Russ.)]

15. Arnol'd V.I. Teoriya katastrof. Moskva: Lenand; 2016. 134 s. [Arnol'd V.I. Catastrophe theory. Moscow: Lenand; 2016. 134 p. (in Russ.)]
16. Ostreykovskiy V. A. Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinamiceskikh sistem metodami teorii katastrof: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Moskva: Izdatel'stvo "Vysshaya shkola"; 2005. 327 s. [Ostreykovskiy V. A. Analysis of stability and controllability of dynamic systems by catastrophe theory methods: a tutorial for students of higher education institutions. Moscow: Izdatel'stvo "Vysshaya shkola"; 2005. 327 p. (in Russ.)]
17. Postle D. Calastrophe Theory. London: Fontana; 1980.
18. Gilmor R. Prikladnaya teoriya katastrof. M.: Nauka; 1990. 350 s. [Gilmor R. Applied calastrophe theory. Moscow: Nauka; 1990. 350 p. (in Russ.)]
19. Tompson D.M.T. Neustoychivosti i katastrofy v nauke i tekhnike. M.: Mir; 1985. 256 s. [Tompson D.M.T. Non-stabilities and calastrophes in science and technics. Moscow: Mir; 1985. 256 p. (in Russ.)]
20. Keller Dzh. B., Antman S. Teoriya vetvleniya i nelineynye zadachi na sobstvennyye znacheniya. M.: Mir; 1974. 254 s. [Keller Dzh. B., Antman S. Branching theory and non-linear eigenproblem. Moscow: Mir; 1974. 254 p. (in Russ.)]
21. Murtazaliev G.M. K raschetu gibkikh obolochek metodami teorii katastrof. Prochnost' i nadezhnost' sooruzheniy: Sb. nauchnykh tr. TsNIISK im. V.A. Kucherenko. M: Stroyizdat; 1989. S. 34-41. [Murtazaliev G.M. On the calculation of flexible shells by calastrophe theory methods. Durability and reliability of constructions: scientific work collection of TSNIISK named after V.A. Koucherenko. Moscow: Stroyizdat; 1989. P. 34-41. (in Russ.)]
22. Murtazaliev G.M. K ispol'zovaniyu metodov teorii katastrof dlya analiza povedeniya tsilindricheskikh paneley peremennoy tolshchiny. Dep. v VINITI 24.09.92, N 2839 – V92. [Murtazaliev G.M. On the application of calastrophe theory methods in behavior analysis of cilindric planes of variable thickness. Dep. in VINITI 24.09.92, N 2839 – V92. (in Russ.)]
23. Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M., Guseynova S.V. Geometricheskie obrazy teorii katastrof v nelineynykh zadachakh. Sbornik statey po materialam vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoriya sooruzheniy: dostizheniya i problemy". Makhachkala; 2012. 126 s. [Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M., Guseynova S.V. Geometric images of calastrophe theory in non-linear problems. Matrials of All-Russian scientific-practical conference "Theory of construction: acheivments and problems". Makhachkala; 2012. 126 p. (in Russ.)]
24. Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M. Metody teorii katastrof v mekhanike konstruktсий. Sbornik statey po materialam II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoriya sooruzheniy: dostizheniya i problemy". Makhachkala; 2015. 132 s. [Murtazaliev G.M., Payzulaev M.M. Calastrophe theory methods in the mechanics of constructions. Matrials of All-Russian scientific-practical conference "Theory of construction: acheivments and problems". Makhachkala; 2015. 132 p. (in Russ.)]
25. Borodin A.I., Novikova N.N., Shash N.N. Primenenie sinergeticheskikh metodov i teorii katastrof. Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie. 2015;2(89):84-90. [Borodin A.I., Novikova N.N., Shash N.N. Application of synergetic methods and calastrophe theory. Effective Crisis Management Journal. 2015;2(89):84-90. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич – доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики;

Дибиргаджиев Анвар Магомедович – ассистент.

Чикаев Магомед Ахмедович – аспирант.

Information about the authors:

Gelani M.Murtazaliev - Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Materials Strength, Theoretical and Construction Mechanics;

Anvar M. Dibirgadzhiyev -Assistant Lecturer.

Magomed A.Chikaev - Postgraduate Student.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 13.05.2017.

Received 13.05.2017.

Принята в печать 23.06.2017.

Accepted for publication 23.06.2017.

Для цитирования: Курбацкий Е.Н., Купчикова Н.В. Способы устройства тоннелей из опускных секций при строительстве на донных структурно-неустойчивых грунтах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):173-183. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-173-183

For citation: Kurbatskiy E.N., Kupchikova N.V. Methods for the arrangement of immersed tube tunnels during construction based on structurally unstable soils. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2): 173-183. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-173-183

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 627; 624.15; 624.157

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-173-183

СПОСОБЫ УСТРОЙСТВА ТОННЕЛЕЙ ИЗ ОПУСКНЫХ СЕКЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ДОННЫХ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТАХ

Курбацкий Е.Н.¹, Купчикова Н.В.²

Российский университет транспорта (МИИТ)

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Россия,

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,

414056, Астрахань, ул. Татищева 18, Россия,

¹e-mail: kurbatskiy@miit.ru, ²e-mail: kupchikova79@mail.ru

Резюме: Цель. Цель исследования состоит в разработке наиболее эффективных конструктивно-технологических способов усиления дна рек и заливов, сложенных слабыми структурно-неустойчивыми грунтами, в том числе в зонах с сейсмической активностью, с помощью свайных фундаментов с уширениями и каменной наброски с микросваями. **Метод.** Применен метод построения комбинированных транспортных переходов, состоящих из эстакад, проходящих от берегов над относительно неглубокими протоками, до искусственных островов, на которых трасса входит в тоннели, пересекающие глубокие судоходные каналы. **Результат.** Аналитически обобщен зарубежный опыт строительства тоннелей из опускных секций при сооружении транспортных переходов через протяжённые речные и морские преграды. Выявлены особенности, преимущества и недостатки их возведения уже эксплуатируемых тоннелей из опускных секций в ряде стран мира. Предложены конструктивно-технологические способы усиления дна рек и заливов, сложенных слабыми структурно-неустойчивыми грунтами. **Вывод.** Большое количество построенных и эксплуатируемых в мире транспортных переходов, включающих в себя тоннели из опускных секций, свидетельствует о преимуществах таких проектов, по сравнению с другими типами транспортных переходов – мостов и тоннелей, сооружаемых горной проходкой. При выборе варианта мостового перехода для обеспечения прохода высокотонажных судов необходимо строительство большепролётных мостов на высоких опорах. Собственные частоты колебаний большепролётных мостов попадают в область доминирующих частот землетрясений, что может привести к резонансным явлениям и повредить сооружение даже при слабых сейсмических воздействиях. Тоннели в меньшей мере подвержены сейсмическим воздействиям, так как в них, в отличие от наземных сооружений, не возникает резонансных явлений. Конструктивно-технологические решения протяжённых переходов через проливы, сложенных слабыми грунтами по дну, на территориях расчлененных ландшафтов при выборе варианта пересечения транспортными магистралями, могут быть наиболее экономичными, надежными и приемлемыми с точки зрения затрат, времени строительства и использования современных технологий.

Ключевые слова: водные и морские преграды, тоннели и мосты, тоннели из опускных секций, слабые грунты на дне водоёмов, илистые вязкие грунты, песчаные и глинистые илы, каменная наброска, дноукрепление, набивные сваи с уширениями

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

METHODS FOR THE ARRANGEMENT OF IMMERSSED TUBE TUNNELS DURING
CONSTRUCTION BASED ON STRUCTURALLY UNSTABLE SOILS

Evgeniy N. Kurbatskiy¹, Natalia V. Kupchikova²

Russian University of Transport (RUT - MIIT),

9b9 Obrazcova Str., Moscow 127994, Russia,

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

18 Tatishcheva Str. , Astrakhan 414056, Russia,

¹e-mail: kurbatskiy@miit.ru ²e-mail: kupchikova79@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the research is to develop the most effective construction and technological methods for strengthening the bottom of rivers and bays, composed of weak structurally unstable soils, including zones with seismic activity, using pile foundations with broadening and rock filling with micropiles. **Methods** The method of constructing combined transport transitions was applied, consisting of overpasses running over relatively shallow channels from coasts to artificial islands on which the route enters tunnels crossing deep shipping canals. **Results** The foreign experience in the construction of immersed tube tunnels in the construction of transport crossings through the extended river and sea barriers has been analytically generalised. The features, advantages and disadvantages of the construction of immersed tube tunnels in some countries of the world are revealed. **Conclusion** A large number of already constructed and operated transport transits, including immersed tube tunnels, testifies to the advantages of such projects, as compared to other types of transport transitions like bridges and tunnels constructed using mining techniques. Construction-technological methods for strengthening the bottom of rivers and bays, composed of weak structurally unstable soils, are proposed. When selecting a design of a bridge to ensure the passage of high-tonnage vessels, it is necessary to build large-span bridges on high supports. Weak, structurally unstable soils, deep bedding of bedrock and high seismicity of the area will create serious problems in the construction and operation of such structures. The natural vibration frequencies of the large-span bridges fall into the region of the dominant earthquake frequencies, which can lead to resonant phenomena and damage the structure even under weak seismic influences. Tunnels are less susceptible to seismic impacts, since, unlike ground structures, they don't experience resonance phenomena. When seismic waves pass, the tunnels are deformed in the same way as the surrounding soil massif (if the soil is solid), or much less (if the soil is weak). Deformations are usually small and do not pose a serious danger for tunnel lining. Structural and technological solutions for long transit routes through straits composed of weak soils along the bottom in the territories of disarticulated landscapes can be the most economical, reliable and acceptable when choosing the intersection by transport routes from the point of view of costs, time of construction and use of modern technologies.

Keywords: water and sea obstacles, tunnels and bridges, immersed tube tunnels, weak soils at the bottom of reservoirs, muddy viscous soils, sandy and clayey silts, stone filling, bottom reinforcement, cast-in-place piles with broadening

Введение. Традиционно протяжённые транспортные переходы через проливы и широкие реки выполнялись с использованием мостов. В некоторых случаях для пропуска высокотоннажных судов приходится располагать пролётные строения на высоких опорах [1-3]. Это усложняет конструкцию и приводит к необходимости удлинять подходы к мостам.

Одним из возможных вариантов решения этой транспортной проблемы является сооружение тоннеля горным способом. Однако в этом случае так же существуют некоторые требования, которые необходимо выполнять, поскольку они приводят к удлинению перехода: тоннель должен располагаться ниже дна водоёма на 25-30 метров и более.

Тоннели из опускаемых секций, пересекающие водные преграды, имеют целый ряд преимуществ по сравнению с тоннелями, сооружаемыми горным и щитовым способом. Протяжённость этих тоннелей сравнительно меньше, так как они расположены на дне водоёмов с небольшим заглублением, вследствие этого подходы могут быть относительно короткими. Подходы к мостам, которые необходимо располагать на высоких опорах при пересечении судоходных проливов и рек, обычно значительно длиннее. Длина мостового перехода при пересечении водной преграды на равнинной местности существенно увеличивается (рис. 1).

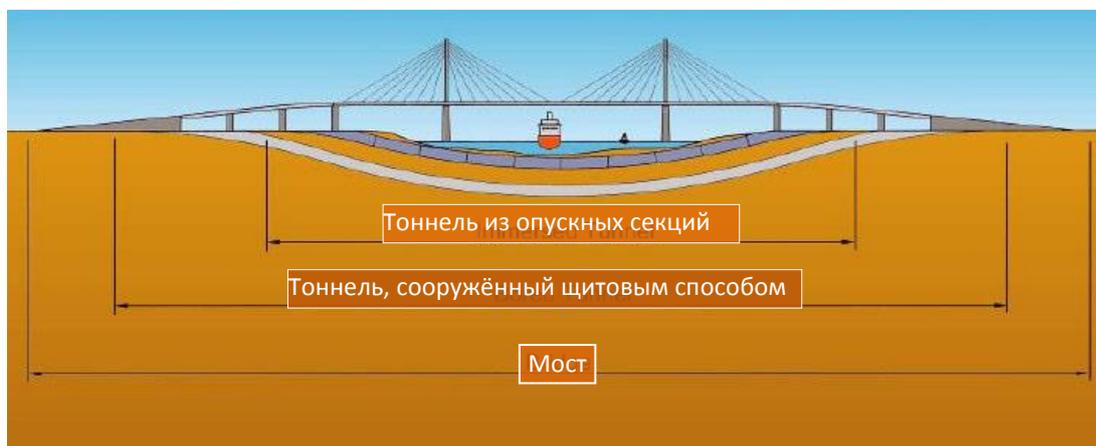


Рис. 1. Сравнение протяжённости транспортных переходов через водную преграду
Fig. 1. Comparison of the length of transport crossings through a water barrier

Постановка задачи. Цель исследования – разработка наиболее эффективных конструктивно-технологических способов усиления дна рек и заливов, сложенных слабыми структурно-неустойчивыми грунтами, в том числе в зонах с сейсмической активностью с помощью свайных фундаментов с уширениями и каменной наброски с микросваями. Тоннели из опускаемых секций сооружаются практически при любых грунтовых условиях. Коренные породы в проливах и реках могут располагаться под слабыми водонасыщенными грунтами на большой глубине. Такие условия обычно создают существенные проблемы при сооружении опор большепролётных мостов.

Методы исследования. Для очень длинных переходов, когда навигация является важным фактором, комбинированные переходы «мост-тоннель» представляют собой экономически наиболее выгодное решение. Такие комбинированные переходы состоят из протяжённых эстакад, которые начинаются на берегу, пересекают сравнительно узкие водные преграды и заканчиваются на искусственно созданных островах. Далее трасса входит в тоннели, которые начинаются на островах и пересекают судоходные части проливов и рек.

В настоящее время в мире построено и эксплуатируется более 100 тоннелей из опускаемых секций различного назначения с разными поперечными сечениями (рис.2).

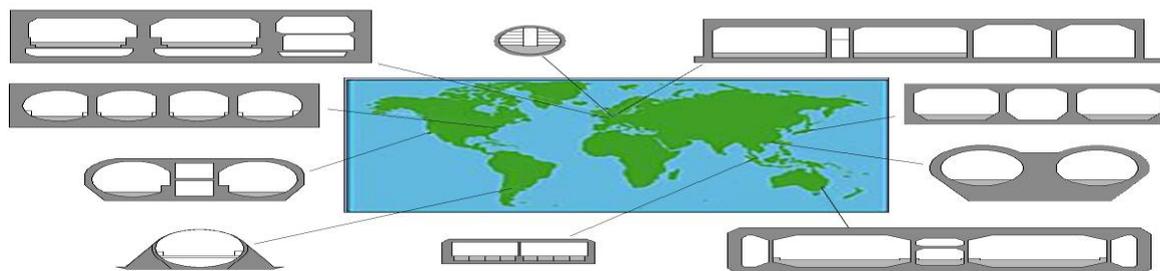


Рис.2. Типы поперечных сечений тоннелей из опускаемых секций и места их постройки
Fig.2. Types of cross-sections of tunnels from lower sections and their construction sites

Это автодорожные тоннели, железнодорожные тоннели: однопутные и двухпутные, а также, тоннели для одновременного пропуска железнодорожных поездов и автотранспорта.

Наиболее часто строятся комбинированные транспортные переходы, состоящие из эстакад, проходящих от берегов над относительно неглубокими протоками, до искусственных островов, на которых трасса входит в тоннели, пересекающие глубокие судоходные каналы.

Транспортный переход через залив Chesapeake у Норфолка (Виржиния) был построен в 1964 году. Тоннельно-мостовой переход протяжённостью 17 миль включает в себя мост и два тоннеля из опускных секций, пересекающих два основных судоходных канала (рис. 3).



Рис.3. Тоннельно-мостовой переход через залив Chesapeake
Fig.3. Tunnel-bridge crossing over Chesapeake Bay

Первый крупный морской переход в Европе с использованием тоннеля из опускных секций был построен между Данией и Швецией на трассе Oresund. Эта трасса, длиной 16,7 км, обеспечила автомобильное и железнодорожное сообщение между Копенгагеном и Мальме (рис. 4).

Переход из тоннеля на мост выполнен на большом искусственном острове длиной около 4 км. В Дании в месте перехода на 430м в море была расширена береговая зона.



Рис. 4 Транспортный переход на трассе Oresund между Данией и Швецией
Fig. 4 Transport passage on the Oresund road between Denmark and Sweden

Длина тоннеля из опускных секций под проливом Drogden на трассе Oresund составляет 3500 м. Тоннель состоит из 20 секций длиной по 176 метров каждая. Каждая секция собрана из восьми сегментов по 22 метра.

Тоннель предназначен для двух железнодорожных и двух автомобильных линий. Кроме того, предусмотрена спасательная галерея. Размеры поперечного сечения 8,6 x 38,5 (м). Поперечное сечение тоннеля представлено на рис. 5.

В 2010 году построен транспортный переход между вторым по величине городом Южной Кореи - Пусаном, расположенным на юго-востоке, и островом Geoje. Транспортный переход состоит из двух вантовых мостов и тоннеля из опускных секций. Тоннель длиной 3,2 км состоит из 18 секций по 180 метров каждая. Тоннель является самым глубоким (максимальная глубина воды 48 м) в мире.

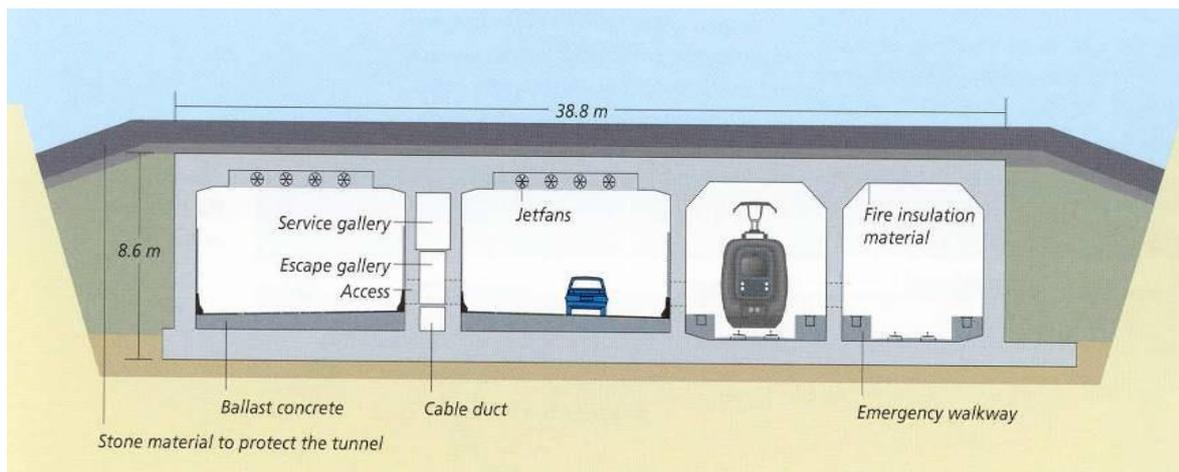


Рис. 5. Поперечное сечение тоннеля Drodgenl

Fig. 5. The cross-section of the Drodgenl tunnel

Инженерно-геологические условия в месте расположения тоннеля не являются благоприятными для строительства. Морское дно вдоль трассы тоннеля, кроме береговых областей, состоит из слоя морской глины, мощность которого превышает 20 метров, достигая в некоторых местах 30 метров. У берегов на поверхность выходят коренные породы, а также тонкие слои песка и гравия, поэтому грунт в основании тоннеля было решено усилить сваями [1-2]. Место строительства перехода расположено в Корейском проливе между Тихим океаном и Восточно-Китайским морем. Климатические условия в этом месте, открытом всем ветрам, достаточно сложные. Сильное течение до 2 м/сек, тайфуны и волны, высотой до 8 метров, серьёзно усложняли транспортировку секций тоннеля на места установки. Сейсмичность района невысокая, тем не менее, тоннель рассчитан на два уровня землетрясений: проектное (ПЗ) и максимальное расчётное (МРЗ).

