

ISSN(Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»



Том 47, № 4, 2020.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 47, No.4, 2020.

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; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); ROAD, Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Соционет, КиберЛенинка, Microsoft Academic

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2020.

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

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

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2020.

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

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 47, № 4, 2020

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

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, проректор, зам. директора Института функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, РФ.

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

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

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

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

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

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

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

Маркосян М.В., д.т.н., профессор, директор ЗАО «Ереванский НИИ средств связи», г. Ереван, Республика Армения.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный совет: Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели:

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

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

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

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

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

Тимошин С.И., д.ф.-м.н., академик Белорусской инженерной академии, профессор, ректор Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь.

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

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

Группы научных специальностей

05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения,

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ

05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.17 – Строительная механика

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Вестник Дагестанского государственного технического университета.
Технические науки.
Том 47, № 4
Махачкала, 2020 – 176с.
Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя:

367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».
Тел./факс 8722)623715; (8722)623964

e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ 8

С.А. Братчиков, Е.А. Абрамова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ НА ПРИМЕРЕ ДВУХМАССОВОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ 8

Х.М. Гаджиев, Ш.Т. Исмаилова, П.А. Курбанова

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧНЫХ СВЕТОТРАНЗИСТОРОВ 20

О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ЕЕ ВВЕДЕНИИ В ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА 27

А. Ю. Ефимов, М.Н. Сарайкин, В.А. Ефимов, Е.В. Трошкин

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА С ИМПУЛЬСНЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ 37

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, Ш.А. Юсуфов, Э. Казалиева

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СЛОЯ ТИТАН-ГЕРМАНИЙ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ 49

М.А. Кальмова

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА ДЛЯ ДЛИННОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ТЕРМОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА 57

А.В. Месропян, Р.Р. Рахматуллин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КОРПУСА НА БУКСИРОВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ САМОХОДНЫХ ПАРОВОМОВ ПРИ ПРЕОДОЛЕНИИ ВОДНЫХ ПРЕГРАД 69

А.Б. Сулин, Д.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, А.И. Семиляк

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАТАРЕЙ И ТЕПЛООВОГО ТЕРМОСИФОНА 81

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 92

И.В. Куликова

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРА ВАРИАЦИИ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ 92

Б.И. Шахтарин, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов, Х.Ю. Тагиров ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ ПРОИЗОШЕДШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	101
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	112
К.Р. Айдемиров, В.П. Агапов, Г.М. Муртазалиев ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ «ПРИНС»	112
Т.Г. Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов, М.Н. Нажмудинова ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН И СПОСОБА ШАРНИРНОЙ НАВЕСКИ РАБОЧЕГО ОРГАНА БЕСТРАНШЕЙНОГО ДРЕНУОКЛАДЧИКА	122
Т.В. Золина, С.П. Стрелков, Н.В. Купчикова, Р.И. Шаяхмедов, Г.К. Кондрашин МОНИТОРИНГ РАЗРУШЕНИЯ И ОБМЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ, БЕРЕГООКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ВОЛГИ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ «ЭКОЛОГИЯ БЕЗОПАСНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА»	132
А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра, С.А. Кузнецов АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ И ЛИНЕЙНОЙ УПРУГИХ СИСТЕМ	141
А.Ф. Рожков, А.А. Лавров, И.В. Пикулева, Д.А. Поливанов ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ	151
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ БАЛКИ	162
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	172

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»

HERALD OF DAGESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. Volume 47, No. 4, 2020.

<p>Editor-in-Chief: Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Editorial Board: Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Rasul M. Aliev, Doctor of Technical Science Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Ganapi J. Akhmedov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Mahir M. Bashirov, Doctor of Technical Science, Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;</p> <p>Alexey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;</p> <p>Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;</p> <p>Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus;</p> <p>Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;</p> <p>Dmitry N. Kobzareno, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland;</p> <p>Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Arkady N. Laronov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia;</p> <p>Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;</p> <p>Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;</p> <p>Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;</p> <p>Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;</p> <p>Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;</p> <p>Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Gadzhimurad N. Khadzhisalapov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.</p> <p>Editorial council</p> <p>Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p>The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, President, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;</p> <p>Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan;</p> <p>Sergey I. Timoshin, Doctor of Physics and Mathematics, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;</p> <p>Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia;</p> <p>Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p>	<p>Research areas</p> <p>05.04.03 -Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning systems and life support (Technical Sciences),</p> <p>05.04.13 - Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences),</p> <p>05.13.01-System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.06 - Automation and management of technological processes and production (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.10 - Management in social and economic systems (Technical Sciences),</p> <p>05.13.12 - Design automation systems (By Branches) (Technical Sciences),</p> <p>05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p> <p>05.13.19 - Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p> <p>05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p> <p>05.23.05 Building materials and products (Technical Sciences),</p> <p>05.23.17 Construction mechanics (Technical Sciences),</p> <p>05.23.19 - Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences)</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 47, No.4 Makhachkala, 2020–176p.</p> <p>Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>
--	--