Некоторые проблемы, с которыми столкнулись проектировщики и строители: большая глубина, разнообразные грунтовые условия, продолжительный расчётный срок эксплуатации (120 лет), необходимость сооружения искусственных островов на мягких грунтах, требование не искажать природные течения, при сооружении островов, трёхполосное движение привело к необходимости увеличить пролёт перекрытий тоннеля до 14,55 м, необходимость заглубления верхней части тоннельной обделки на глубину 29 метров от поверхности морского дна для обеспечения прохода танкеров водоизмещением 300 000 тонн в двух проливах с общей шириной 2,810 метров.

После анализа и сравнения различных вариантов было принято решение сооружать тоннель из железобетонных секций [1-2].

Обычно тоннели выполняются из железобетонных или сталебетонных секций. Секции сооружаются в доках или в специально вырытых на берегу котлованах (рис. 6).



Рис. 6. Сооружение секции тоннелей в специальном котловане (Нидерланды)

Fig. 6. Tunnel section construction in a special pit (Netherlands)

В некоторых случаях место производства секций может располагаться на больших расстояниях от места погружения секций. В качестве примера приведём вид железобетонного завода, расположенного на расстоянии 40 км от места расположения тоннеля (рис. 7).



Рис.7. Вид площадки для одновременной отливки нескольких секций тоннеля (западный берег залива Jinhae)
Fig.7. Type of site for simultaneous casting of several tunnel sections (western shore of Jinhae Bay)

После окончания сооружения секций котлован заполняется водой, для чего открываются специально смонтированные затворы. Перед заполнением котлована водой торцы секций герметизируются. Секции рассчитываются таким образом, чтобы они обладали необходимой плавучестью, поэтому секции после затопления котлована всплывают (рис. 8).



Рис. 8. Секции тоннелей подготовленные для транспортировки (Нидерланды)
Fig.8. Tunnel sections prepared for transport (Netherlands)

Готовые секции буксируются по воде к месту установки. При этом используется либо плавучесть секций, либо специальные плоты.

Наиболее распространенным методом подготовки траншей для подводных тоннелей является использование грейферов и земснарядов. В районах с повышенными экологическими требованиями для уменьшения загрязнений водной среды используются грейферы с герметичными ковшами. При разработке твёрдых скальных пород может возникнуть необходимость в выполнении буровзрывных работ, что экологически нежелательно.

Работы по углублению дна, как правило, проводятся, по меньшей мере, в два этапа: удаления сыпучего материала; и срезки грунта. Срезка грунта должна включать удаление, по меньшей мере, 1-метрового слоя грунта после окончания выемки породы земснарядом или грейфером. Все наносные материалы: ил, песок, или другие материалы, которые могут накапливаться на дне траншеи, удаляются непосредственно перед опусканием секции.

Траншея для тоннеля должна соответствовать расчётному плану и профилю трассы с учётом возможных обвалов стен траншеи. Работы по углублению дна должны выполняться таким образом, чтобы ширина дна траншеи и профиль сохранились при подготовке основания и опускании секций. Дно траншеи должно быть заполнено грунтом, удовлетворяющим проектным требованиям к материалам основания. После того, как секции тоннелей доставлены на ме-

сто установки, начинается процесс погружения в предварительно подготовленные траншеи (рис.9).

Обычно погружаемая секция опускается на некотором расстоянии от уже установленной секции и затем медленно перемещается до соприкосновения с ранее установленной секцией, после этого производятся монтажные работы по соединению секций.



Рис. 9. Погружение секций со специальной баржи и пример поперечного сечения тоннеля с указанием обратной засыпки

Fig. 9. Submergence of sections from a special barge and an example of a tunnel cross-section with indication of backfilling

Для предотвращения повреждения тоннельных обделок, которые могут произойти при аварии судов и от повреждения якорями, при выполнении обратной засыпки, предусматривается защитный слой из твердого грунта.

На рис. 10 показана схема соединения элементов с использованием стыковой камеры. Смежные тоннельные элементы притягиваются друг к другу, при этом резиновое уплотнение подвергается предварительному обжатию. Пространство стыковой камеры герметизируется и, при выпуске из него некоторого количества воды, гидростатическое давление на свободный противоположный торец стыкуемой секции становится неуравновешенным и сжимает стык с усилием в несколько десятков тысяч килоньютон [9-14].



Рис. 10. Сема соединений между секциями с помощью прокладок: а) до стыковки; б) после стыковки

Fig. 10. Seal connections between sections using gaskets: a) until docking; b) after docking

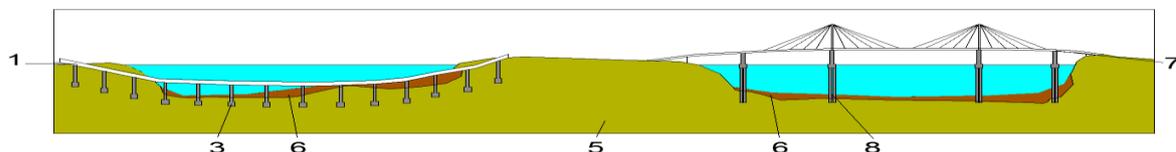
Обсуждение результатов. Большое количество построенных и эксплуатируемых в мире транспортных переходов, включающих в себя тоннели из опускных секций, свидетельствует о преимуществах таких проектов, по сравнению с другими типами транспортных переходов.

Отметим некоторые из них. Так, в настоящее время в мире хорошо разработаны все этапы строительства: сооружение секций, транспортировка секций к месту погружений, способы погружений. Одновременное производство большого количества секций тоннелей на берегу позволяет существенно ускорить строительство, используя при этом все технологии и достижения, которые используются при производстве железобетонных изделий. В процессе строительства не оказывается никакого влияния на судоходство.

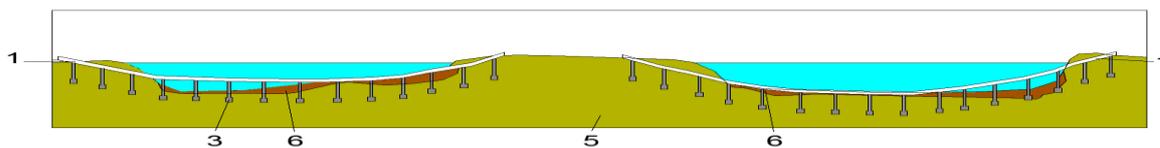
При эксплуатации транспортных переходов не ограничивается ни высота, ни тоннаж судов, проходящих по проливам, заливам и широким рекам. Проект комбинированного транспортного перехода, состоящий из мостов и тоннелей из опускных секций, может оказаться более экономичным по сравнению с проектом большепролетного моста и горного тоннеля, построенных щитовым способом.

Следует отметить, что тоннели из опускных секций имеют и недостатки, которые заключаются в воздействии на окружающую среду: они могут оказывать влияние на места обитания рыб, изменять течения и уменьшать прозрачность воды. Исследования показывают, что условия пересечения проливов опускными тоннелями оцениваются как уникально сложными по природно-климатическим и инженерно-геологическим факторам. Поэтому по конструктив-

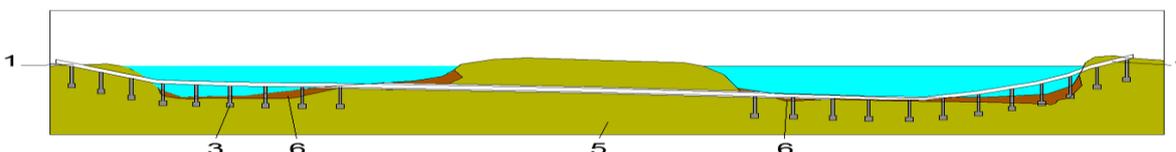
но-технологическим решениям протяжённые переходы через проливы и широкие реки, особенно на территориях расчлененных ландшафтов водными преградами можно подразделить на туннельно-мостовой вариант, совмещённый с мостами (рис. 11, а), на туннельные переходы из опускных секций совмещённые с наземными дорожными магистралями (рис. 11, б) и туннельный вариант из опускных секций, совмещённый с тоннелем, сооружённым горным способом (рис. 11, в).



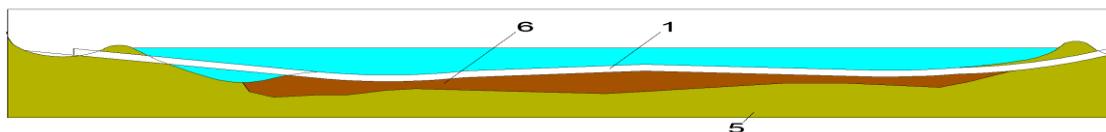
А) – туннельно-мостовой вариант, совмещённый с мостами



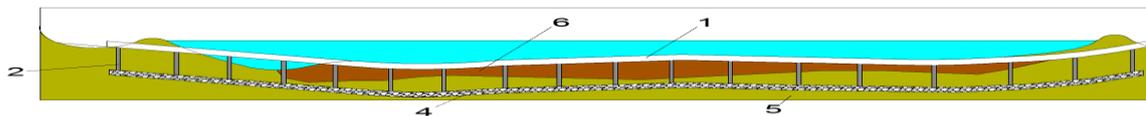
Б) – туннельный вариант из опускных секций, совмещённый с наземными дорожными магистралями



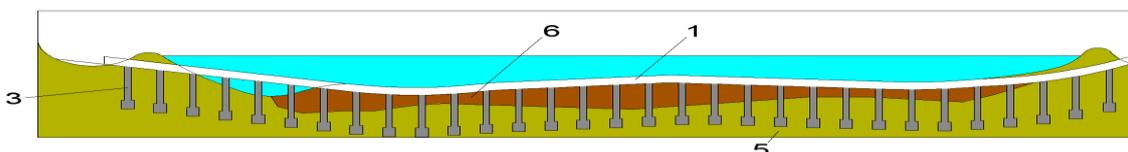
В) – туннельный вариант из опускных секций, совмещённый с тоннелем, сооружённым горным способом



Г) – прокладка тоннелей по дну без закрепления грунта



Д) – дноукрепление мягких и вязких грунтов каменной наброской и микросваями



Е) - дноукрепление мягких грунтов сваями с уширенной нижней пятой

Рис.11. Конструктивно-технологические решения протяжённых переходов через проливы на территориях расчлененных ландшафтов: 1 – туннель из опускных секций; 2 - микросваи; 3 – свая с концевым уширением; 4 – каменная наброска; 5 – мели; 6 – слабые грунты дна водоёма; 7 – мост; 8 – опоры мостов

Fig.11. Structural and technological solutions of long transitions through the straits in the territories of dismembered landscapes: 1 - a tunnel from lower sections; 2 - microcavities; 3 - pile with end widening; 4 - stone outline; 5 - shallows; 6 - weak bottom of the bottom of the water; 7 - the bridge; 8 - bridge supports

Одним из способов усиления слабых илистых оснований на дне водоёмов является каменная наброска. Большое значение в мире стало придаваться исследовательским работам по выявлению более новых способов применения каменно-набросных плотин способом наброской камня или мелких каменных материалов (щебня, галечника и др.).

Крупность камней и толщина наброски определяются проектом в зависимости от скорости течения, высоты волн, крутизны откоса и объемного веса камня. Каменную наброску устраивают отсыпкой камней прямо в воду, важно лишь соблюдать соответствие массы камней скоростям движения воды. В ходе дноукрепительных работ камень отсыпают в воду с плавсредств, что обеспечивает высокий темп строительства. Основным недостатком остается высокая стоимость каменной наброски, однако во многих случаях данная конструкция дно и берегоукрепления оказывается единственно возможной. Согласно результатам анализа проектной документации и рекомендаций авторов [4-14] по проектированию дна и берегоукрепления илистых оснований, следует выделить следующие особенности усиления каменной наброской:

1) Илистые грунты водоёмов относят к структурно-неустойчивым грунтам, структура которых не обладает прочностью и устойчивостью и может быть нарушена любым действием добавочного (сверх природного) давления (часто весьма незначительной величины);

2) Содержание частиц в илистом грунте меньше 0,01 мм, что составляет 10-30% по массе, т.е. такое основание практически не имеет веса и может быть вытеснено давлением веса каменной наброски;

3) Объем каменного материала в наброске следует определять с учетом коэффициента запаса на уплотнение: для песчано-гравийных (щебеночных) смесей оптимального зернового состава и щебня фракций 40-70 и 70-120 мм марки по прочности 800 и более коэффициент запаса материала на уплотнение следует ориентировочно принимать 1,25-1,3, а для щебня марок по прочности 600-300 - 1,3-1,5;

4) Коэффициент запаса шлама на уплотнение в зависимости от его плотности следует ориентировочно принимать 1,3-1,5.

На рис. 11 (д) представлен конструктивно-технологический вариант усиления слабых грунтов на дне водоёма при прокладке тоннелей из опускных секций каменной наброской и микросваями.

Конструктивно-технологическим способом, часто применяемым в гидротехническом строительстве на донных грунтах, является возведение буронабивных свай с уширенной пятой в нижней части, принцип устройства которых в основном основывается на способе с неизвлекаемой оболочкой, когда отсутствует возможность качественного изготовления свай с извлекаемой обсадной трубой. Такие условия создаются, где под напором водных потоков ствол сваи на отдельных участках может быть разрушен во время твердения бетонной смеси.

На рис. 11 (е) представлен вариант усиления слабых грунтов на дне водоёма при прокладке тоннелей из опускных секций буронабивными сваями с концевыми уширениями, что способствует значительному увеличению несущей способности и требуемой устойчивости свайного основания под тоннелем.

Вывод. При выборе варианта мостового перехода для обеспечения прохода высокотоннажных судов необходимо строительство большепролётных мостов на высоких опорах. Слабые структурно-неустойчивые грунты, глубокое заложение коренных пород и высокая сейсмичность района создаст серьёзные проблемы при сооружении и эксплуатации таких сооружений.

Собственные частоты колебаний большепролётных мостов попадают в область доминирующих частот землетрясений, что может привести к резонансным явлениям и повредить сооружение даже при слабых сейсмических воздействиях. Отметим, что в районе Керченского пролива, где ведётся строительство моста возможны землетрясения силой 9 баллов по шкале МСК -64. Тоннели в меньшей мере подвержены сейсмическим воздействиям, так как в них, в отличие от наземных сооружений, не возникает резонансных явлений. При прохождении сейсмических волн тоннели деформируются так же, как и окружающий их массив грунта, если грунт твёрдый, или значительно меньше, если грунт - слабый. Эти деформации обычно малы и не представляют серьёзной опасности для тоннельных обделок.

Конструктивно-технологические решения протяжённых переходов через проливы, сложенных слабыми грунтами по дну, на территориях расчлененных ландшафтов и рассмотренные в статье при выборе варианта пересечения транспортными магистралями, могут быть наиболее

экономичными, надежными и приемлемыми с точки зрения затрат, времени строительства и использования современных технологий.

Библиографический список:

1. De Wit, J.C.W.M. Van Putten, E. «Immersed Tunnels: Competitive tunnel technique for long (sea) crossings»// De Wit, J.C.W.M. Van Putten, E 12 апреля 2012г.
2. «Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels Civil Elements». U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
3. Купчикова, Н. В. Особенности берегоукрепления набережной реки Волги свайными оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны Купчикова Н.В. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 36-39.
4. Купчикова, Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жёсткость основания / Н. В. Купчикова // Журнал «Промышленное и гражданское строительство» №10 / -Москва, 2007 г.
5. Сборник нормативных показателей расхода материалов. Берегоукрепительные работы. Сборник 42., Государственный комитет Российской Федерации по строительной, архитектурной и жилищной политике (Госстрой России) (Удк [691.004.18+69.059]).
6. РД 31.31.55-93. Р 31.3.02-98. Пособие к инструкции по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений. Рекомендации по проектированию морских портовых гидротехнических сооружений в сейсмических районах при наличии в основании слабых грунтов (пособие к инструкции по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений, разработанных Департаментом морского транспорта МИНТРАНСА РФ.
7. Курбацкий Е.Н., Купчикова Н.В., Сан Лин Тун. Методика расчета свайных фундаментов с уширениями на статические и динамические воздействия, основанная на свойствах изображения Фурье финитных функций // Модернизация регионов России: инвестиции в инновации: сб.тр.IV Междунар. науч. - практ. конф. (Астрахань,15 окт. 2010 г.). С. 3-6.
8. Курбацкий Е.Н., Купчикова Н.В., Сан Лин Тун. Соотношение между интегралом Фурье и спектрами ответов при оценке сейсмического воздействия на свайные фундаменты // Энергоресурсосберегающие технологии: Наука. Образование. Бизнес. Производство: сб.тр.V Междунар. науч. - практ. конф. (Астрахань,24-28 окт. 2011 г.). С. 173-178.
9. Храпов, В. Г. Тоннели и метрополитены: Учебник для вузов/ , В. Г. Храпов, ЕАДемешко, СННаумов и др. – Под ред. В. Г. Храпова. – М.: Транспорт, 1989,383с.
10. Vucetic M, Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response. J Geotech Eng Div ASCE 1991; 117:89-107.
11. Kramer, Steven L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentive Hall, 653 pp.
12. Hwang, H. and Lee, C.S. (1991). "Parametric Study of Site Response Analysis." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 10 (6), 383-290.
13. Hwang, H. and Huo, J-R,(1991). "Parametric Study of Site Response Analysis." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 10(6), 382-290.
14. Idriss I.M. (1990). "Response of Soft Soil Sites During Earthquakes." Proceedings of the H. B. Seed Memorial Symposium, Berkeley, California, 2, 273-289.

References:

1. De Wit J.C.W.M., Van Putten E. Immersed Tunnels: Competitive tunnel technique for long (sea) crossings. Under City 2012 Dubrovnik. <http://tec-tunnel.com/wp-content/uploads/2012/11/UC2012-paper-immersed-tunnel-De-Wit.PDF.pdf>. Access date: 12.04.2012.
2. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels Civil Elements. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
3. Kupchikova N.V. Osobennosti beregoukrepleniya naberezhnoy reki Volgi svaynymi obolochkami, kamennoy nabroskoy i stroitel'stva na namyvnykh gruntakh vdol' beregovoy zony. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2014;6:36-39. [Kupchikova N.V. The features of bank protection of the river Volga embankment by pile shells, stone filling, and building on the washed soils along the coastal zone. Industrial and Civil Engineering. 2014;6:36-39. (in Russ.)]
4. Kupchikova N.V. Vliyanie uplotneniya grunta so shchebnem na zhestkost' osnovaniya. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007;10:29 [Kupchikova N.V. Vliyanie uplotneniya grunta so shchebnem na zhestkost' osnovaniya. Industrial and Civil Engineering. 2007;10:29 (in Russ.)]
5. Sbornik normativnykh pokazateley raskhoda materialov. Beregoukrepitel'nye raboty. Sbornik 42. Gosudarstvennyy komitet Rossiyskoy Federatsii po stroitel'noy, arkhitekturnoy i zhilishchnoy politike

- (Gosstroy Rossii). [Compilation of normative characteristics of material consumption. Bank protection works. Compilation №42. Gosstroy Rossii. (in Russ.)]
6. RD 31.31.55-93. R 31.3.02-98. Posobie k instruktsii po proektirovaniyu morskikh prichal'nykh i beregoukrepitel'nykh sooruzheniy. Rekomendatsii po proektirovaniyu morskikh portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v seysmicheskikh rayonakh pri nalichii v osnovanii slabykh gruntov. Departament morskogo transporta MINTRANSА RF. [RD 31.31.55-93. R 31.3.02-98. A Tutorial for the Instruction to design of sea berth and bank protection constructions. Recommendations for design of sea port hydro-technical constructions in seismic districts based on the weak soils. Department of Sea Transport of RF MINTRANS (in Russ.)]
 7. Kurbatskiy E.N., Kupchikova N.V., San Lin Tun. Metodika rascheta svaynykh fundamentov s ushireniami na staticheskie i dinamicheskie vozdeystviya, osnovannaya na svoystvakh izobrazheniya Fur'e finitnykh funktsiy. Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Modernizatsiya regionov Rossii: investitsii v innovatsii". Astrakhan'; 2010. S. 3-6. [Kurbatskiy E.N., Kupchikova N.V., San Lin Tun. Calculation method of pile foundations with broadenings for static and dynamic impacts, based on the features of Fourier finite function images. Proceedings of IV International scientific-practical conference "Modernisation of Russia's Regions: investments and innovations". Astrakhan'; 2010. P. 3-6. (in Russ.)]
 8. Kurbatskiy E.N., Kupchikova N.V., San Lin Tun. Sootnoshenie mezhdru integralom Fur'e i spektrami otvetov pri otsenke seysmicheskogo vozdeystviya na svaynye fundamenty. Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Energoresursosberegayushchie tekhnologii: Nauka. Obrazovanie. Biznes. Proizvodstvo". Astrakhan; 2011. S. 173-178. [Kurbatskiy E.N., Kupchikova N.V., San Lin Tun. Fourier's integral and response spectra correlation during the evaluation of seismic impact on pile foundations. Proceedings of V International scientific-practical conference "Energy- and resource saving technologies: Science. Education. Business. Production". Astrakhan; 2011. P. 173-178. (in Russ.)]
 9. Khrapov V.G., Demeshko E.A., Naumov S.N. i dr. Tonneli i metropoliteny: Uchebnik dlya vuzov. Pod red. V. G. Khrapova. M.: Transport; 1989. 383 s. [Khrapov V.G., Demeshko E.A., Naumov S.N. et al. Tunnels and underground: a tutorial for Higher Education Institutions. Khrapov V. G. (Ed.). Moscow: Transport; 1989. 383 p. (in Russ.)]
 10. Vucetic M., Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response. J Geotech Eng Div ASCE 1991;117:89-107.
 11. Kramer S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentive Hall;1996. 653 pp.
 12. Hwang H. and Lee C.S. Parametric Study of Site Response Analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1991;10(6):383-290.
 13. Hwang H. and Huo J.-R. Parametric Study of Site Response Analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1991;10(6):382-290.
 14. Idriss I.M. Response of Soft Soil Sites During Earthquakes. Proceedings of the H.B. Seed Memorial Symposium. Berkeley, California; 1990. P.273-289.

Сведения об авторах:

Курбацкий Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели».

Купчикова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Промышленное и гражданское строительство».

Information about the authors:

Evgeniy N. Kurbatskiy– Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Bridges and Tunnels.

Natalia V. Kupchikova – Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department Industrial and civil construction.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.05.2017.

Принята в печать 01.06.2017.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.05.2017.

Accepted for publication 01.06.2017.

Для цитирования: Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Напряженно-деформированное состояние шпренгельной подкрановой балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):184-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196

For citation: Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Stress-deformed state of a strut-framed crane girder. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44(2):184-196. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.072:624.011

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-184-196

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К.

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

¹ e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,

² e-mail: abusupk@mail.ru,

³ e-mail: hairulla213@mail.ru

Резюме. Целью настоящего исследования является изучение влияния параметров конструкции на напряженно-деформированное состояние шпренгельной подкрановой балки; составление таблиц и соответствующих графиков, иллюстрирующих изменения внутренних силовых факторов в характерных сечениях элементов рассматриваемой системы. В статье излагается исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) металлической подкрановой шпренгельной балки. **Метод.** При решении этой задачи применяются численные методы анализа, основанные на использовании функции Грина. Вводится безразмерный параметр, в зависимости от которого строятся таблицы и графики. По известному алгоритму выполняются вычисления внутренних силовых факторов в сечениях рассматриваемой конструкции. **Результат.** В зависимости от безразмерного параметра, характеризующего геометрию и физические особенности системы, составляются таблицы изгибающих моментов и поперечных сил. По этим таблицам строятся соответствующие графики, по которым легко выбрать оптимальные параметры конструкции. **Вывод.** Выявлена зависимость моментов и поперечных сил от безразмерного параметра k , были построены соответствующие графики и вычислены затраты металла на подкрановые балки. Установлено, что минимальные значения моментов и поперечных сил имеют место при значениях безразмерного параметра k , близких к нулю. Наиболее экономичной оказалась шпренгельная подкрановая балка при $k=0,0001$. Самой неэкономичной — при $k=0,05$ и $k = \infty$. В конечном итоге, можно сказать, что шпренгельные балки по сравнению с обычными подкрановыми балками более выгодны. В рассмотренных в статье примерах экономия металла составила 14%. Изложенная методика позволяет выполнять расчет и проектирование шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками.

Ключевые слова: шпренгельная балка, подкрановая балка, внутренние силовые факторы, таблицы, графики, расчетные схемы, условие прочности, безразмерный параметр, характерные сечения

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESS-DEFORMED STATE OF A STRUT-FRAMED CRANE GIRDER

*Khairulla M. Muselemov*³, *Osman M. Ustarkhanov*,¹ *Abusupyan K. Yusupov*²

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

¹*e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,*

²*e-mail: abusupk@mail.ru,*

³*e-mail: hairulla213@mail.ru*

Abstract Objectives The aim of the present work is to study the influence of design parameters on the stress-deformed state of a sprengel crane girder; to compile the tables and corresponding graphs illustrating changes in internal force factors in the characteristic cross-sections of the system elements under consideration. The article describes the study of the stress-deformed state (SDS) of a metal strut-framed crane girder. **Methods** Numerical methods of analysis based on the use of the Green's function are used during solving this problem. A dimensionless parameter is introduced, depending on which the tables and graphs are constructed. According to the known algorithm, the calculations of internal force factors in the sections of the considered construction are performed. **Results** Depending on the dimensionless parameter characterising the geometry and physical features of the system, tables of bending moments and transverse forces are compiled. According to these tables, the appropriate graphs are plotted in order to choose easily the optimal design parameters. **Conclusion** The dependence of the moments and transverse forces on the dimensionless parameter k was found, the corresponding graphs were plotted and the metal costs for the girders were calculated. The minimum values of the moments and transverse forces are established to take place when the dimensionless parameter k values are close to zero. The most economical was a strut-framed crane girder having $k = 0.0001$. The most uneconomical had $k = 0.05$ and $k = \infty$. Eventually, the sprengel girders were found to be more profitable as compared to conventional crane girders. In the examples considered in the article, the metal savings amounted up to 14%. The presented methodology allows the calculation and designing of strut-framed crane girders with two racks to be carried out.

Keywords: strut-framed girder, crane girder, internal force factors, tables, graphs, calculation schemes, strength conditions, dimensionless parameter, characteristic cross-sections

Введение. Шпренгельные системы находят широкое применение в практике проектирования и строительства [1,3-6,8,19,22]. Доля подкрановых балок в системе каркаса промышленных зданий составляют [8, 9] примерно 20-60% от общей массы металла. Поэтому совершенствование конструктивной системы подкрановых балок актуально. Шпренгельные подкрановые балки, как показывают проведенные исследования, рациональны при шаге колонн 12 м и более. В связи с появлением новых технологий шаг колонн имеют тенденцию к увеличению. А это в свою очередь открывает новые возможности для обоснованного применения шпренгельных подкрановых балок при проектировании металлических каркасов промышленных зданий. В настоящее время внимание исследователей приковано к совершенствованию конструктивной схемы подкрановых балок [7,11-13].

Постановка задачи. С целью повышения эффективности работы подкрановой балки вводится шпренгельная конструкция с двумя стойками. Эта конструкция загружается двумя мостовыми кранами. Определяется расположение мостовых кранов, при котором, возникает опасное состояние подкрановой балки. Исследуется напряженно-деформированное состояние элементов шпренгельной подкрановой балки при шаге колонн 12 м.

Метод исследования. В статье [1] был рассмотрен алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками. При этом в качестве расчетной схемы была принята

трехпролетная балка, у которой две промежуточные опоры имели упругоподатливые связи. Как известно, прогибы балок на упругоподатливых опорах определяются методом 5-ти моментов. Однако в случае подкрановых шпренгельных балок, когда опасное расположение мостовых кранов заранее неизвестно, применение «5-ти моментов» затруднено. Здесь более эффективным является метод, основанный на применении функции Грина. Это — новый подход. Он позволяет достаточно просто решать задачи о балках на упругоподатливых опорах.

Достоверность метода, основанного на применении функции Грина, проверялась нами на многих задачах, решение которых хорошо известно [21]. Обычно при расчете шпренгельных подкрановых балок применяются приближенные методы [2, 10].

В настоящем исследовании приводим более точный метод расчета этих конструкций. В статье [1] при определении внутренних усилий две подкрановые балки перемещались с определенным шагом по всему пролету балки. Таким образом вычислялись наибольшие значения изгибающих моментов и поперечных сил. Функция прогибов конструкции определялась решением дифференциального уравнения

$$EJ \cdot y^{IV}(x) = \sum_i^6 F_i \cdot \delta(x - x_i) - X_1 \cdot \delta(x - l_1) - X_2 \cdot \delta(x - l_2) \quad (1)$$

при условиях шарнирного опирания концов перекладины шпренгельной подкрановой балки. В уравнении (1)

$\delta(x - x_i)$ — дельта-функция, X_1, X_2 — реакции упругоподатливых опор.

Решение этого уравнения представлялось в интегральной форме [1, 21]

$$y(x) = y_0(x) - X_1 G(x, l_1) - X_2 G(x, l_2), \quad (2)$$

где,
$$y_0(x) = \sum_i^6 \int_0^l G(x, \xi) \cdot F_i \delta(\xi - x_i) d\xi = F_i \cdot \sum_i^6 G(x, x_i). \quad (3)$$

Неизвестные X_1 и X_2 даются равенствами:

$$X_1 = \frac{y_0(l_2) \cdot G(l_1, l_2) - y_0(l_1) \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2, l_1) \cdot G(l_1, l_2) - [G(l_1, l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}, \quad (4)$$

$$X_2 = \frac{y_0(l_1) \cdot G(l_1, l_2) - y_0(l_2) \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2, l_1) \cdot G(l_1, l_2) - [G(l_1, l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]},$$

где $G(x, \xi)$ — функция Грина [1, 21],

r — коэффициент жесткости пружины, характеризующий работу шпренгельной системы, стоек и затяжек. Значение этого коэффициента зависит от «геометрии» шпренгельной системы, размеров ее элементов, зависит от площадей сечений, модуля упругости и других конструктивных особенностей.

Расчетная схема шпренгельной подкрановой балки имеет вид, графически представленный на рис. 1. Когда подкрановая балка - однопролетная, то расположение двух мостовых кранов, при котором возникает наибольший изгибающий момент, определяется по правилу Винклера. А в случае трехпролетной балки, да еще с упругоподатливыми опорами, - это проблема. Поэтому, с целью определения наибольших изгибающих моментов и поперечных сил, как указывалось выше, система сил от двух подкрановых балок перемещается по длине балки с шагом в один метр. Решение определяется формулами (2-4).

При этом меняются координаты x_i приложения сил по схеме, показанной на рис.1.

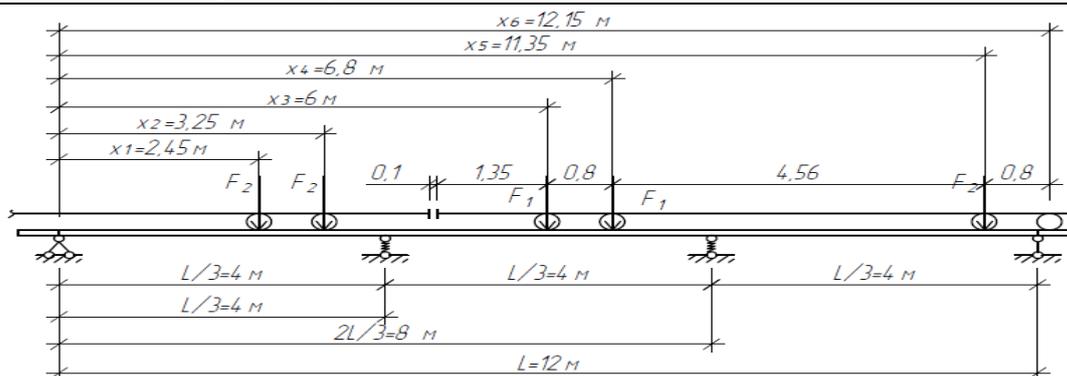


Рис.1. Расчетная схема шпренгельной балки
Fig.1. Calculation scheme of the crossbeam beam

По изложенному выше алгоритму [1] нами были вычислены внутренние силовые факторы в зависимости от безразмерного параметра $k = \frac{EJ}{rl^3}$.

Здесь: EJ – жесткость сечения перекладины при изгибе;
 r – коэффициент жесткости пружины;
 l – пролет шпренгельной подкрановой балки (шаг колонн).
 Величина k – безразмерная.

Далее мы приводим таблицы и графики изгибающих моментов и поперечных сил, возникающих в сечениях перекладины шпренгельной подкрановой балки в зависимости от параметра k . Давления колёс мостового крана приняты следующие: $F_1 = 488kH$; $F_2 = 515kH$. При этом нагрузки определялись с использованием литературы [8-10].

Таблица 1. Максимальные моменты, поперечные силы и соответствующие сжимающие нормальные усилия в перекладине при различных значениях параметра k
Table 1. The maximum moments, transverse forces and the corresponding compressive normal forces in the crossbar for different values of the parameter k

№	Значение параметра k	Максимальный момент и соответствующие ему поперечная сила Q , и нормальное усилие F			Максимальная поперечная сила и соответствующие момент и усилия.		
		M_{max} , кНм	Q , кН	$F_{п}$	Q_{max} , кН	M , кНм	$F_{п}$, кН
1	0	643	343.5	2391	879	77.6	2970
2	0.0001	644.5	348.4	2393	887.3	201.8	2944
3	0.0005	654	353.5	2362	893.4	32.3	2853
4	0.001	644.5	348.4	2896	887	201.8	3146
5	0.0025	786	497.5	2693	889.4	209.7	2855
6	0.005	968.3	416.5	2457	904.6	466.1	2556
7	0.01	1328	211	2124	916	796.5	2179
8	0.05	283	240.4	1061	1137.2	966.6	1059
9	0.1	3418	244.7	654	1283	1091	651
10	∞	4368	249.3	0	1520	1292.6	0

Зависимость моментов и поперечных сил от параметра k наглядно показана в виде графиков на рисунках 2 – 6.

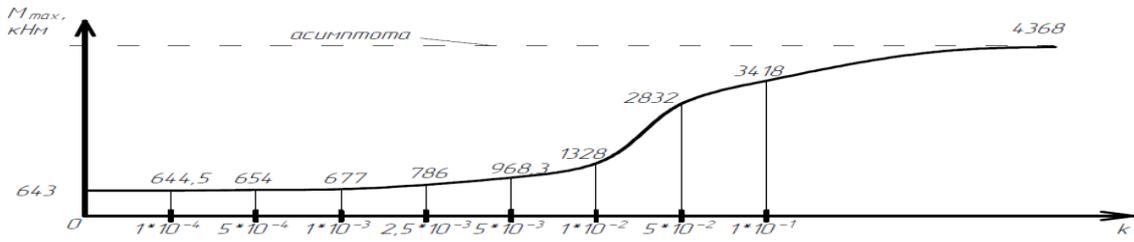


Рис.2. График зависимости максимальных моментов от параметра k
 Fig.2. Graph of the dependence of the maximum moments on the parameter k

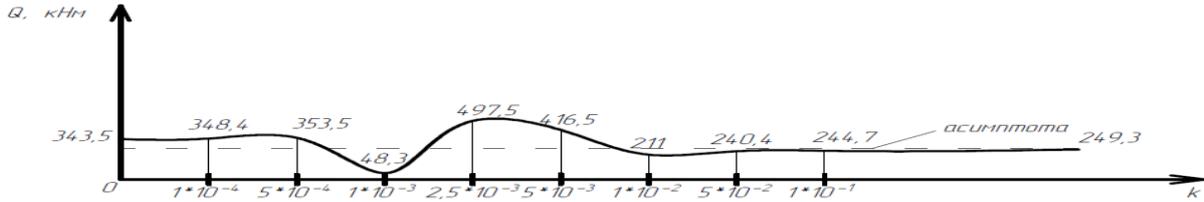


Рис.3. График зависимости поперечных сил (по максимальным моментам) от параметра k
 Fig.3. The graph of the dependence of shear forces (on the maximum moments) of the parameter k

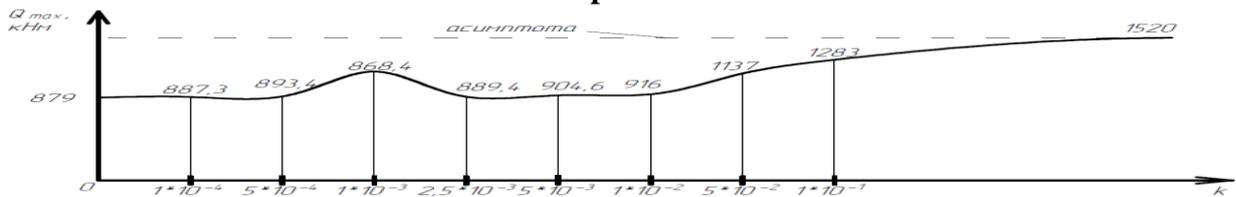


Рис.4. График зависимости максимальных поперечных сил от параметра k
 Fig.4. The graph of the dependence of the maximum shear forces on parameter k

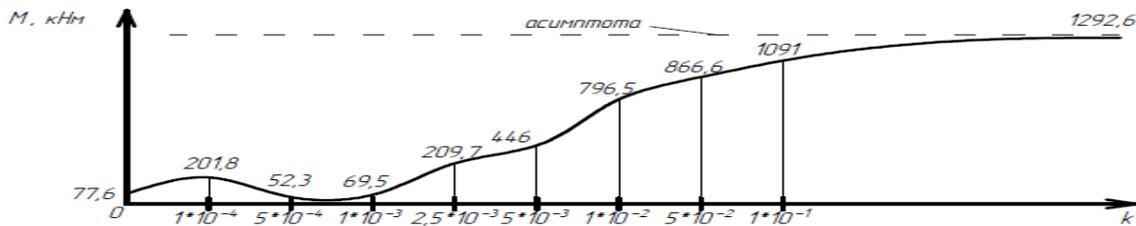


Рис.5. График зависимости моментов (по максимальным поперечным силам) от параметра k
 Fig.5. The graph of the dependence of the moments (from the maximum transverse forces) on the parameter k

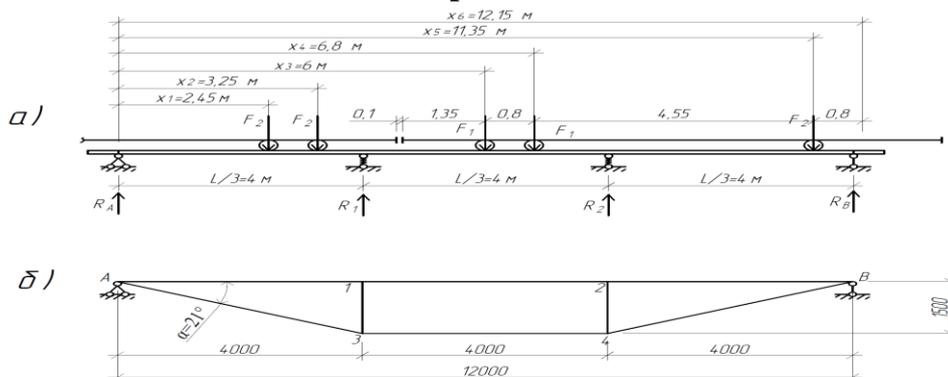


Рис. 6. Шпренгельная балка: а – расчетная схема; б – геометрическая схема
 Fig. 6. The crossbar: a - calculation scheme; b - geometric scheme

Определение усилий в стержнях шпренгельной балки ($k=0,001$). Для определения усилий в элементах шпренгельной системы воспользуемся методом «вырезания узлов» (рис.7).