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING8

S.A. Bratchikov, E. A. Abramova

INVESTIGATION OF ERRORS IN THE REPRESENTATION OF 3D MODELS IN DETERMINING THE PARAMETERS OF PARTS OF DEVICES BY THE EXAMPLE OF A TWO-MASS ROTATING SYSTEM WITH ELASTIC COUPLING8

H. M. Gadgiev, SH. T. Ismailova, P. A. Kurbanova

DESIGN OF ENERGY-EFFICIENT HIGH-SPEED COMPUTER EQUIPMENT BASED ON COST-EFFECTIVE LIGHT TRANSISTORS20

O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev

TEMPERATURE FIELD OF A THERMOELECTRIC SYSTEM FOR EXTRACTING FOREIGN OBJECTS WHEN INTRODUCING INTO THE HUMAN BODY27

A. Yu. Efimov, M. N. Saraikin, V. A. Efimov, E. V. Troshkin

PISTON COMPRESSOR COOLING SYSTEM WITH A PULSED FLOW OF COOLANT WITH SUBSEQUENT USE OF HEAT IN THE HOT WATER SUPPLY SYSTEM37

T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, Sh. A. Yusufov, E. Kazalieva

METHOD FOR FORMING A TITANIUM-GERMANIUM CONTACT LAYER FOR THERMOSTABILIZATION OF TRANSISTORS49

M. A. Kalmova

DYNAMIC INVERSE PIEZO-EFFECT PROBLEM FOR A LONG PIEZOCERAMIC THERMOELASTIC CYLINDER57

A.V. Mesropyan, R.R. Rakhmatullin

STUDY OF THE EFFECT OF HULL GEOMETRY ON THE TOWING RESISTANCE OF MOTOR FERRIES WHEN OVERCOMING WATER OBSTACLES69

A. B. Sulin, D. V. Evdulov, A. M. Ibragimova, A. I. Semilyak

MODEL OF AN ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING SYSTEM BASED ON THE JOINT USE OF HIGH-CURRENT THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR BATTERIES AND A THERMAL THERMO-SIPHON.....81

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT92

I. V. Kulikova

APPLICATION OF THE VARIATION OPERATOR IN A GENETIC ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF FUZZY CONTROLLERS92

<i>B. I. Shakhtarin, T. G. Aslanov, H. D. Magomedov, H. Yu. Tagirov</i> DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST BY CHANGING THE VELOCITY OF SEISMIC WAVES FROM THE EARTHQUAKE DATA	101
BUILDING AND ARCHITECTURE	112
<i>K. R. Aidemirov, V.P. Agapov, G.M. Murtazaliev</i> APPLICATION OF MULTILAYER FINITE ELEMENTS OF VARIABLE THICKNESS IN THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE SLABS IN THE "PRINCE" COMPUTER COMPLEX	112
<i>T.G. Gasanov, E. Z. Batmanov, M. R. Guseynov, M.N. Nazhmudinova</i> DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE CATERPILLAR DRIVE OF HYDRAULIC RECLAMATION MACHINES AND THE METHOD OF ARTICULATED ATTACHMENT OF THE WORKING BODY OF THE TRENCHLESS PIPELAYER	122
<i>T. V. Zolina, S. P. Strelkov, N. V. Kupchikova, R. I. Shayakhmedov, G. K. Kondrashin</i> MONITORING OF DESTRUCTION AND SHALLOWING OF WATER BODIES AND BANK PROTECTION STRUCTURES IN THE VOLGA RIVER DELTA WITHIN THE FRAMEWORK OF THE "ECOLOGY OF SAFE CONSTRUCTION" PROGRAM	132
<i>A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov</i> VIBRATION ANALYSIS OF NONLINEAR AND LINEAR ELASTIC SYSTEMS	141
<i>A. F. Rozhkov, A. A. Lavrov, I. V. Pikuleva, D. A. Polivanov</i> PROVIDING THE SPATIAL RIGIDITY OF A MULTI-STORY WOOD-BASED FRAME BUILDING ...	151
<i>A. K. Yusupov, H. M. Muselemov, T.O. Ustarhanov</i> OPTIMIZATION OF STRUTTED BEAM PARAMETERS	162
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	172