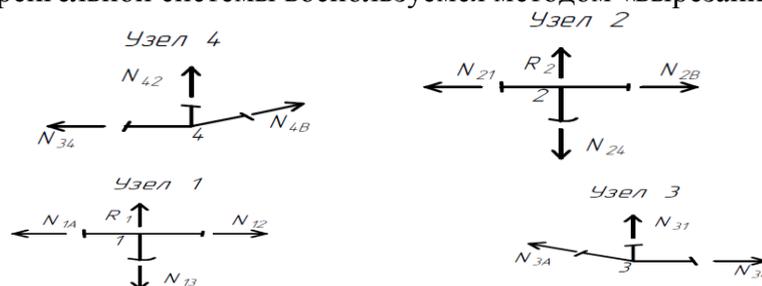


Рис .7. Схемы вырезанных узлов
 Fig.7. Schemes of cut-out nodes

Из двух значений усилий в симметричных элементах шпренгельной системы выбираем большее. В стойках используем узлы 1 и 2:

$$N_{13} = -R_1 = -1086,2 \text{ кН} \quad (\text{определение усилий } R_1 \text{ и } R_2 \text{ в стойках было выполнено по изложенной в статье [1] методике, при } x_3=7\text{м. } R_1=1086 \text{ кН. } R_1 > R_2),$$

$$N_{42} = -R_2 = -894,3 \text{ кН.} \quad F_c = N_{13} = 1086,2 \text{ кН.}$$

В раскосах используем узлы 3 и 4:

$$N_{A3} = -\frac{N_{13}}{\sin \alpha} = 3093,5 \text{ кН;} \quad N_{4B} = -\frac{N_{42}}{\sin \alpha} = 2547 \text{ кН.} \quad F_p = N_{A3} = 3093,5 \text{ кН.}$$

- в затяжке пользуемся узлами 3 и 4:

$$N_{34} = N_{A3} \cdot \cos \alpha = 2896,5 \text{ кН;} \quad N_{43} = N_{4A} \cdot \cos \alpha = 2384,9 \text{ кН.} \quad F_s = N_{34} = 2896,5 \text{ кН.}$$

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета
 Table 2. Results of calculation

№	k	R_A , кН	R_1 , кН	R_2 , кН	R_B , кН	N_{13} , кН	N_{24} , кН	N_{A3} , кН	N_{34} , кН	N_{4B} , кН	N_{43} , кН
1	0	1455.9	1271.6	603.4	1462.1	-1271.6	-603.4	1271.6	0	603.4	0
2	0.0001	1378.6	897	894	1386	-897	-894	448.5	0.0449	447	0.0447
3	0.0005	1455.9	885.8	883.4	1462.1	-885.8	-883.4	2522.8	2362.1	2515.9	2355.7
4	0.001	583	1086.2	894.34	139.8	-1086.2	-894.34	3093.5	2896.5	2547.1	2384.9
5	0.0025	1455.9	1010.2	881.4	1462.1	-1010.1	-881.4	2877	2693.8	2510.2	2350.4
6	0.005	148.2	921.4	838.3	321.6	-921.4	-838.3	2624.1	2457.1	2387.5	2235.5
7	0.01	448.8	796.5	747.9	316	-796.5	-747.9	2268.4	2124	2130	1994.4
8	0.05	1124.1	397.9	375.8	1137.2	-397.9	-375.8	1133.2	1061.1	1070.3	1002.1
9	0.1	1274	245.26	233.4	1283.3	-245.26	-233.4	698.5	654.03	664.72	622.4
10	∞	1515			1521						

1. Подбор сечения раскосов. Растягивающее усилие $F_p=3093.5 \text{ кН}$.

$$\frac{F_p}{A_{\text{нетто}}} \leq \gamma R.$$

Здесь:

$A_{\text{нетто}}$ – площадь поперечного сечения элемента в ослабленном месте;

γ – коэффициент условий работы, принимаем 0,9;

R – расчетное сопротивление стали, принимаемое по СНиП «Стальные конструкции [14-15]».

$$\text{По пределу текучести } R = \frac{R_T^H}{\gamma_m}, \quad \gamma_m = 1.025,$$

где γ_m – коэффициент надежности по материалу, который определяется по СНиП «Стальные конструкции» [14]:

$$R = \frac{235 \text{ МПа}}{1,025} = 229,2 \text{ МПа}; \quad A_{\text{нетто}} = \frac{F_p}{1,3 \cdot \gamma \cdot R_T^H} = \frac{3093,5 \text{ кН}}{1,3 \cdot 0,9 \cdot 22,9} = 112,5 \text{ см}^2.$$

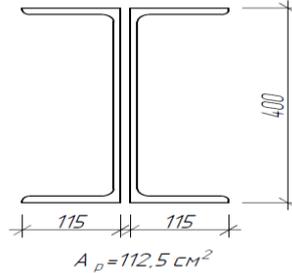
По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_6^H}{\gamma_m} = \frac{365 \text{ МПа}}{1,025} = 356 \text{ МПа}; \quad A_{\text{нетто}} = \frac{F_p}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{3093,5 \text{ кН}}{0,9 \cdot 35,6} = 96,5 \text{ см}^2.$$

Из двух значений площади поперечного сечения принимаем большее:

$$A_{\text{нетто}} = 112,5 \text{ см}^2;$$

Приведем пример подбора сечения шпренгельной балки при $k=0,001$.
 Назначаем 2 швеллера 40П с параллельными поясами [16-18].



$$R = \frac{235 \text{ МПа}}{1,025} = 229,2 \text{ МПа}.$$

2. Подбор сечения затяжки. Растягивающее усилие $F_3=2896,5 \text{ кН}$.

$$A_{\text{нетто}} = \frac{F_p}{1,3 \cdot \gamma \cdot R_T^H} = \frac{2896,5 \text{ кН}}{1,3 \cdot 0,9 \cdot 22,9} = 105,3 \text{ см}^2.$$

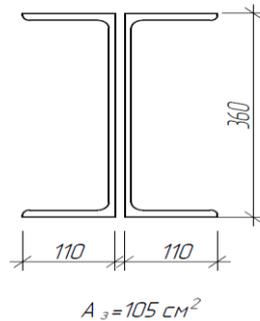
По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_6^H}{\gamma_m} = \frac{365 \text{ МПа}}{1,025} = 356 \text{ МПа}; \quad A_{\text{нетто}} = \frac{F_p}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{2896,5 \text{ кН}}{0,9 \cdot 35,6} = 90,4 \text{ см}^2.$$

Из двух значений площади поперечного сечения принимаем большее:

$$A_{\text{нетто}} = 105,3 \text{ см}^2.$$

Назначаем 2 швеллера 36П с параллельными поясами, в количестве – 2 шт:



3. Подбор сечения стоек. Сжимающее усилие $F_c=1086,2 \text{ кН}$.

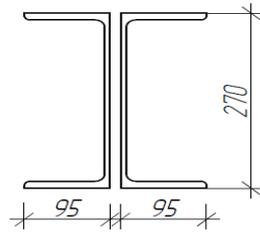
Условие устойчивости продольного изгиба стойки:

$$\frac{F_c}{\varphi_x \cdot A_c} = \frac{1086,2 \text{ кН}}{0,9 \cdot 35,6 \text{ см}^2} = 90,4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \gamma R = 0,9 \cdot 20 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 18 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где

$$A_c = \frac{F_c}{\varphi_x \cdot \gamma \cdot R} = \frac{1086,2 \text{ кН}}{0,782 \cdot 0,9 \cdot 20 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 30 \text{ см}^2.$$

Для определения коэффициента продольного изгиба φ_x необходимо задаться гибкостью λ . При известном расчетном сопротивлении $R = 20 \frac{kH}{cm^2}$ и $\lambda = 70$ коэффициент продольного изгиба $\varphi_x = 0,782$ [20]. Принимаем [20] сечение в виде двух швеллеров 27П с параллельными поясами:



$$A_c = 64 \text{ см}^2$$

4. Подбор сечения перекладины. Усилия $M_{max} = 676,7 \text{ кНм}$, $Q_{max} = 868,4 \text{ кН}$.

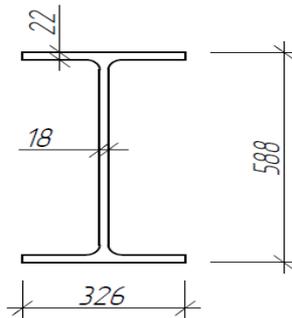
Условие прочности для перекладины:

$$\frac{F_n}{A_n} \leq \gamma R, \quad \text{где} \quad A_n = \frac{F_n}{\gamma \cdot R} = \frac{868,4 \text{ кН}}{0,9 \cdot 20 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 48,2 \text{ см}^2 \leq \gamma R = 0,9 \cdot 20 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 18 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$F_n = F_p \cos \alpha = 3093 \text{ кН} \cdot \cos 21^\circ = 2896,$$

где, F_n – усилие в перекладине,

A_n – площадь поперечного сечения перекладины.



Определение напряжений в сечениях и условия прочности (перекладина из широкополочного двутавра 60Ш4)

Напряжение от изгиба определяется по следующей формуле:

$$\sigma_u = \frac{M_{max}}{W} = \frac{67670 \text{ кН} \cdot \text{см}}{6055 \text{ см}^3} = 11,2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < \gamma R = 0,9 \cdot 24 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 21,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где W – момент сопротивления сечения перекладины изгибу.

Напряжение от сжатия:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_n}{A_n} = \frac{2896 \text{ кН}}{298 \text{ см}^2} = 9,7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < \gamma R = 0,9 \cdot 24 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 21,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где, $F_n = 2896 \text{ кН}$ – усилие в перекладине,

A_n – площадь поперечного сечения перекладины.

Касательные напряжения:

$$\tau = \frac{S \cdot Q_{max}}{I_n \cdot t_{cm}} = \frac{1343 \text{ см}^3 \cdot 868 \text{ кН}}{182500 \text{ см}^4 \cdot 2 \text{ см}} = 4,56 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < \gamma R = 0,9 \cdot 24 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 21,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где, S – статический момент половины сечения перекладины;

Q_{max} – максимальная поперечная сила;

I_n – момент инерции перекладины;

t_{cm} – толщина стенки перекладины.

Условие по 4-й теории прочности [17]:

$$\sigma_{np} = \sqrt{(\sigma_u + \sigma_{сж})^2 + 3 \cdot \tau^2}, < \gamma R = 21,6 \frac{kH}{cm^2}.$$

В середине сечения $\sigma_u = 0$,

$$\sigma_{np} = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{\left(9,7 \frac{kH}{cm^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(4,56 \frac{kH}{cm^2}\right)^2} = 12,58 \frac{kH}{cm^2}, < \gamma R = 0,9 \cdot 24 \frac{kH}{cm^2} = 21,6 \frac{kH}{cm^2}.$$

Касательным напряжения $\tau = 0$, тогда

$$\sigma_{np} = \sqrt{(\sigma_u + \sigma_{сж})^2} = 15,07 \frac{kH}{cm^2} + 0,2 \frac{kH}{cm^2} = 20,9 \frac{kH}{cm^2}, < \gamma R = 0,9 \cdot 24 \frac{kH}{cm^2} = 21,6 \frac{kH}{cm^2}.$$

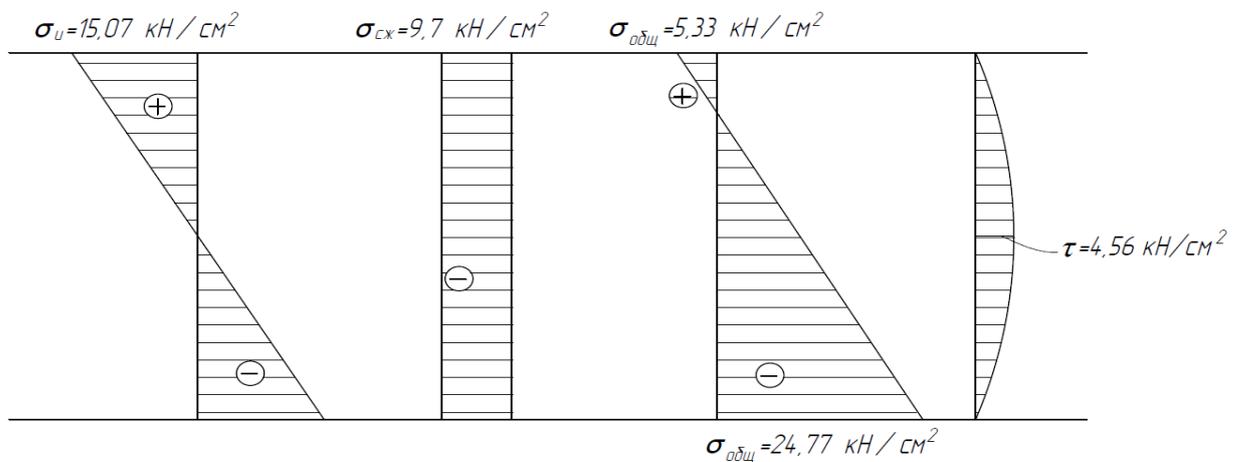


Рис. 8. Эпюра напряжений
 Fig. 8. Stress diagram

Для определения массы конструкции находим сумму произведений длин на погонные веса всех элементов балки. Результаты расчета сгруппированы в таблице 3:

$$G_1 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 12m \cdot 234,2 \frac{kg}{m} + 8m \cdot 31,8 \frac{kg}{m} + 8m \cdot 24 \frac{kg}{m} + 17,08m \cdot 36,5 \frac{kg}{m} = 3880kg.$$

$$G_2 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3880kg.$$

$$G_3 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3947kg.$$

$$G_4 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4111kg.$$

$$G_5 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4016kg.$$

$$G_6 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4489kg.$$

$$G_7 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4741kg.$$

$$G_8 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4538kg.$$

$$G_9 = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 3912kg.$$

$$G_{10} = l_1 \cdot g_1 + l_2 \cdot g_2 + l_3 \cdot g_3 + l_4 \cdot g_4 = 4507kg.$$

Таблица 3. Конструктивные элементы и соответствующие им массы металла
Table 3. Constructional elements and their corresponding metal masses

№	Значение параметра k	Конструктивные элементы								Общая масса, кг
		Переключательная балка		Затяжка		Стойки		Раскосы		
		Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	Кол-во	Наим-е	
1	0	1	60Ш4	2	30П	2	27П	2	33П	3880
2	0,0001	1	60Ш4	2	30П	2	27П	2	33П	3880
3	0,0005	1	60Ш4	2	33П	2	27П	2	33П	3947
4	0,001	1	60Ш4	2	36П	2	37П	2	33П	4111
5	0,0025	1	60Ш3	2	36П	2	27П	2	33П	4016
6	0,005	1	70Ш4	2	36П	2	27П	2	33П	4489
7	0,01	1	60Ш4	2	30П	2	24П	2	33П	4741
8	0,05	1	Дв. Сост.	2	16П	2	14П	2	18аП	4538
9	0,1	1	Дв. Сост.	2	12П	2	8П	2	12П	3912
10	∞	1	Дв. Сост.	-	-	-	-	-	-	4507

Обозначения, использованные в таблице 3: 60Ш4, 70Ш4.... – двутавр широкополочный; 27П, 30П.... – швеллер с параллельными поясами; Дв.сост. – двутавр составного сечения с параметрами: при $k=0,05$ $t_p=20$ мм, $t_{ст}=18$ мм, $h=1400$ мм, $b=360$ мм; при $k=0,1$ $t_p=20$ мм, $t_{ст}=12$ мм, $h=1400$ мм, $b=440$ мм; при $k=\infty$ $t_p=20$ мм, $t_{ст}=16$ мм, $h=1800$ мм, $b=440$ мм, где, t_p – толщина поясов, $t_{ст}$ – толщина стенки, h – высота балки, b – ширина балки.

Обсуждение результатов. Безразмерный параметр k , зависящий от «геометрии» подкрановой балки, сечений её элементов, их размеров, а также от конструктивных особенностей шпренгельной системы, расчетных параметров металла – является интегральной характеристикой, удобной для анализа напряженно-деформированного состояния конструкции.

Как показывают составленные нами таблицы и построенные графики, параметр k , меняясь в диапазоне от 0 до бесконечности, позволяет определять внутренние силовые факторы и изменения массы всей конструкции, что очень удобно при проектировании шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками.

На основании построенного алгоритма можно проводить исследования напряженно-деформированного состояния шпренгельных подкрановых балок при любом шаге колонн промышленных зданий.

Вывод. В результате проведенных здесь исследований была выявлена зависимость моментов и поперечных сил от безразмерного параметра k , были построены соответствующие графики и вычислена масса подкрановой балки. Наиболее экономичной оказалась шпренгельная подкрановая балка при $k=0,0001$. Самой неэкономичной – при $k=0,05$ и $k = \infty$. Можно сказать, что использование подкрановых шпренгельных балок по сравнению с обычными балками более выгодно. В рассмотренных здесь примерах экономия металла составила 14%. Изложенная здесь методика позволяет выполнять расчет и проектирование шпренгельных подкрановых балок с двумя стойками.

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т.42. - №3, 2016 г.- С.119-131.
2. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
3. Егоров В.В. Григорьев П.Н. Колебания шпренгельных систем с составной балкой жесткости. Транспортное, промышленное и гражданское строительство. Известия ПГУПС. №4. 2008. с. 17-24.
4. Егоров В.В. Работа предварительно напряженных шпренгельных систем в условиях динамических воздействий. Материалы VI научно-методической конференции ВИТУ (14 марта 2002 года). – СПб.: ВИТУ, 2002. – С. 86-91.
5. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников Расчет стальных конструкций. М.:75г.- С.30-41.
6. Ливановский Н.Н., Богатырева И.В. Усиление железобетонных балок шпренгельными затяжками и вложенными шпренгелями. XII международная конференция студентов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 21-24 апреля 2015 г. С.1338-1340.
7. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. Сб. тр. V Международной научно-практической конференции «Научные исследования: от теории к практике». Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
8. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
9. «Металлические конструкции» - под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
10. Сибгатуллин М.Т. Диссертация. Совершенствование металлодеревянных шпренгельных балок. 2003. - С.114-121.
11. Патент 130333 РФ. МПК E04G 23/02. Шпренгель для усиления и обеспечения живучести изгибаемого железобетонного элемента / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Богатырева. Заявлено 08.02.2013; Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 5 с.
12. Патент РФ на изобретение №2169242, E04 C 3/08. Шпренгельная ферма / Алексашкин Е.Н., Егоров В.В., Забродин М.П., Сметанин Д.С. Опубл. 20.06. 2001 Бюл. №17.
13. Патент РФ на изобретение №2169243, E04 C 3/10. Предварительно напряженная шпренгельная ферма / Егоров В.В., Алексашкин Е.Н. Опубл. 20.06. 2001 в Бюл. №17.
14. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции. Нормы проектирования. СНиП II-23-81*. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. С.48-49.
15. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. СНиП 2.01.07-85*. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2003. С.6-7.
16. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1980. С.195-196.
17. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». Нормы проектирования - Москва, стройиздат, 1990г. - 95с. С.48-49.
18. СНиП 2-01-07-85* «Нагрузки и возведения». - Москва, стройиздат, 1986г. -105с., с изм. На 1 января 1987г. И 1 июля 1990г., от 5 июля 1993г. И 29 мая 2003г. С.6-7.
19. Смирнов А.А. Развитие однопролетных несущих конструкций. Всероссийский журнал для профессионалов «СтройПРОФиль». Металлические конструкции. №4-11. 2011. С.35-37.
20. Юсупов А.К. Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». ДГТУ . Махачкала, 2010. С.222-231.
21. Юсупов А.К. Методы прикладной математики в строительной механике. Том 1. ДГТУ . Махачкала, 2008. С.80-82.
22. Ф. Харг (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84.

References:

1. Akaev N.K., Yusupov A.K. Algorithm rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016;42(3):119-131 [Akaev N.K., Yusupov A.K. Calculation algorithm of strut-framed girders. Herald of Daghestan State Technical University 2016;42(3):119-131 (in Russ.)]

2. Azhermachev S.G. Priblizhenny metod rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2011;37:34-39. [Azhermachev S.G. Approximate calculation method for strut-framed girders. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2011;37:34-39. (in Russ.)]
3. Egorov V.V., Grigor'ev P.N. Kolebaniya shprengel'nykh sistem s sostavnoy balkoy zhestkosti. Transportnoe, promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. Izvestiya PGUPS. 2008;4:17-24. [Egorov V.V., Grigor'ev P.N. Vibrations of strut-framed systems with combined stiffening girder. Transportnoe, promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. Izvestiya PGUPS. 2008;4:17-24. (in Russ.)]
4. Egorov V.V. Rabota predvaritel'no napryazhennykh shprengel'nykh sistem v usloviyakh dinamicheskikh vozdeystviy. Materialy VI nauchno-metodicheskoy konferentsii VITU. Sankt-Peterburg; 2002. S. 86-91. [Egorov V.V. Operation of pre-stressed strut-framed systems in the conditions of dynamic impact. Materials of VI scientific-methodological VITU conference. Saint-Petersburg; 2002. P. 86-91. (in Russ.)]
5. Klykov V.M., Likhtarnikov Ya.M. Raschet stal'nykh konstruksiy. M.;1975. C.30-41. [Klykov V.M., Likhtarnikov Ya.M. Calculation of steel constructions. Moscow;1975. C.30-41. (in Russ.)]
6. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Usilenie zhelezobetonnykh balok shprengel'nymi zatyazhkami i vlozhennymi shprengelyami. Materialy XII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk". Tomsk; 2015. C.1338-1340. [Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Reinforcement of iron-concrete girders by strut-framed grips and inserted struts. Materials of XII International conference of students and young scientists "Development perspectives of fundamental sciences". Tomsk; 2015. C.1338-1340. (in Russ.)]
7. Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Razrabotka i issledovanie shprengel'nykh balok novoy raskroyki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike". Tom 2. Tekhnicheskie nauki. Cheboksary; 2015. S.62-70. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and investigation of strut-framed girders of a new cutting mode. Materials of V International scientific-practical conference "Scientific studies: from theory to practice". Volume 2. Technical Sciences. Cheboksary; 2015. P.62-70. (in Russ.)]
8. Metallicheskie konstruksii (pod redaktsiyey E.I. Belenya). Moskva: Stroyizdat; 1986. S.382-384. [Metallic constructions. Belenya E.I. (Ed.). Moscow: Stroyizdat; 1986. P.382-384. (in Russ.)]
9. Metallicheskie konstruksii (Pod redaktsiyey Yu.I. Kudishina). Moskva: Akademiya; 2011. S. 439-442. [Metallic constructions. Kudishin Yu.I. (Ed.). Moscow: Akademiya; 2011. P. 439-442. (in Russ.)]
10. Sibgatullin M.T. Sovershenstvovanie metalloderevyannykh shprengel'nykh balok. Dissertatsiya. 2003. S.114-121. [Sibgatullin M.T. Improvement of metallic-wooden strut-framed girders. Dissertation. 2003. S.114-121. (in Russ.)]
11. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Bogatyreva I.V. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibaemogo zhelezobetonnoogo elementa. Patent RF №130333. MPK E04G. Byul. № 20. Opubl. 20.07.2013. [Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Bogatyreva I.V. A strut for reinforcement and durability providing of bending iron-concrete element. Patent RF №130333. MPK E04G. Bull. № 20. Publ. 20.07.2013. (in Russ.)]
12. Aleksashkin E.N., Egorov V.V., Zabrodin M.P., Smetanin D.S. Shprengel'naya ferma. Patent RF №2169242. E04 S 3/08. Byul. №17. Opubl. 20.06. 2001. [Aleksashkin E.N., Egorov V.V., Zabrodin M.P., Smetanin D.S. Strut truss. Patent RF №2169242. E04 S 3/08. Bull. №17. Publ. 20.06. 2001. (in Russ.)]
13. Egorov V.V., Aleksashkin E.N. Predvaritel'no napryazhennaya shprengel'naya ferma. Patent RF №2169243. E04 S 3/10. Byul. №17. Opubl. 20.06. 2001. [Egorov V.V., Aleksashkin E.N. Pre-stressed strut truss. Patent RF №2169243. E04 S 3/10. Bull. №17. Publ. 20.06. 2001. (in Russ.)]
14. Stroitel'nye normy i pravila. Stal'nye konstruksii. Normy proektirovaniya. SNiP II-23-81. M.: TsITP Gosstroya SSSR; 1990. S. 48-49. [Building standards and rules. Steel constructions. Design standards. SNiP II-23-81. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR; 1990. P. 48-49. (in Russ.)]
15. Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdeystviya. Normy proektirovaniya. SNiP 2.01.07-85. M.: TsITP Gosstroya SSSR; 2003. S. 6-7. [Building standards and rules. Loads and impacts. Design standards. SNiP 2.01.07-85. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR; 2003. P. 6-7. (in Russ.)]
16. Stal'nye konstruksii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat; 1980. S. 195-196. [Steel constructions. Designer's reference book. Mel'nikov N.P. (Ed.). Moscow: Stroyizdat; 1980. P. 195-196. (in Russ.)]

17. SNiP II-23-81 “Stal'nye konstruksii”. Normy proektirovaniya. Moskva: Stroyizdat; 1990. S. 48-49. [SNiP II-23-81 “Steel constructions”. Design standards. Moscow: Stroyizdat; 1990. P. 48-49. (in Russ.)]
18. SNiP 2-01-07-85 “Nagruzki i vozvedeniya”. Moskva: Stroyizdat; 1986. 105 s., s izm. na 1.01.1987 i 1.07.1990, ot 5.07.1993 i 29.05.2003. S.6-7. [SNiP 2-01-07-85 “Loads and erections”. Moscow: Stroyizdat; 1986. 105 s., with changes form 1.01.1987 and 1.07.1990, from 5.07.1993 and 29.05.2003. P. 6-7. (in Russ.)]
19. Smirnov A.A. Razvitie odnoproletnykh nesushchikh konstruksiy. StroyPROFIL'. 2011;4-11:35-37. [Smirnov A.A. Development of single-span loadbearing construction. StroyPROFIL'. 2011;4-11:35-37. (in Russ.)]
20. Yusupov A.K. Metallicheskie konstruksii v voprosakh, v otvetakh i v proektirovanii. Makhachkala: DGTU; 2010. С. 222-231. [Yusupov A.K. Metallic constructions in questions, answers and design. Makhachkala: DGTU; 2010. P. 222-231. (in Russ.)]
21. Yusupov A.K. Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike. Tom 1. Makhachkala: DGTU; 2008. С. 80-82. [Yusupov A.K. Methods of applied mathematics in building mechanics. Volume 1. Makhachkala: DGTU; 2008. P. 80-82. (in Russ.)]
22. Khart F., Khenn V., Zontag Kh. Atlas stal'nykh konstruksiy. Moskva: Stroyizdat; 1977. S. 37-84. [Khart F., Khenn V., Zontag Kh. Atlas of steel constructions. Moscow: Stroyizdat; 1977. P. 37-84. (in Russ.)]

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 structures and hydraulic structures.

Osman M. Ustarhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of structures and hydraulic structures, faculty of architecture and construction.

Abusupyuan K.Yusupov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of structures and hydraulic structures, faculty of architecture and construction.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.05.2017.

Принята в печать 16.06.2017.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 27.05.2017.

Accepted for publication 16.06.2017.

Для цитирования: 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

For citation: Levitskiy T.Yu. Relevant directions for the production of competitive construction products on the basis of innovation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 197-209. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-197-209

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 69.003

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-197-209

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ИННОВАЦИОННОЙ ОСНОВЕ

Левицкий Т.Ю.

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия
e-mail: levitskytimur@mail.ru

Резюме: Цель. В статье обоснована необходимость и раскрыты особенности производства высокотехнологичной конкурентоспособной строительной продукции инновационного типа на современном этапе модернизации строительной отрасли. **Метод.** В ходе исследования применен программно-целевой метод, положенный в основу разработки программы инновационного развития строительного производства. **Результат.** Систематизированы актуальные направления инновационного развития строительного производства. Обобщен мировой опыт применения параметрической модели технического регулирования производства строительной продукции. В целях повышения уровня инновационной активности строительных организаций предложен комплекс практических мероприятий, реализация которого обеспечит вывод на рынок конкурентоспособной строительной продукции. **Вывод.** Повышение конкурентоспособности строительной продукции тесно связано с активизацией инновационных процессов: внедрением высоких технологий в производство, в том числе ресурсосберегающих, и расширением выпуска инновационной продукции, обладающей лучшими потребительскими свойствами, способной в условиях реализации стратегии импортозамещения успешно конкурировать на рынке с зарубежными аналогами. Модернизация строительной отрасли на основе внедрения высокотехнологичных методов производства предъявляет новые требования к профессиональным компетенциям персонала, производящего конкурентоспособную строительную продукцию. Для решения поставленных задач предложен инструментарий совершенствования механизма управления инновационной деятельностью строительных организаций, обеспечивающий интеграцию институциональных и производственных условий для масштабного освоения прогрессивных технологий и производства наукоемких видов строительной продукции.

Ключевые слова: конкурентоспособность, строительная продукция, инновации, техническое регулирование, управление

ECONOMIC SCIENCE

RELEVANT DIRECTIONS FOR THE PRODUCTION OF COMPETITIVE CONSTRUCTION PRODUCTS ON THE BASIS OF INNOVATION

Timur Yu. Levitskiy

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
e-mail: levitskytimur@mail.ru

Abstract Objectives The article substantiates the necessity for competitive innovative high-tech construction products at the present stage of modernisation of the construction industry and reveals some peculiarities of their manufacture. **Methods** In the course of the research, a programme-targeted method was applied, underlying the development of a programme for the innovative development of construction production. **Results** Relevant directions of innovative development of construction production are systematised. The world's application experience of a technical regulation parametric model for construction industry product manufacturing is generalised. In order to increase the level of innovative activity of construction organisations, a set of practical measures is proposed whose implementation will ensure the output of competitive building products to the market. **Conclusion** Increasing the competitiveness of construction products is closely connected with the activation of innovative processes: the introduction of high technology (including resource-saving) into production processes and the expansion of the output of innovative products with the best consumer properties capable of successfully competing on the market with foreign counterparts in the context of import substitution strategies. The modernisation of the construction industry on the basis of introduction of high-tech production methods specifies new requirements to the professional competencies of personnel producing competitive building products. To solve the set problems, a tool for improving the management mechanism of the innovative activity of construction organisations was proposed, ensuring the integration of institutional and production conditions for the large-scale development of advanced technologies and production of science-intensive types of construction products.

Keywords: competitiveness, construction products, innovations, technical regulation, management

Введение. В сложных геополитических условиях качественный скачок в развитии национальной экономики и повышение ее конкурентоспособности неразрывно связаны с созданием условий для укрепления позиций на глобальных и внутренних рынках за счет технологического прогресса, участия в мировых «цепочках» создания добавленной стоимости, разработки новых материалов, внедрения в производственные процессы инновационных технологий, снижения затрат и роста производительности труда.

Одним из главных направлений отраслевой инновационной политики является реформирование строительных организаций, направленное на их адаптацию к возросшим требованиям потребителей к качеству строительной продукции и повышение ее конкурентоспособности в условиях открытого рынка. Это достигается за счет оптимизации имущественных активов строительных организаций, совершенствования форм и методов управления, усиления контроля качества и повышения ответственности руководителей за результаты принимаемых решений, снижения издержек, интенсификации инновационной деятельности [1].

Необходимым условием качественного повышения конкурентоспособности строительной продукции является удовлетворение потребности строительного производства в широкой номенклатуре современных конкурентоспособных строительных материалов, изделий и конструкций, обеспечивающих долговечность и надежность, выполнение требований по тепло- и энергоэффективности, а также архитектурной выразительности сооружаемых зданий и сооружений, снижение затрат при их эксплуатации [2-6].

Вместе с тем, в условиях принятого в 2014 году Правительством РФ курса на импортозамещение стратегически важным становятся снижение зависимости строительной отрасли от иностранных технологий, оборудования, сырья, компонентов, конструкций и динамичное развитие строительного производства на отечественной инновационной основе [7-9].

Постановка задачи. Структурная перестройка материально-технической базы строительной отрасли вызывает необходимость освоения новой номенклатуры изделий и конструкций, применения инновационных методов строительства и организацию на этой основе производства конкурентоспособной продукции, что в свою очередь, актуализирует целесообразность данного исследования.

Методы исследования. В современных условиях развития строительная отрасль изменила акценты в инновационной сфере, увеличив долю процессных инноваций и затрат на приобретение техники. Это позволяет в перспективе прогнозировать снижение удельного веса устаревшего оборудования за счет технологического обновления, хотя еще сохраняется рост удельного веса изношенных машин [2].

Таблица 1. Состояние основного оборудования в строительной отрасли (на 01.01.2017г.)
Table 1. Condition of the main equipment in the construction industry (as of 01.01.2017.)

Виды оборудования	Наличие оборудования, тыс. штук		Удельный вес устаревшего оборудования, %	
	На 1.01.2017 г.	2016 г.	2017 г.	2016 г.
Экскаваторы одноковшовые	11,8	12,3	33,4	31,2
Бульдозеры на тракторах	8,9	9,6	48,1	46,7
Автогрейдеры	4,1	4,1	45,5	46,3
Краны:				
– на автомобильном ходу	7,2	7,7	36,2	36,3
– на пневмоколесном ходу	1,4	1,5	44,2	42,8
– на гусеничном ходу	2,2	2,4	63,1	63,6
башенные	3,7	4,1	46,2	46,6
Скреперы	0,3	0,3	79,2	74,2

Источник [2 с. 81]

В тоже время, крайне низок удельный вес строительных организаций, осуществляющих технологические, организационные и маркетинговые инновации в общем числе организаций по РФ, в их числе: 3,4 % строительных организаций, осуществляющих монтаж зданий и сооружений из сборных конструкций и 1,5 % строительных организаций, выполняющих прочие строительные работы [3].

В региональном аспекте высока доля строительных организаций, необеспеченных на конец второго квартала 2017 года строительными машинами и механизмами (табл. 2) [3].

Таблица 2. Строительные организации, необеспеченные строительными машинами и механизмами

Table 2. Construction organizations, unsecured by construction machines and mechanisms

Регионы России	Доля строительных организаций, в общей численности организаций, %
Томская область	34
Чеченская Республика	20
Республика Башкортостан	17
Республика Крым	17
Республика Адыгея	12
Республика Калмыкия	12
Смоленская область	10

Слабо прослеживается тенденция незначительного увеличения затрат на внедрение новых технологий по отдельным видам работ (табл.3) и переориентация строительства на техно-

логические инновации, обеспечивающие решение первоочередной задачи - поддержание и повышение конкурентоспособности строительного производства за счет эффективного ресурсосбережения [4].

Таблица 3. Динамика затрат на технологические инновации
Table 3. Dynamics of costs for technological innovation

Виды строительных работ	Затраты на технологические инновации, млрд. руб.			Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме выполненных работ, %		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015
Монтаж зданий и сооружений из сборных конструкций	-	-	0,01	-	-	0,04
Устройство покрытий зданий и сооружений	-	-	0,01	-	-	0,04

Тогда как, увеличение объема выпуска строительной продукции на основе механизма ресурсосбережения, позволит интенсифицировать инновационную сферу в строительстве путем накопления и использования на эти цели собственных средств строительных организаций.

Наиболее перспективными направлениями инновационной деятельности строительных организаций являются [5]:

- а) инновации в проектировании строительных объектов;
- б) инновации в производстве стройматериалов;
- в) инновации в производстве строительных конструкций;
- г) инновации в механизации строительных работ;
- д) инновации в организации, технологии и управлении строительством.

Экономическая целесообразность инноваций предполагает выбор передовой технологии в виде высокотехнологичных подъемно-транспортных машин и оборудования, используемых в строительстве. Большое значение для повышения эффективности инновационной деятельности имеет типизация строительства, так как она позволяет использовать стандартные строительные материалы, конструкции и детали, которые являются предпосылкой для производства конкурентоспособной продукции. В свою очередь, типизация зависит от унификации планировочных и конструктивных схем зданий и сооружений [10-11].

В настоящее время в строительстве широко используются новые конструкционные и отделочные материалы, разрабатываются эффективные технологии, автоматизируется инженерное оборудование. Так, в промышленном строительстве широко используются унифицированные и гибкие объемно-планировочные и конструктивные решения, блокирование основных и вспомогательных цехов, возводятся здания павильонного типа, с укрупненной сеткой колонн и панельными ограждающими конструкциями [12-16].

В жилищном строительстве массовое применение получили панельные конструкции, изготовленные с применением легких бетонов на пористых заполнителях, эффективных утеплителей, облицовочных, гидро- и звукоизоляционных материалов.

Применение инновационных технологий повышает рентабельность проектов для застройщиков и позволяет увеличить размеры целевой аудитории, путем строительства доступного жилья.

В практике своей деятельности многие строительные предприятия применяют современные ресурсосберегающие технологии. К ним, в частности, относятся инновационные проекты монолитного каркасного строительства безригельного преднапряженного каркаса, представляющие собой ряд инновационных конструктивных схем возведения монолитного железобетонного

бетонного каркаса зданий и сооружений на базе предварительно напряженных арматурных элементов [17].

Строительство зданий с использованием проектов серии безригельного преднапряженного каркаса способствует устранению недостатков монолитного строительства, поскольку резервы снижения себестоимости строительства заключаются в уменьшении расхода бетона и арматуры, в снижении трудоемкости опалубочных и бетонных работ.

За рубежом все более широкое применение находят монолитные перекрытия увеличенного пролета с натяжением арматуры на бетон [18-20]. Например, в США таких конструкций ежегодно возводится более 10 млн.м³. [19].

В настоящее время напрягаемая арматура в монолитных конструкциях все чаще применяется без сцепления с бетоном, а арматуру от коррозии или защищают специальными защитными оболочками, или обрабатывают антикоррозионными составами. Такой каркас на 20–40% легче, чем традиционный. При этом внутренний и наружный слои таких стен могут быть из любых материалов, соответствующих архитектурным, эксплуатационным и другим требованиям.

Инновационные методы возведения предварительно напряженного каркаса позволяют снизить вес здания в 1,5-2 раза, и до 35% сократить себестоимость монолитного строительства [21-22].