Для цитирования: С.А. Братчиков, Е.А. Абрамова. Исследование погрешностей представления трехмерных моделей при определении параметров деталей приборов на примере двухмассовой вращающейся системы с упругой связью. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4): 8-19. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-8-19

For citation: S.A. Bratchikov, E.A. Abramova. Investigation of errors in the representation of 3D models in determining the parameters of parts of devices BY the example of a two-mass rotating system with elastic coupling. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 8-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-8-19

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-8-19

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ НА ПРИМЕРЕ ДВУХМАССОВОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ

С.А. Братчиков, Е.А. Абрамова

Университет ИТМО,

197101, Санкт-Петербург, Kronverkskiy pr., д. 49, литер А, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является рассмотрение области применения современных методов разработки и конструирования приборов с использованием средств трехмерного моделирования и симулирования физических процессов. Исследуется оправданность применения и критерии достоверности получаемых результатов при последовательном проектировании механической части электропривода и системы управления. **Метод.** Рассматриваются способы модельного представления трехмерных объектов в системах автоматизированного проектирования, а также методы, применимые для решения задач определения деформаций под приложенной нагрузкой. На примере элементарного соединения проведено сравнение получаемых результатов динамической характеристики упругого вала в системе автоматизированного проектирования с рассчитанным аналитически. **Результат.** Определены основные принципы и соотношения, применимые для описания формы трехмерных моделей. Показаны методы, посредством которых возможно получение информации о массово-центровочных характеристиках моделей. Приведены соотношения, которые положены в основу численных методов решения задач об определении упругих деформаций тел. Показана погрешность, которая может проявляться при использовании недостаточно малых элементарных объемов при решении задачи определения упругой деформации. **Вывод.** Использование трехмерного моделирования при проектировании сложных технических систем оправдано и ускоряет производственные процессы. Однако не всегда численные методы могут дать точный результат, что ведет к необходимости либо увеличивать сложность расчетов, либо к дополнительной подстройке некоторых параметров проектируемых приборов.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, метод конечных элементов, система автоматизированного проектирования, математическая модель, погрешность численного метода

INVESTIGATION OF ERRORS IN THE REPRESENTATION OF 3D MODELS IN DETERMINING THE PARAMETERS OF PARTS OF DEVICES BY THE EXAMPLE OF A TWO-MASS ROTATING SYSTEM WITH ELASTIC COUPLING

S. A. Bratchikov, E.A. Abramova

ITMO University,

49 Kronverksky Ave., bldg. A, Saint Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. *The objective of the study is to consider the application field of modern device development and design methods using the means of 3D modeling and simulation of physical processes. The validity of the application and criteria for the reliability of the results obtained in the sequential design of the mechanical part of the electric drive and the control system are investigated.* **Methods.** *Methods of model representation of 3D objects in computer-aided design systems are considered, as well as methods for solving problems of determining strain under the applied load. Using the example of an elementary joint, the obtained results of the dynamic characteristic of an elastic shaft in a computer-aided design system are compared with those calculated analytically.* **Results.** *The article defines the basic principles and relations applicable to describing the shape of 3D models. Methods are shown by which it is possible to obtain information about the mass-centering model characteristics. The relations that form the basis of numerical methods for solving problems of determining elastic deformations of bodies are also given. The error that can occur when using insufficiently small elementary volumes in solving the problem of determining elastic deformation is shown.* **Conclusion.** *The use of 3D modeling in the design of complex technical systems is justified and speeds up production processes. However, numerical methods cannot always give an accurate result leading to the need to either increase the complexity of calculations or additionally adjust some designed device parameters.*

Keywords: *3D modeling, finite element method, computer-aided design system, mathematical model, numerical method error*

Введение. Современный этап развития производственных процессов ознаменован повсеместным внедрением киберфизических технологий [1,2], основным столпом которого является компьютерное и имитационное моделирование [3]. Иными словами, основной вектор развития в прикладном проектировании - это отказ от трудоемкого процесса создания макетов и прототипов и их последующего исследования на предмет соответствия предъявляемым характеристикам в пользу разработки «цифровых двойников» разрабатываемых изделий.

Под «цифровым двойником» следует понимать виртуальную сущность, способную полностью повторять поведение реального объекта в реальном мире под воздействием моделируемых внешних возмущающих воздействий и предоставляющую наблюдателю достоверную информацию обо всех физических параметрах объекта [4]. Подобный подход с 90-х годов прошлого века показывает [5] свою эффективность за счет сокращения времени на разработку моделей, сокращения издержек на создание макетов, включения большего количества квалифицированных специалистов в проектную группу за счет исключения необходимости прямого доступа к макетам, а также возможности безбоязненно моделировать любые внешние воздействия, не переживая за сохранность макетов, их износ и безопасность персонала.

Кроме того, использование «цифровых двойников» позволяет оперативно вносить изменения в конструкции проектируемых изделий и тем самым производить больше итераций нагрузочных испытаний с различными конфигурациями в единицу времени [6].

Однако не всегда возможно оперировать лишь результатами, полученными с моделей. В ряде случаев, в особенности в сложных технических системах, включающих в себя не только механическую часть в виде какого-либо рода конструкций (корпусов, каркасов, опор, стоек), но и, например, электропривод с системой управления им, использования одних лишь математических моделей может оказаться недостаточно, поскольку они незначительно, но могут отличаться от реальных объектов [7]. Это связано как с неидеальностью оборудования, на котором изготавливаются детали приборов [8, 9], так и с применением численных методов вычислений [10] в «цифровых двойниках», которые, всё же, имеют конечную погрешность. И хотя современный этап развития вычислительной техники позволяет в разумные сроки получать результаты расчетов с разумной точностью, её может оказаться недостаточно в прецизионной технике. Как следствие, приходится применять методики идентификации [11,12] объектов и дорабатывать конкретные образцы технических систем. В связи с изложенным выше, появляется ин-

интерес в определении принципов и способов расчета физических параметров объектов технических систем и выявлении точности их расчетов, которые могут быть достигнуты при применении на этапе проектирования «цифровых двойников», и перспектив уменьшения погрешностей, которые могут появляться при проектировании.

Постановка задачи. Для определения того, как точно могут быть рассчитаны физические параметры объектов, а также какое влияние погрешность расчета может оказывать на динамические параметры системы необходимо, во-первых, исследовать, каким образом могут рассчитываться характеристики тел в системах автоматизированного проектирования. Затем необходимо задаться моделью, на примере которой возможно проверить, как погрешности вычисления физических параметров оказывают влияние на динамические характеристики объекта.

Предполагается, что в данном исследовании оптимально использовать модель двухмассового электропривода, соединенного через упругий вал. Подобный механизм довольно распространен в практическом использовании, и исследованию методов его управления посвящено немало работ. Затем производится вычисление параметров модели с использованием системы автоматизированного проектирования. Следующим шагом будет аналитическое вычисление этих же параметров элементарной модели. Наконец производится сравнение аналитически вычисленных значений со значениями, которые были посчитаны с использованием систем моделирования. На основании сравнения делается вывод о том, какие погрешности могут получиться при различных параметрах моделирования, и как сильно эти погрешности влияют на достоверность описания физических процессов, которые будут происходить в системе.

Методы исследования. Основополагающие физические параметры любого объекта, которые необходимо явно определять для принятия решений по проектированию – масса, объем, центр масс, тензор инерции [13, 14]. Эти величины во многом определяют поведение проектируемого объекта, его динамику. При создании трёхмерных моделей в системах автоматизированного проектирования пользователь сам задаёт формы, опорные точки, физические свойства и другие естественные параметры объекта. Под естественными параметрами понимаются те, которые могут быть описаны качественно и количественно без использования уравнений. К ним можно отнести габаритные размеры, плотность материала, положение опорных точек.

Например, цилиндр естественным образом может быть задан при помощи указания точки центра окружности основания, его радиуса, высоты и плотности материала. Однако над видом уравнения, описывающего окружность основания, площади поверхностей, объем тела пользователю задумываться не приходится.

Алгоритм их вычисления заложен разработчиками в систему автоматизированного проектирования, а входными данными являются как раз введенные пользователем значения. Затем представляя спроектированную трёхмерную модель как совокупность простейших фигур (C-Rep метод), поверхностей (B-Rep метод), кривых (метод NURBS-поверхностей), [15] используя булевы операции, применяя методы численного интегрирования к поверхностям и кривым, описываемым заранее известными уравнениями, система автоматизированного проектирования вычисляет массово-центровочные характеристики сложных объектов [16].