Следует обратить внимание, что использование инноваций в строительстве – немаловажный фактор, способствующий снижению цены, а значит и экономической приемлемости создаваемых объектов. Применение новых строительных материалов может значительно снизить стоимость квадратного метра, а каркасные и объемно-модульные дома по праву считаются наиболее экономически выгодными и быстровозводимыми.

Повышение конкурентоспособности строительной продукции во многом зависит от объемно-планировочных решений предлагаемых к строительству проектов, жизненного цикла наиболее важных технологических новшеств в строительных материалах, деталях, изделиях, конструкциях в сравнении с циклом существующих технологических разработок и от прогнозирования возможного влияния нововведений на реализацию строительной продукции; от применяемых методов управления, которые в совокупности создают условия для производства конкурентоспособной продукции, представленных в таблице 4 [23-25].

С учетом сформулированных положений, выбор конкретного направления инновационной деятельности строительной организации предлагается проводить на основе системы показателей [23]:

- удельный вес рабочих, охваченных механизированным и автоматизированным трудом;
- фондовооруженность и энерговооруженность труда;
- удельный вес затрат на инновационные технологии в стоимостном объеме производимой продукции;
- средний возраст функционирующих технологических процессов;
- мощность оборудования и удельный вес обновленного оборудования в общем парке;
- средний срок эксплуатации оборудования;
- коэффициент физического износа оборудования;
- доля морально и физически устаревших машин, механизмов и инструментов в общей их численности;
- коэффициент технологической оснащенности производства;
- степень утилизации отходов производства;
- удельный вес продукции, производимой из промышленных и коммунальных отходов.

Таблица 4. Условия повышения конкурентоспособности строительной продукции на инновационной основе
Table 4. Conditions for improving the competitiveness of construction products on an innovative basis

Применение прогрессивных объемно-планировочных и конструктивных решений	Совершенствование технологии производства	Совершенствование методов организации и управления
Объемно-планировочные решения зданий и сооружений исходя из базового уровня стоимости 1 кв. м общей площади в зависимости от уровня комфорта.	Применение наноструктурированных строительных материалов улучшенных характеристик за счет использования механохимической активации исходного сырья.	Своевременная поставка строительных материалов и изделий в зону монтажных работ, исключая временное складирование и дополнительные перевозки.
Внедрение в проектирование жилых зданий новых норм инсоляции помещений и обеспечение этим повышения плотности застройки.	Применение бесцементных вяжущих смесей из полимерных композиционных строительных материалов, а также из промышленных и коммунальных отходов (зола, стеклянный бой, древесные опилки и т.п.).	Обеспечение оптимальных «плеч» транспортировки товарного бетона и раствора на строящиеся объекты; обеспечение оптимальных «плеч» перевозок грунта для строительных объектов и т.п.
Применение новых типов свайных фундаментов (буросекунционные сваи, буроинъекционные сваи, струйные технологии); фундаментов для малоэтажного строительства - безростверковых, прерывисто-ленточных, сборно-монолитных и т.д.	Повышение качества фасадных конструкций (долговечности) и уровня их технологичности при монтаже; применение отделки фасадных поверхностей фактурными составами.	Организация тендеров между поставщиками материальных ресурсов; отказ от услуг посреднических организаций; организация производства преимущественно из местного сырья; регулирование социально-экологической направленности инноваций.
Применение в малоэтажном строительстве конструкции наружных стен из эффективных мелкоштучных материалов, заливочного или плитного утеплителя вместо традиционных крупнопанельных стен.	Внедрение тонкостенных труб из полиэтилена диаметром до 1200 мм для реконструкции подземных сетей канализации методом протяжки внутри ветхих коллекторов; внедрение скорлуп-оболочек для изоляции труб в зданиях в целях снижения теплопотерь.	Комплексная механизация и автоматизация строительного производства; применение технологий оперативно-информационного моделирования (ВИМ-технологии), оптимизирующей процесс строительства.
Оптимизация толщины внутренних стен в зависимости от нагрузки на стены; применение трехслойных наружных стен из эффективных теплоизоляционных материалов конструкций; разработка новых гидроизоляционных сооружений	Внедрение крупногабаритных агрессивностойких фильтрующих полимерных оболочек для защиты подвальных помещений зданий.	Совершенствование системы подготовки менеджеров по управлению инновациями в строительстве; разработка программы стимулирования инноваций; взаимодействие с центрами субконтракции.

Обсуждение результатов. Как уже было отмечено, инновационная деятельность способствует повышению выживаемости в конкурентной борьбе, что особенно важно для строительной организации. В силу своей специфики строительным организациям приходится проявлять большую активность на рынке, используя свою гибкость и способность к оперативной переориентации в методах повышения конкурентных преимуществ.

Высокие требования к качеству – следствие глобальных требований рынка, который актуализировал необходимость внесения изменения в управление строительными организациями, поскольку их рыночные отношения должны быть направлены на повышение конкурентоспособности продукции [23]. Следовательно, необходимо активно воздействовать на все стадии строительного производства, чтобы добиваться повышения качества продукции одновременно с инновационными преобразованиями в отрасли.

В настоящее время большинство экономически развитых стран (ряд государств Европейского союза, Канада, Австралия, Новая Зеландия, Республика Сингапур и др.) в целях повышения качества производимой продукции применяют параметрическую модель технического регулирования [24-28].

Параметрическая модель предполагает, что обязательные требования к продукции задаются не в виде конкретных показателей и способов их достижения, а в виде ожидаемого результата, целей и задач. В рамках параметрической модели исполнитель требований имеет возможность выбрать собственные средства достижения параметрических показателей либо воспользоваться одобренными нормами и стандартами.

В контексте строительной отрасли, в качестве результата принимается экономический эффект; целью является повышение качества строительной продукции; задачами - экономия от снижения себестоимости продукции; прирост валовой или чистой прибыли за счет проведенных инновационных мероприятий.

Расчет годового экономического эффекта от создания новых строительных конструкций, от совершенствования конструкций на основе применения нового материала с целью повышения долговечности и улучшения эксплуатационных качеств конструкций производится по формуле [29]:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 + Z_{c1}) \times K_c + \mathcal{E}_3 - (Z_2 + Z_{c2})] \times A_2, \quad (1)$$

где A_2 – годовой объем строительного-монтажных работ с применением новых строительных конструкций, в натуральных единицах;

Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на заводское изготовление конструкций с учетом стоимости транспортировки до строительной площадки по сравниваемым вариантам;

Z_{c1} и Z_{c2} – приведенные затраты по возведению конструкций на строительной площадке по сравниваемым вариантам;

\mathcal{E}_3 – экономия при эксплуатации конструкций за срок их службы;

K_c – коэффициент изменения срока службы новой конструкции по сравнению с базовым вариантом.

K_c рассчитывается по формуле:

$$K_c = (P_1 + E_n) / (P_2 + E_n), \quad (2)$$

где $P_1 + E_n$, и $P_2 + E_n$ – коэффициенты реновации, принимаются по справочным таблицам.

Расчет годового экономического эффекта от применения в строительстве новых технологических процессов, механизации и автоматизации производства производится по формуле:

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2) \times A_2, \quad (3)$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на единицу объема продукции, выполняемого соответственно с применением базовой и новой техники, руб.;

A_2 – годовой объем работ, выполняемых в отчетном году с применением новой техники.

Техническое регулирование в Российской Федерации осуществляется в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», а с 1 января 2015 г. - в соответствии с Договором о Евразийском экономическом союзе. Технические регламенты Евразийского экономического союза или национальные обязательные требования действуют только в отношении продукции, включенной в утверждаемый Евразийским экономическим союзом единый перечень [30-31].

В отличие от Республики Беларусь и Республики Казахстан, принявших единые технические регламенты о безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий, в Российской Федерации проект технического регламента о безопасности строительных материалов и изделий готовился отдельно от технического регламента о безопасности зданий и сооружений. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия были включены в утвержденный решением Комиссии Таможенного союза от 28 января 2011 г. № 526 в Единый перечень продукции, в отношении которой устанавливаются обязательные требования в рамках Таможенного союза. В 2012 году завершены процедуры внутригосударственного согласования во всех указанных странах.

В настоящее время обязательные требования к строительным материалам и изделиям на территории Российской Федерации установлены следующими техническими регламентами: Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»; Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [30].

В целях перспективного развития системы технического регулирования и стандартизации в строительстве до 2030 года планируется осуществление следующих основных мероприятий [31]:

- принятие единого технического регламента Евразийского экономического союза для зданий и сооружений, строительных материалов и изделий, в соответствии с которым существенные характеристики используемого строительного материала будут устанавливаться на основе базовых требований к зданиям и сооружениям, определенных техническим регламентом Евразийского экономического союза;
- разработка межгосударственных стандартов и обязательных требований к строительным материалам и изделиям.

Повышение уровня функционирования системы технического регулирования и стандартизации в строительстве приведет к существенному росту конкурентоспособности продукции российских производителей; к расширению ассортимента строительных материалов в соответствии с требованиями рынка; к удовлетворенности потребителей и повышению уровня их лояльности к российским производителям; к переориентации покупателей на потребление продукции отечественного производства.

С учетом этого, в целях повышения уровня инновационной активности строительных организаций предложены основные разделы программы инновационного развития отрасли, реализация которой способствует выводу на рынок конкурентоспособной строительной продукции.

1. Обеспечение устойчивой связи науки с производством путем увеличения числа отраслевых научно-исследовательских центров; развитие инжиниринговых центров по разработке и трансферу разработок, а также путем передачи им современных технологий и высокотехнологичного отечественного оборудования;

2. Адаптация нормативно-правовой базы и норм технического регулирования для производства и применения отечественных строительных материалов и технологий, гармонизированных с международными стандартами;

3. Поддержка устойчивого прогнозируемого спроса на инновационную продукцию со стороны заказчиков, в том числе за счет установления приоритета для инновационной продукции при осуществлении закупок для государственных и муниципальных нужд, а также закупок юридическими лицами;

4. Систематизация обязательных требований по применению современных инновационных строительных материалов, обеспечивающих длительный (не менее 20 лет) межремонтный срок эксплуатации зданий и сооружений при финансировании проектов за счет средств федерального бюджета;

5. Институциональная, маркетинговая и информационная поддержка производителей конкурентоспособной строительной продукции на основе действующей геоинформационной системы и сети профессиональных экспертных отраслевых организаций;

6. Усиление инновационной направленности государственных программ по поддержке малого и среднего предпринимательства, составляющего структурную основу инновационных преобразований в строительстве;

7. Обеспечение государственной поддержки в форме субсидии строительным организациям, реализующим инновационные проекты на основе высокотехнологичного оборудования и вовлекающие в производство вторичное сырье.

8. Разработка и внедрение современных требований к профессиональным компетенциям рабочих, технического персонала и управленческих кадров, способных обеспечить проведение модернизации, комплексного перевооружения и внедрение высокотехнологичных методов строительного производства.

Вывод. Потребности рынка — главный стимулирующий импульс инноваций в строительном производстве, побуждающий поиск своей ниши на конкурентном рынке или выявление новых возможностей для повышения конкурентоспособности производимой продукции. Однако любые инициативы, рождающиеся в строительной организации, корректируются рыночными ограничениями.

Следовательно, важнейшее экономическое воздействие инновационной деятельности на конкурентоспособность - технологическое обновление производства на основе ресурсосберегающих технологий и повышения качества выпускаемой продукции.

К системе первоочередных мер, способствующих повышению конкурентоспособности строительной продукции с учетом проводимых инновационных преобразований в отрасли относятся: совершенствование проектных решений зданий и сооружений, обеспечивающих повышение их экономичности и эксплуатационных качеств; повышение сборности строящихся объектов и заводской готовности унифицированных деталей, изделий и конструкций; развитие высокотехнологичного производства и применение эффективных строительных материалов и изделий из железобетона, металла, полимеров и т.п., повышение качества применяемых материалов; повышение уровня комплексной механизации строительного производства, оснащение строек высокотехнологичным оборудованием и инструментом, сокращение доли ручного труда; внедрение передовых методов управления строительным производством.

Библиографический список:

1. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. Распоряжение правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 г. № 868-р, Москва
2. Строительство в России. 2016: Стат. сб. / Росстат. - М., С.111.
3. Россия в цифрах - 2017. Российский статистический ежегодник. Официальное издание [Электронный ресурс] // информационно-издательский центр «Статистика России». – Режим доступа: www.infostat.ru
4. Антипов Ю. Инновационная деятельность как фактор конкурентоспособности фирмы // Маркетинг и маркетинговые исследования. – 2009. - № 3 (89). – С. 212-221.
5. Левицкий Г.Ю., Эсетова А.М. Инновационный потенциал как определяющий фактор роста конкурентных преимуществ строительной продукции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014; 34(3):121-128. DOI:10.21822/2073-6185-2014-34-3-121-128

6. Волчков А. Н. Инновационная активность фирмы на основе применения механизма воспроизводства и обновления основных фондов - стратегический ресурс сохранения конкурентоспособности и экономического роста // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - N 4. - С. 41-46.
7. Воронов А. А. Моделирование конкурентоспособности продукции // Стандарты и качество. – 2004. - N 11. - С. 44-47.
8. Демченко А.О. Роль технологических инноваций в стратегии развития предприятия //Известия Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. - 2010. - № 2. - С. 93-96.
9. Кабакова Э.В. Взаимосвязь конкуренции и инновационной деятельности // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2006. - Т. 4. - № 12-1. - С. 108-111.
10. Лебедева Н.Н. Инновационная активность предприятий как условие их конкурентоспособности//Journal of Institutional Studies = Журнал институциональных исследований. - 2010. - Т. 2. - № 4. - С. 15-21.
11. Напхоненко Н.В. Коммерциализация технологий и конкурентоспособность отечественных предприятий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2007. - N 5. - С. 105-107.
12. Шевченко И. В. Проблемы повышения конкурентоспособности предприятий с позиции мирового опыта // Финансы и кредит. – 2004. - N 10. - С. 6-10.
13. Александрова Е.Н. Инновационный фактор конкурентного позиционирования национальной экономики в системе мирохозяйственных связей: выводы международных сопоставлений / Александрова Е.Н., Шевченко К.И. // Нац. интересы: приоритеты и безопасность. - 2011. - N 2. - С.14-20.
14. Алексеева М.С. Адаптационный механизм как вид организационно-экономического механизма для развития и повышения конкурентоспособности промышленных предприятий / М.С. Алексеева, М.В. Тихонова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. - 2016. - N 2. - С.18-22.
15. Березин А.А. Влияние стратегий издержек на конкурентоспособность компании // Микроэкономика. - 2012. - N 5. - С.47-50.
16. Кара А. Оценка конкурентоспособности специалистов на основе комплексной системы показателей // Пробл. теории и практики управл. - 2011. - N 7. - С.36-44.
17. Клековкин Л.И. Системный подход к пониманию конкурентоспособности как фактор устойчивого развития экономики // Нац. интересы: приоритеты и безопасность. - 2010. - N 17. - С.32-38.
18. Попов С. Конкурентоспособная стратегия на основе корневых компетенций // Экон. стратегии. - 2010. - N 11. - С.70-79.
19. Тарануха Ю.В. О категории "конкурентоспособность" // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 6. Экономика. - 2013. - N 3. - С.3-17.
20. Хейфец Б.А. Импортзамещение и конкурентоспособность // Россия и совр. мир. - 2016. - N 2. - С.6-21.
21. Цемент П.Е. Конкурентоспособность строительной отрасли/П.Е.Цемент, В.В. Алещенко // ЭКО. - 2011. - N 8. - С.167-182.
22. 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.
23. Кони́на Н.Ю. Конкурентоспособность фирмы в глобальном мире; Проспект - Москва, 2012. - 368 с.
24. Özorhon, B., Arditi, D., Dikmen, I., Birgönül, M.T., The performance of international joint ventures in construction. Journal of Management in Engineering, 26, 4, 209-222, 2010.
25. Günhan, S., Arditi, D., International expansion decision for construction companies, Journal of Construction Engineering and Management, 131, 8, 928-937, 2005.
26. Ofori, G., Frameworks for analyzing international construction, Construction Management and Economics, 21, 4, 379-391, 2003.
27. Günhan, S., Arditi, D., Factors affecting international construction. Journal of Construction Engineering and Management, 131, 3, 273-282, 2005.
28. 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.

29. СН 509-78 Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/901708998>
30. О техническом регулировании» [Федер. закон принят Гос.Думой 27 дек. 2009 г.№184] - Российская газета. — 2009.
31. Янин О.Е. Проблемы регулирования инновационной активности предприятий на основе программно - целевых методов/ О.Е.Янин// Промышленная политика в Российской федерации. – 2011. - № 10. –С.45.

References:

1. Strategiya razvitiya promyshlennosti stroitel'nykh materialov na period do 2020 goda i dal'neyshuyu perspektivu do 2030 goda. Rasporyazhenie pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 10 maya 2016 g. № 868-r, Moskva. [Development strategy of building materials industry until 2020 and further perspective until 2030. Directive of RF Government from 10.05.2016. № 868-r, Moscow. (in Russ.)]
2. Stroitel'stvo v Rossii. 2016: Statisticheskiiy sbornik. Moskva: Rosstat; S.111. [Building in Russia. 2016: Statistical collection. Moscow: Rosstat; P.111. (in Russ.)]
3. Rossiya v tsifrakh - 2017. Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. Ofitsial'noe izdanie [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: www.infostat.ru. [Russia in numbers - 2017. Statistical yearbook of Russia. Official publication [Electronic resource]. Free access: www.infostat.ru. (in Russ.)]
4. Antipov Yu. Innovatsionnaya deyatel'nost' kak faktor konkurentosposobnosti firmy. Marketing i marketingovye issledovaniya. 2009;3(89):212-221. [Antipov Yu. Innovative activity as a factor of firm's competitiveness. Marketing i marketingovye issledovaniya. 2009;3(89):212-221. (in Russ.)]
5. Levitskiy T.Yu., Esetova A.M. Innovatsionnyy potentsial kak opredelyayushchiy faktor rosta konkurentnykh preimushchestv stroitel'noy produktsii. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014;34(3):121-128. DOI:10.21822/2073-6185-2014-34-3-121-128. [Levitskiy T.Yu., Esetova A.M. Innivative potential as determinant growth factor of competitive advantages of building products. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2014;34(3):121-128. DOI:10.21822/2073-6185-2014-34-3-121-128. (in Russ.)]
6. Volchkov A.N. Innovatsionnaya aktivnost' firmy na osnove primeneniya mekhanizma vosproizvodstva i obnovleniya osnovnykh fondov - strategicheskiiy resurs sokhraneniya konkurentosposobnosti i ekonomicheskogo rosta. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. 2007;4:41-46. [Volchkov A.N. Firm's innovative activity based on application of reproduction and fixed assets renewal mechanisms is a strategic resource of retention of competitiveness and economic growth. Reference book. Engineering Magazine. 2007;4:41-46. (in Russ.)]
7. Voronov A.A. Modelirovanie konkurentosposobnosti produktsii. Standarty i kachestvo. 2004;11:44-47. [Voronov A.A. Modeling of product's competitiveness. Standards and Quality. 2004;11:44-47. (in Russ.)]
8. Demchenko A.O. Rol' tekhnologicheskikh innovatsiy v strategii razvitiya predpriyatiya. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo universiteta ekonomiki i finansov. 2010;2:93-96. [Demchenko A.O. The importance of technological innovations in the strategy of enterprise's development. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo universiteta ekonomiki i finansov. 2010;2:93-96. (in Russ.)]
9. Kabakova E.V. Vzaimosvyaz' konkurentsii i innovatsionnoy deyatel'nosti. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2006;4(12-1):108-111. [Kabakova E.V. Competitiveness and innovative activity interrelation. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2006;4(12-1):108-111. (in Russ.)]
10. Lebedeva N.N. Innovatsionnaya aktivnost' predpriyatiy kak uslovie ikh konkurentosposobnosti. Journal of Institutional Studies. 2010;2(4):15-21. [Lebedeva N.N. Innovative activity of enterprises acting as their competitiveness condition. Journal of Institutional Studies. 2010;2(4):15-21. (in Russ.)]
11. Napkhonenko N.V. Kommertsializatsiya tekhnologiy i konkurentosposobnost' otechestvennykh predpriyatiy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2007;5:105-107. [Napkhonenko N.V. Commercialisation of technologies and competitiveness of national enterprises. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2007;5:105-107. (in Russ.)]
12. Shevchenko I. V. Problemy povysheniya konkurentosposobnosti predpriyatiy s pozitsii mirovogo opyta. Finansy i kredit. 2004;10:6-10. [Shevchenko I. V. Problems of enterprise competitiveness elevation from the perspective of world's experience. Finance and credit. 2004;10:6-10. (in Russ.)]

13. Aleksandrova E.N., Shevchenko K.I. Innovatsionnyy faktor konkurentnogo pozitsionirovaniya natsional'noy ekonomiki v sisteme mirokhozaystvennykh svyazey: vyvody mezhdunarodnykh sopostavleniy. Nats. interesy: priority i bezopasnost'. 2011;2:14-20. [Aleksandrova E.N., Shevchenko K.I. Innovative factor of national economics competitive positioning in a system of micro-economic relations: international comparison results. National interests: priorities and security. 2011;2:14-20. (in Russ.)]
14. Alekseeva M.S., Tikhonova M.V. Adaptatsionnyy mekhanizm kak vid organizatsionno-ekonomicheskogo mekhanizma dlya razvitiya i povysheniya konkurentosposobnosti promyshlennykh predpriyatiy. Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Ser. 3. Ekonomicheskie, gumanitarnye i obshchestvennye nauki. 2016;2:18-22. [Alekseeva M.S., Tikhonova M.V. Adaptive mechanism as a type of organisation-economic mechanism for the industrial enterprise development and competitiveness elevation. Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 3. Economic, humanitarian and social sciences. 2016;2:18-22. (in Russ.)]
15. Berezin A.A. Vliyanie strategiy izderzhek na konkurentosposobnost' kompanii. Mikroekonomika. 2012;5:47-50. [Berezin A.A. Strategic expenses impact on company's competitiveness. Microeconomics. 2012;5:47-50. (in Russ.)]
16. Kara A. Otsenka konkurentosposobnosti spetsialistov na osnove kompleksnoy sistemy pokazateley. Problemy teorii i praktiki upravleniya. 2011;7:36-44. [Kara A. Competitiveness evaluation of professionals based on complex indicator system. Theoretical and Practical Aspects of Management. 2011;7:36-44. (in Russ.)]
17. Klekovkin L.I. Sistemnyy podkhod k ponimaniyu konkurentosposobnosti kak faktor ustoychivogo razvitiya ekonomiki. Nats. interesy: priority i bezopasnost'. 2010;17:32-38. [Klekovkin L.I. System approach to understanding the competitiveness as a factor of sustainable economic development. National interests: priorities and security. 2010;17:32-38. (in Russ.)]
18. Popov S. Konkurentosposobnaya strategiya na osnove kornevykh kompetentsiy. Ekonomicheskie strategii. 2010;11:70-79. [Popov S. Competitive strategy based on root competencies. Economic Strategies. 2010;11:70-79. (in Russ.)]
19. Taranukha Yu.V. O kategorii "konkurentosposobnost'". Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 6. Ekonomika. 2013;3:3-17. [Taranukha Yu.V. About the "competitiveness" category. Moscow University Economics Bulletin. Series 6. Economics. 2013;3:3-17. (in Russ.)]
20. Kheyfets B.A. Importozameshchenie i konkurentosposobnost'. Rossiya i sovremennyy mir. 2016;2:6-21. [Kheyfets B.A. Import substitution and competitiveness. Russia and the Contemporary World. 2016;2:6-21. (in Russ.)]
21. Tsement P.E., Aleshchenko V.V. Konkurentosposobnost' stroitel'noy otrasli. ECO. 2011;8:167-182. [Tsement P.E., Aleshchenko V.V. Competitiveness in building industry. ECO. 2011;8:167-182. (in Russ.)]
22. Chernikov A.V., Red'ko V.A. Sovremennye innovatsionnye instrumenty povysheniya konkurentosposobnosti kompanii. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 6. Ekonomika. 2011;5:41-62. [Chernikov A.V., Red'ko V.A. Contemporary innovative instruments of raising company's competitiveness. Moscow University Economics Bulletin. Series 6. Economics. 2011;5:41-62. (in Russ.)]
23. Konina N.Yu. Konkurentosposobnost' firmy v global'nom mire. Moskva: Prospekt; 2012. 368 s. [Konina N.Yu. Firm's competitiveness in a global world. Moscow: Prospekt; 2012. 368 p. (in Russ.)]
24. Özorhon B., Arditi D., Dikmen I., Birgönül M.T. The performance of international joint ventures in construction. Journal of Management in Engineering. 2010;26(4):209-222.
25. Günhan S., Arditi D. International expansion decision for construction companies. Journal of Construction Engineering and Management. 2005;131(8):928-937.
26. Ofori G. Frameworks for analyzing international construction. Construction Management and Economics. 2003;21(4):379-391.
27. Günhan S., Arditi D. Factors affecting international construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2005;131(3):273-282.
28. Korkmaz S. and Messner J. I. Competitive Positioning and Continuity of Construction Firms in International Markets. Journal of Management in Engineering. 2008;24(4):207-216.
29. SN 509-78 Instruksiya po opredeleniyu ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya v stroitel'stve novoy tekhniki, izobreteniy i ratsionalizatorskikh predlozheniy. Rezhim dostupa - <http://docs.cntd.ru/document/901708998> [SN 509-78 Instruction for determining the economic efficiency of use in the construction of new equipment, inventions and rationalization proposals. Access mode - <http://docs.cntd.ru/document/901708998> (in Russ.)]

30. О технических регулировании. Федер. Закон №184 от 27.12.2009. Rossiyskaya gazeta. 2009. [About technical regulation. Federal law №184 from 27.12.2009. Rossiyskaya gazeta. 2009. (in Russ.)]
31. Yanin O.E. Problemy regulirovaniya innovatsionnoy aktivnosti predpriyatiy na osnove programmno - tselevykh metodov. Promyshlennaya politika v Rossiyskoy federatsii. 2011;10:45. [Yanin O.E. Problems of regulation of enterprise innovative activity based on programme-goal methods. Promyshlennaya politika v Rossiyskoy federatsii. 2011;10:45. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Левицкий Тимур Юрьевич – аспирант.

Information about the authors:

Timur Yu. Levitskiy - Graduate student.

Конфликт интересов.

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

Поступила в редакцию 04.06.2017.

Received 04.06.2017.

Принята в печать 21.06.2017.

Accepted for publication 21.06.2017.

Для цитирования: Мейланов И.М. Повышение качества инвестиционного проектирования в промышленном строительстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2):210-219. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-210-219

For citation: Meylanov I.M. Improving the quality of investment design in industrial construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 210-219. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-210-219

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 69.003

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-210-219

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Мейланов И.М.

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия
e-mail: derbent_dstu@rambler.ru

Резюме: *Цель.* Разработка комплекса практических мер, обеспечивающих повышение качества инвестиционного проектирования в промышленном строительстве. **Метод.** Основу исследования составляет методология управления проектами, а также методы логического и статистического анализа принятия управленческих решений в инвестиционной деятельности. **Результат.** Раскрыт механизм включения объектов промышленного строительства в федеральную адресную инвестиционную программу. Определена последовательность проведения государственной экспертизы инвестиционных проектов, оптимизирующая проектные решения с целью минимизации их сметной стоимости, в случае, если инвестирование осуществляется с привлечением средств федерального бюджета. Систематизированы качественные и количественные критерии интегральной оценки эффективности использования инвестиционных средств, направляемых в объекты промышленного строительства. **Вывод.** Последовательное проведение государственной инвестиционной политики направлено на развитие научно-технологического и научно-производственного потенциала промышленного строительства за счет обеспечения благоприятных условий для эффективной инновационной деятельности, выбора рациональных инвестиционных стратегий и приоритетных проектов, ориентированных на решение актуальных проблем повышения конкурентоспособности строительного производства. Успешная реализация государственной инвестиционной политики в промышленном строительстве во многом зависит от эффективности инвестиционного проектирования, начиная от точности формулировки инвестиционного замысла (идеи), в котором сконцентрированы и учтены интересы всех участников инвестиционной деятельности, и заканчивая разработкой согласованного комплекса действий по завершению проекта. Предложено создать единый реестр данных о стоимости и результатах реализации инвестиционных проектов с целью его использования при принятии решений о выделении средств федерального бюджета, планировании государственных капитальных вложений и согласовании проектной документации на новые объекты промышленного строительства, предлагаемые к финансированию.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционная политика, промышленное строительство, проект, эффективность

ECONOMIC SCIENCE

IMPROVING THE QUALITY OF INVESTMENT DESIGN IN INDUSTRIAL CONSTRUCTION

Izmet M. Meylanov

*Daghestan State Technical University, Derbent Branch,
35 Khandadasha Tagieva Str., Derbent 368600, Russia
e-mail:derbent_dstu@rambler.ru*

Abstract Objectives The development of a set of practical measures in order to improve the quality of investment design in industrial construction. **Methods** The basis of research comprises a project management methodology as well as methods for logical and statistical analysis of decision-making in investment activities. **Results** A mechanism of inclusion of industrial construction objects into the Federal targeted investment programme is revealed. The sequence of the state expert evaluation of investment projects is determined, which optimises the design solutions aimed at minimising their estimated cost if the investment is made with the involvement of the Federal budget. Qualitative and quantitative criteria are systematised for the integrated assessment of the effectiveness of investment fund usage sent to industrial construction objects. **Conclusion** The consistent implementation of the state investment policy is aimed at developing the scientific-technological and scientific-industrial potential of industrial construction by providing favourable conditions for effective innovation activity, selecting rational investment strategies and priority projects aimed at solving urgent problems of improving the competitiveness of construction. Successful implementation of the state investment policy in industrial construction largely depends on the effectiveness of investment design, starting from the accuracy of the formulation of the investment plan (idea), in which the interests of all participants in investment activities are concentrated and taken into account, and to the development of an agreed set of actions to complete the project. A unified register covering the data on the cost and results of investment projects is proposed to be created with the purpose of facilitating decision-making in the process of allocation of the Federal budget funds, planning of state capital investments and approval of project documentation for new industrial construction projects offered for financing.

Keywords: investment, investment policy, industrial construction, design, efficiency

Введение. Спад инвестиционной активности усилил тенденцию старения производственного потенциала страны. В ближайшие годы эта тенденция, скорее всего, распространится на все материальное производство, так как коэффициенты ввода основных фондов сближаются с коэффициентами их выбытия [1]. Выход из кризиса возможен только путем активизации инвестиционной деятельности по обновлению реального капитала в сфере промышленного строительства.

Практический опыт показывает, что при определенной структурной и терминологической разобщенности подходов к обоснованию целесообразности инвестиций, все они в определенной степени базируются на методике экономической оценки инвестиционных строительных проектов, принятой Международным центром промышленных исследований при ООН (ЮНИДО) [2]. Вместе с тем отсутствие комплексного подхода к решению имеющихся проблем в увязке с требованиями, предъявляемыми современным российским законодательством к проектируемым объектам промышленного строительства еще на прединвестиционной стадии, затрудняет практику выполнения этих обоснований, к тому же и принятие оптимальных решений по инвестиционным проектам во многом зависит от вида инвестиций, стоимости инвестиционного проекта, конкуренции на инвестиционном рынке; от ограниченности финансовых ресурсов, доступных для инвестирования; инвестиционного риска.

Причины, обуславливающие необходимость инвестирования в сферу промышленного строительства, могут быть различны, однако в целом их можно определить как: обновление

имеющейся материально-технической базы, наращивание объемов производственной деятельности, освоение новых видов производственной деятельности [3].

Степень ответственности за принятие инвестиционного проекта в рамках того или иного направления различна. Так, если речь идет о замещении имеющихся производственных мощностей, решение может быть принято достаточно легко, поскольку руководство предприятия ясно представляет себе, в каком объеме и с какими характеристиками необходимы новые основные средства. Проблема существенно осложняется, если речь идет об инвестициях, связанных с расширением основной деятельности, поскольку в этом случае необходимо учесть ряд факторов: возможность изменения положения предприятия на рынке, доступность дополнительных объемов материальных, трудовых и финансовых ресурсов, возможность освоения новых сегментов рынка и т.д.[4].

Постановка задачи. Очевидно, что важным является вопрос об объеме инвестируемых средств. Поэтому особое внимание необходимо обратить на качество инвестиционного проектирования, которое предшествует принятию решения о вложении средств в строящийся объект. Кроме того, во многих строительных организациях весьма популярна практика дифференциации права принятия решений инвестиционного характера, т.е. ограничивается максимальная величина инвестиций, в рамках которой руководитель может принимать самостоятельные решения [5]. Нередко решения должны приниматься в условиях, когда имеется ряд альтернативных или взаимно независимых инвестиционных проектов. В этом случае необходимо сделать выбор одного или нескольких проектов, основываясь на критериях оптимальности, поэтому объективно встает задача повышения качества инвестиционного проектирования в промышленном строительстве.

Методы исследования. При всех положительных внешних проявлениях в экономике в настоящее время накапливается внутренняя напряженность, связанная с качественными изменениями факторов роста [6]. Тревожным симптомом на этом фоне стало замедление динамики инвестирования (табл. 1.) [7].

Таблица 1. Динамика инвестиции в основной капитал организаций, осуществляющих деятельность в строительстве (в фактически действовавших ценах)

Table 1. Dynamics of investment in fixed assets of organizations that carry out activities in construction (in actual prices)

Годы	млрд. руб.	В % от общего объема инвестиций в основной капитал
2013	941,1	9,3
2014	949,2	9,1
2015	919,8	8,8
2016	852,2	7,8

При этом следует понимать, что инвестиции в промышленное строительство носят долгосрочный характер и ориентированы на отдаленный эффект.

По прогнозам экспертов Министерства экономического развития РФ, в 2017 году среднегодовой прирост инвестиций в 2017 - 2019 гг. составит 2,7%. Возрастет чувствительность инвестиционных проектов к рентабельности и срокам окупаемости проектов реального сектора экономики. Прогнозируется повышение спроса на рынке промышленного строительства и инжиниринга на ограниченное число малобюджетных объектов, предназначенных для длительного использования [7].

Необходимо отметить, что подавляющая часть инвестиционных ресурсов в последние годы формируется за счет частной собственности организаций (75,8% общего объема финансирования в 2016г.) (табл.2) [7].

Таблица 2. Объем работ, выполненных строительными организациями различных форм собственности (в фактически действовавших ценах; млрд. рублей)
Table 2. Scope of work performed by construction organizations of various forms of ownership (in actual prices, billion rubles)

	2012	2013	2014	2015	2016
Объем выполненных работ – всего	5714,1	6019,5	6125,2	6148,4	2620,2
в том числе организациями по формам собственности:					
государственная	179,6	176,9	150,3	159,0	145,3
муниципальная	21,5	22,8	17,4	17,2	16,5
частная	5057,8	5304,5	5500,4	5537,9	1987,2
смешанная российская	107,4	96,4	109,3	93,3	57,1
прочие	347,8	418,9	347,8	341,0	414,1

¹⁾ Без субъектов малого предпринимательства.

При этом главная проблема заключается в сохраняющейся крайне ограниченной возможности внутренних накоплений в стране и неспособности частных инвесторов в полной мере компенсировать нехватку капиталовложений для преодоления инвестиционного спада.

Как видно из таблицы 2, ситуацию на инвестиционном рынке усугубляют и резко сократившиеся объемы государственных инвестиций.

В соответствии с Федеральной адресной инвестиционной программой, утвержденной Минэкономразвития России на 2016г. (с уточнениями на 1 января 2017г.), выделены ассигнования в размере 549,2 млрд.руб., из них из федерального бюджета - 526,4 млрд.руб. на строительство 1522 объектов капитального строительства, на реализацию укрупненных инвестиционных проектов [8].

Из общего количества объектов по 438 объектам было намечено провести только проектные и изыскательские работы. Из 443 объектов, намеченных к вводу в 2016г., введено в эксплуатацию 196 объектов, из них 165 - на полную мощность, 31 объект - частично.

На 1 января 2017 г. на 362 объектах техническая готовность составляла от 51,0% до 99,9%.

В счет годового лимита в 2016г. профинансировано из федерального бюджета 415,3 млрд. руб. (78,9%), из них на объекты сельского хозяйства - 6,3 млрд.руб. (99,0%), транспорта и связи - 275,9 млрд.руб. (90,1%), здравоохранения и предоставления социальных услуг - 30,7 млрд.руб. (87,9%), государственного управления и обеспечения военной безопасности, социального страхования - 21,8 млрд.руб. (63,1%), образования - 18,6 млрд.руб. (61,9%), строительства - 2,9 млрд.руб. (44,5%). Из бюджетов субъектов Российской Федерации и прочих источников профинансировано 21,4 млрд.руб. На 1 января 2017г. полностью профинансировано 1072 объекта [8].

Как показало исследование, на неравномерность осуществления расходов федерального бюджета в рамках Федеральной адресной инвестиционной программы в течение 2016г. оказала влияние действующая практика включения в федеральный бюджет ассигнований на финансирование строительно-монтажных работ по объектам, не обеспеченным утвержденной в установленном порядке проектной документацией. Такая ситуация возможна, если завершение разработки проектной документации предусмотрено в том году, в котором осуществляется формирование Федеральной адресной инвестиционной программы, и при условии установления ограничения на право выполнения работ в отношении этих объектов и финансирование этих работ.

В этом случае выполнение работ по строительству, реконструкции, техническому перевооружению объектов капитального строительства и их финансирование осуществляются после представления главным распорядителем в Минэкономразвития России документов, подтверждающих наличие утвержденной в установленном порядке проектной документации, и внесения изменений в Федеральную адресную инвестиционную программу, отменяющих установленные ограничения [9].

Обсуждение результатов. В целях повышения эффективности государственных капитальных вложений и обеспечения их равномерности в течение года рекомендуем строго соблюдать установленный порядок формирования и реализации Федеральной адресной инвестиционной программы [9]:

1. Проверка достоверности сметной стоимости объектов проводится после принятия решения о необходимости их строительства, но до принятия решения о выделении конкретных объемов бюджетного финансирования.

В ходе государственной экспертизы проектной документации происходит проверка сметной стоимости объектов капитального строительства, строительство которых финансируется с привлечением средств федерального бюджета, с оценкой возможности оптимизации проектных решений без уменьшения конечных количественных показателей.

2. Создается банк данных (реестр) о стоимости и результатах реализованных инвестиционных проектов, используемый для подбора проектов-аналогов.

3. На основании заключений государственной экспертизы технические заказчики (застройщики или уполномоченные на это лица) и главные распорядители средств федерального бюджета принимают окончательное решение о целесообразности выделения средств на реализацию соответствующих проектов.

4. Объекты капитального строительства с финансированием в очередном году включаются в Федеральную адресную инвестиционную программу при утвержденной проектной документации и положительного экспертного заключения.

Соблюдение такого порядка позволит повысить уровень качества оценки эффективности предлагаемых к финансированию объектов промышленного строительства.

Приложениями к соглашению о предоставлении межбюджетных капитальных субсидий являются: паспорт инвестиционного проекта, титульные списки объектов капитального строительства, утвержденные государственным заказчиком субъекта РФ (муниципальным заказчиком) и согласованные с главным распорядителем средств федерального бюджета, а также график выполнения мероприятий по строительству объектов капитального строительства [10].

Однако изменения в составе инвесторов пока не способствуют этому процессу, поскольку инвестиционный климат в стране остается прежним. Доходность инвестиций низка, внутренний рынок неустойчив, риски высоки, кредиты дороги, чрезмерен налоговый пресс, высока склонность к сбережениям. Эти факторы не позволяют оптимистически оценивать возможности повышения инвестиционной активности и перспективы технического перевооружения производства без существенной корректировки инвестиционной политики государства в сфере промышленного строительства [11].

Стратегической задачей строительной отрасли является восстановление инвестиционного потенциала, повышение эффективности инвестиционной политики, масштабов инвестиционной деятельности на основе расширения критериев отбора и улучшения качественных параметров инвестиционных проектов, совершенствования отраслевой и территориальной структуры инвестиций, мобилизации внутренних источников и привлечения внешних инвестиций, использования прогрессивных форм организации инвестиционного проектирования [11-12].

Следует заметить, что возможности для привлечения капитала к реализации инвестиционных проектов в промышленном строительстве появились в связи с повышением роли и влияния региональных органов власти в вопросах управления региональной собственностью, крупнейшими предприятиями регионов, мобилизации в региональных бюджетах инвестиционных ресурсов, создании льготных условий налогообложения для инвесторов. Кардинальное повышение эффективности строительной отрасли может быть достигнуто только при комплексном

применении методов управления проектами и принципов инвестиционного проектирования, начиная с самых ранних стадий жизненного цикла проекта [12].

Основу концепции управления проектами составляет взгляд на проект как на управленческое изменение исходного состояния любой системы, связанное с затратами времени и средств. Управление проектами включает функции планирования, организации, мониторинга и контроля по всем аспектам проекта для достижения его внешних и внутренних целей [13-16]. Задачами управления проектами являются:

1. Разработка и обоснование концепции проекта;
2. Оценка эффективности проекта с учетом факторов риска и неопределенности;
3. Техничко-экономическое обоснование проекта;
4. Разработка сметы затрат и бюджета;
5. Системное планирование реализации проекта на всех стадиях жизненного цикла;
6. Оценка наиболее эффективных финансовых инструментов проекта;
7. Организация управления исполнителями проекта;
8. Организация управления качеством проекта;
9. Управление реализацией проекта;
10. Управление бизнес-процессами проекта;
11. Управление изменениями.

Концепция управления проектами является основополагающим документом системы управления проектом, обосновывающим инвестиционный замысел, необходимость инвестирования, определяющим основные параметры и стратегию реализации, объем автоматизации и планирование работ, используемые информационные технологии и т.д. Немаловажным этапом управления проектом является разработка комплекса технической документации проекта, включающего технико-экономическое обоснование (бизнес-план, чертежи, пояснительные записки) проекта, что в действительности и отражает процесс инвестиционного проектирования.

До окончательного утверждения проект и его сметная документация на строительство объектов подлежат комплексной государственной экспертизе. Цель и задачи экспертизы - обеспечить высокий технико-экономический уровень строительства объектов при обоснованных затратах материально-технических, трудовых и финансовых ресурсов. Для проведения экспертизы техническая документация предоставляется техническим заказчиком или застройщиком (либо уполномоченным лицом) в государственный экспертный орган. В ходе экспертизы в зависимости от специфики, условий и видов строительства уточняется предметная область проверки.

В ходе экспертизы проверяется соответствие принятых решений обоснованию инвестиций, заданию на проектирование, техническим условиям и стандартам при согласовании места размещения объекта; хозяйственная необходимость и экономическая целесообразность намеченного строительства с точки зрения социальной потребности в данном объекте; правильность выбора площадки строительства; обеспечение безопасности строительства, соблюдение норм и правил пожарной безопасности, соблюдение требований охраны труда и санитарные требования; устойчивость объекта строительства в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени; достоверность определения стоимости строительства; производится оценка экономической эффективности инвестиций.

Следует учесть, что одним из направлений проверки является оценка расчетов, указанных в смете проекта, для установления их соответствия сметным нормативам, физическим объемам работ, конструктивным, организационным и технологическим решениям, предусмотренным проектной документацией [16].

В то же время принятие решений об инвестировании должно происходить не только на основании оценки стоимости, а также с учетом положительного заключения публичного технологического и ценового аудита [17].

Учитывая изложенное, наряду с поэтапным повышением качества работы по оценке эффективности инвестиционных проектов в профильных федеральных органах исполнительной власти и внедрением процедур публичного технологического и ценового аудита крупных инве-

стиционных проектов с государственным участием представляется целесообразным проводить оценку возможности оптимизации проектных решений без уменьшения конечных количественных показателей.

Раздел, содержащий результаты такой оценки, должен являться обязательным в рамках заключения о достоверности определения сметной стоимости объектов промышленного строительства, финансируемых за счет средств федерального бюджета. Окончательное решение о выборе оптимального варианта реализации проекта с учетом рекомендаций, изложенных в заключении экспертизы, должен принимать государственный заказчик [18].

По результатам государственной экспертизы выдается заключение, содержащее: краткую характеристику исходных данных, условий строительства и основных проектных решений; технико-экономические показатели строительства; замечания и предложения по принятым проектным решениям; изменения и дополнения, внесенные в проект в ходе экспертизы; общие выводы о целесообразности инвестиций в проект; общие выводы об экологической безопасности, эксплуатационной надежности и социальной значимости объекта строительства; рекомендации об утверждении или отклонении проекта. Положительное заключение выдается в четырех экземплярах, отрицательное - в одном экземпляре.

Такой порядок государственной экспертизы проектной документации позволяет проводить на данном этапе оптимизацию проектных решений и, как следствие, повышения их экономической эффективности. Принятие решений инвестиционного характера, как и любой другой вид управленческой деятельности, основывается на использовании различных формализованных и неформализованных методов, с помощью которых расчет экономической эффективности инвестиций может служить основой для принятия решений в области инвестиционной политики. Интегральная оценка эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения, проводится на основе качественных и количественных критериев [19].

В качестве критерия эффективности выбирается отношение сметной стоимости инвестиционного проекта к значениям количественных показателей результатов инвестиционного проекта путем сравнения стоимости инвестиционного проекта с соответствующей сметной нормой, определяющей потребность в финансовых ресурсах, необходимых для создания единицы мощности строительной продукции, как укрупненного норматива цены строительства, включенной в установленном порядке в федеральный реестр сметных нормативов, а в случае ее отсутствия – путем сравнения с аналогичными проектами.

Вывод. Важной особенностью методов инвестиционного проектирования и методологии управления проектами является их целевая направленность на получение конечного результата с учетом возможных рисков в условиях жестких ограничений по срокам реализации и бюджету инвестиционного проекта.

Несогласованность действующих порядков оценки стоимости и эффективности инвестиционных проектов существенно усложняет процесс формирования и реализации Федеральной адресной инвестиционной программы, что негативным образом влияет на исполнение федерального бюджета в части расходов инвестиционного характера.

Изложенные предложения направлены на минимизацию количества изменений, вносимых в Федеральную адресную инвестиционную программу в течение текущего финансового года, повышение финансовой дисциплины в сфере государственных капитальных вложений, обеспечение равномерности расходов инвестиционного характера, сокращение объемов неиспользованных остатков межбюджетных субсидий и повышение эффективности государственных капитальных вложений за счет их более обоснованной оценки.

Систематизированы качественные и количественные критерии интегральной оценки эффективности использования инвестиционных средств, направляемых в объекты промышленного строительства.

Предложено создать единый реестр данных о стоимости и результатах реализации инвестиционных проектов с целью его использования при принятии решений о выделении средств федерального бюджета, планировании государственных капитальных вложений и согласовании

проектной документации на новые объекты промышленного строительства, предлагаемые к финансированию.

Библиографический список:

1. Бюллетень «Инвестиционная деятельность в России: условия, факторы, тенденции». Федеральная служба государственной статистики, 2016г. [Электронный ресурс] http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_112/Main.htm.
2. Сорокина М. Ю., Крыжановский О. А. Отечественные и зарубежные методики оценки эффективности инвестиций: сравнительный анализ // Молодой ученый. — 2014. — №4. — С. 610-613
3. Мейланов И.М., Эсетова А.М. Развитие форм государственной поддержки проектов промышленного строительства Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 42 , №3, 2016 – С. 223-233 DOI: <http://dx.doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-220-230>
4. Катасонов В.Ю. Инвестиционный потенциал экономики: механизмы формирования и использования. - М.: «Анкил», 2005. - 328 с.
5. Джалилова С.Ф. Государственно-частное партнерство как эффективная форма управления инвестиционными проектами в строительстве. Региональные проблемы преобразования экономики.– 2013. – Т.35 - №1- С 170-175.
6. Федотовский А.Ю. Разработка метода оценки экономической эффективности инновационного проектного управления в строительной отрасли// Проблемы современной экономики. – 2009. –№ 1. - С. 5.
7. Статистический сборник «Россия в цифрах-2017», Росстат, 2017.
8. Состояние и перспективы строительной отрасли РФ в 2016 – 2017 гг. [Электронный ресурс] <http://www.indexbox.ru/news/sostojanie-i-perspektivy-stroitelnoj-otrasli-rf/9>.
9. Об утверждении Правил формирования и реализации федеральной адресной инвестиционной программы (с изменениями и дополнениями). Постановление Правительства РФ от 13 сентября 2010 г. N 716
10. Правила осуществления капитальных вложений в объекты государственной собственности Российской Федерации за счет средств федерального бюджета. Постановление Правительства РФ от 09.01.2014, № 13.
11. Шабалин А.Н. Инвестиционное проектирование. - М.: МФПА, 2004. – 139 с.
12. Dahlgren E., Leung T. An optimal multiple stopping approach to infrastructure investment decisions. Journal of Economic Dynamics and Control. 2015; 53:251–267
13. Taylor J., Levitt R., Innovation Alignment and Project Network Dynamics: An Integrative Model for Change, Project Management Journal, 38, 3, 22-35, 2007.
14. C. William Ibbs, Young-Hoon Kwak. The benefits of Project Management: financial and organizational rewards to corporations. - Project Management Institute Education Foundation, 1997.
15. Linton J., Vonortas N. From Research Project to Research Portfolio: Meeting Scale and Complexity. Foresight-Russia, 2015, vol. 9, no 2, pp. 38–43. DOI: 10.17323/1995- 459x.2015.2.38.43
16. Положение о проведении проверки достоверности определения сметной стоимости объектов капитального строительства, строительство которых финансируется с привлечением средств федерального бюджета, утвержденным постановлением Правительства РФ от 18.05.2009 N 427
17. О проведении публичного технологического и ценового аудита крупных инвестиционных проектов с государственным участием. Постановление Правительства РФ от 30.04.2013, N 382. <http://gge.ru/wp-content/uploads/2016/04/g>
18. Приказом Минстроя России от 9 декабря 2015 г. № 887/пр «Об утверждении требований к составу, содержанию и порядку оформления заключения государственной экспертизы проектной документации и (или) результатов инженерных изысканий».
19. Интегральная оценка эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения. Методика, утвержденная приказом Минэкономразвития России от 24.02.2009 N 58.

References:

1. Byulleten «Investitsionnaya deyatelnost' v Rossii: usloviya, faktory, tendentsii. [Elektronnyy resurs]: http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_112/Main.htm [Bulletin “Investment activity in Russia: condi-

- tions, factors, trends - 2016 ”. Federal service of state statistics. 2016. [Electronic resource]: http://www.gks.ru/bgd/regl/b16_112/Main.htm. (in Russ.)]
2. Sorokina M. Yu., Kryzhanovskiy O. A. Otechestvennye i zarubezhnye metodiki otsenki effektivnosti investitsiy: sravnitel'nyy analiz. *Molodoy uchenyy*. 2014;4:610-613. [Sorokina M. Yu., Kryzhanovskiy O. A. National and foreign methods of evaluation of investment efficiency: comparative analysis. *Molodoy uchenyy*. 2014;4:610-613. (in Russ.)]
 3. Meylanov I.M., Esetova A.M. Razvitie form gosudarstvennoy podderzhki proektov promyshlennogo stroitel'stva *Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016;42(3):223-233 DOI: <http://dx.doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-220-230>. [Meylanov I.M., Esetova A.M. Form development of state support for industrial building projects. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016;42(3):223-233 DOI: <http://dx.doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-220-230>. (in Russ.)]
 4. Katasonov V.Yu. Investitsionnyy potentsial ekonomiki: mekhanizmy formirovaniya i ispol'zovaniya. M.: «Ankil»; 2005. 328 s. [Katasonov V.Yu. Investment potential of economics: formation and using mechanisms. Moscow: «Ankil»; 2005. 328 p. (in Russ.)]
 5. Dzhililova S.F Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo kak effektivnaya forma upravleniya investitsionnymi proektami v stroitel'stve. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2013;35(1):170-175. [Dzhililova S.F State-private partnership as an effective form of management of investment projects in building. *Regional problems of transforming the economy*. 2013;35(1):170-175. (in Russ.)]
 6. Fedotovskiy A.Yu. Razrabotka metoda otsenki ekonomicheskoy effektivnosti innovatsionnogo proektnogo upravleniya v stroitel'noy otrasli. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2009;1:5. [Fedotovskiy A.Yu. Development of evaluation method for economic efficiency of innovative project management in the building industry. *Problems of Modern Economics*. 2009;1:5. (in Russ.)]
 7. Rossiya v tsifrakh - 2017. Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. Ofitsial'noe izdanie [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: www.infostat.ru. [Russia in numbers - 2017. Statistical yearbook of Russia. Official publication [Electronic resource]. Free access: www.infostat.ru. (in Russ.)]
 8. Sostoyanie i perspektivy stroitel'noy otrasli RF v 2016 – 2017 gg. [Elektronnyy resurs] <http://www.indexbox.ru/news/sostojanie-i-Perspektivy-stroitelnoj-otrasli-rf/9>. [State and perspectives of RF building industry in 2016 – 2017 years. [Electronic resource] <http://www.indexbox.ru/news/sostojanie-i-Perspektivy-stroitelnoj-otrasli-rf/9>. (in Russ.)]
 9. Ob utverzhenii Pravil formirovaniya i realizatsii federal'noy adresnoy investitsionnoy programmy (s izmeneniyami i dopolneniyami). Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13 sentyabrya 2010 g. N 716. [On the approval of formation and realisation rules of the federal address investment programme (with changes and additions). RF Government directive from 13.09. 2010. N 716. (in Russ.)]
 10. Pravila osushchestvleniya kapital'nykh vlozheniy v ob"ekty gosudarstvennoy sobstvennosti Rossiyskoy Federatsii za schet sredstv federal'nogo byudzheta. Postanovlenie Pravitel'stva RF № 13 ot 09.01.2014. [Rules of realisation of capital investments in the objects of Russian Federation state property at the expenses of Federal budget. RF Government directive № 13 from 09.01.2014. (in Russ.)]
 11. Shabalin A.N. Investitsionnoe proektirovanie. M.: MFPA; 2004. 139 s. [Shabalin A.N. Investment projection. Moscow: MFPA; 2004. 139 p. (in Russ.)]
 12. Dahlgren E., Leung T. An optimal multiple stopping approach to infrastructure investment decisions. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2015; 53:251–267.
 13. Taylor J., Levitt R., Innovation Alignment and Project Network Dynamics: An Integrative Model for Change, *Project Management Journal*. 2007;38(3):22-35.
 14. Ibbs C. W., Kwak Y.-H. The benefits of Project Management: financial and organizational rewards to corporations. Project Management Institute Education Foundation. 1997.
 15. Linton J., Vonortas N. From Research Project to Research Portfolio: Meeting Scale and Complexity. *Foresight-Russia* 2015;9(2):38–43. DOI: 10.17323/1995- 459x.2015.2.38.43
 16. Polozhenie o provedenii proverki dostovernosti opredeleniya smetnoy stoimosti ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva, stroitel'stvo kotorykh finansiruetsya s privlecheniem sredstv federal'nogo byudzheta, utverzhdennym postanovleniem Pravitel'stva RF № 427 ot 18.05.2009. [Regulations on the examination of authenticity of estimated expenses determination of the capital building objects funded by Federal budget, as authorised by RF Government directive № 427 form 18.05.2009. (in Russ.)]

17. Provedenii publichnogo tekhnologicheskogo i tsenovogo audita krupnykh investitsionnykh proektov s gosudarstvennym uchastiem. Postanovlenie Pravitel'stva RF № 382 ot 30.04.2013. <http://gge.ru/wp-content/uploads/2016/04/g>. [About public technological and price audit of large investment projects with state participation. RF Government directive № 382 from 30.04.2013. <http://gge.ru/wp-content/uploads/2016/04/g>. (in Russ.)]
18. Prikaz Minstroya Rossii ot 9 dekabrya 2015 g. № 887/pr “Ob utverzhdenii trebovaniy k sostavu, sodержaniyu i poryadku oformleniya zaklyucheniya gosudarstvennoy ekspertizy proektnoy dokumentatsii i (ili) rezul'tatov inzhenernykh izyskaniy”. [Directive of RF Ministry of Building from 9.12.2015 № 887/pr “About requirements for state expert evaluation composition, content and order of formalisation of project documentation opinion and (or) engineering investigation results. (in Russ.)]
19. Metodika otsenki effektivnosti ispol'zovaniya sredstv federal'nogo byudzheta, napravlyaemykh na kapital'nye vlozheniya. Prikaz Minekonomrazvitiya Rossii № 58 ot 24.02.2009. [Method of efficiency evaluation of Federal budget expenses, allocated for the capital investments. Order of Minekonomrazvitiya Rossii № 58 from 24.02.2009. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Мейланов Измет Максимович – директор филиала Дагестанского государственного технического университета в г. Дербенте

Information about the authors:

Izmet M. Meylanov—Director of Derbent Branch, Dagestan State Technical University

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию 14.05.2017.

Received 14.05.2017.

Принята в печать 16.06.2017.

Accepted for publication 16.06.2017.

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.);
- справку об авторах и ее электронную копию (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (отдела) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- две рецензии от докторов наук; подписи рецензентов должны быть заверены по месту их работы;
- сопроводительное письмо (1 экз.) для сторонних авторов.

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод» или «Заключение». Объем статьи не должен превышать 9 -10 страниц машинописного текста, 5 рисунков или фотографий.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание 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 от 15 до 30 наименований источников литературы, среди которых от 40 -70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок.

Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «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), год рождения, ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер закрывается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи. Рукописи аспирантов публикуются бесплатно.

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 the author including electronic copy (1 copy.);
- departmental recommendation for publication on official letterhead (1 copy);
- two reviews by doctors of science; the signature must be certified by the reviewers according to their official academic position;
- cover letter (1 copy for third-party authors).

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The paper should not exceed 9-10 pages of typescript and 5 images or photos.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text

Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

Line with text "**Bibliography**": References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 - 2008.

References should consist of between 15 and 30 items of source literature, including 40–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: last name, first name and patronymic (in full), year of birth, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. The manuscripts of graduate students are published free of charge.

Address of the editorial board: 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– №2 – 2017.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 44, No.2, 2017.

Верстка: Рамазанова Ф.М.

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: Fatima M.Ramazanova

Editorial address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964

«**БЕСПЛАТНО**»

Подписано в печать 29.06.2017 г. Сдано в печать 30.06.2017 г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 26,12. Уч. изд.л. 26,0.
Заказ № _____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.