Рассмотрим пример вычисления массово центровочных характеристик цилиндра, представленного на рис. 1.

Предполагается, что основные операции, которые пользователь производит в системе автоматизированного проектирования для создания подобного объекта:

- 1) Выбор и задание точки центра окружности a с координатами (x_1, y_1, z_1)
- 2) Выбор и задание радиуса окружности основания r ;
- 3) «Выдавливание» цилиндра посредством задания его высоты h .

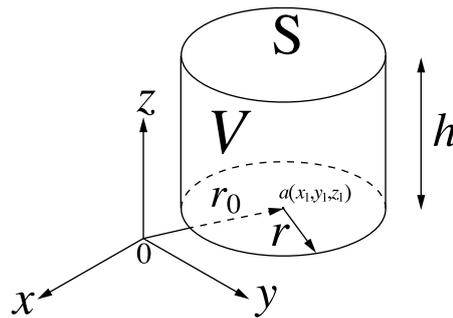


Рис.1. Цилиндр в декартовых координатах
Fig.1. Cylinder in Cartesian coordinates

Используя общеизвестные геометрические формулы, вычисляются другие параметры объекта. Площадь основания равна $S = \pi r^2$. Дополнив модель информацией о расстоянии выдавливания h , объем получившегося тела равен $V = Sh$

Центр масс в таком случае находится в точке:

$$x_c = x_1; y_c = y_1; z_c = z_1 + \frac{h}{2} \quad (1)$$

Моменты инерции относительно осей, проходящих через центр масс цилиндра и параллельных базовым осям:

$$J_{cx} = J_{cy} = \frac{1}{12} rV(3r^2 + h^2); \quad 2J_{cz} = \frac{1}{2} rVr^2 \quad (2)$$

Аналогичным образом могут быть заданы основные соотношения для моментов инерции элементарных тел относительно других базовых осей, проходящих через их центр масс. Затем по теореме Гюйгенса (3) используя момент инерции тела относительно центра масс J_0 , расстояние r_i между осью, относительно которой посчитан момент инерции и параллельной ей осью, нетрудно определить моменты инерции тела относительно произвольных осей.

$$J_i = J_0 + rVr_i^2 \quad (3)$$

В случае более сложных поверхностей, описывающих основания, могут быть применены методы численного интегрирования для нахождения объемов и площадей интересующих объектов. Входную информацию о форме граней и поверхностей, ограничивающих тело, система получает от пользователя (опорные точки, радиусы скругления, длины и пр.) а также вычисляет в автоматическом режиме (координаты центров скруглённых линий, уравнения кривых). Затем, применяя методы численного интегрирования к частям модели, могут быть вычислены площади поверхностей, длины граней, объёмы под поверхностями. Далее проводя булевы операции с параметрами получившихся частей, вычисляются массово-центровочные характеристики модели.

Координаты центра масс могут быть вычислены посредством известных выражений (4):

$$x_c = \frac{1}{V} \int_V x dV; \quad y_c = \frac{1}{V} \int_V y dV; \quad z_c = \frac{1}{V} \int_V z dV \quad (4)$$

Если параметры поверхностей модели известны, не составляет труда вычислить их уравнения, а значит и найти координаты центра масс. При применении булевых операций, описанных в табл. 1, при известных координатах центров масс каждого из простых объектов, формирующих модель, центр масс всего объекта может вычисляться по формулам:

$$x_{c_0} = \frac{1}{V_0} \sum x_k V_k; \quad y_{c_0} = \frac{1}{V_0} \sum y_k V_k; \quad z_{c_0} = \frac{1}{V_0} \sum z_k V_k \quad (5)$$

где:

$x_{c_0}, y_{c_0}, z_{c_0}$ – координаты центра масс всей модели;

x_k, y_k, z_k – координаты центра масс k -го элемента, входящего в состав модели;

V_k – объём k -го элемента, входящего в состав модели.

Составляющие тензора инерции тела, как один из показателей массово-центровочных характеристик, могут вычисляться в соответствии с представленными выражениями, если известно математическое описание поверхностей, формирующих тело, и плотность материала модели:

$$\begin{aligned} J_x &= \int_V \rho (y^2 + z^2) dV ; J_y = \int_V \rho (x^2 + z^2) dV ; J_z = \int_V \rho (x^2 + y^2) dV \\ J_{xy} &= \int_V \rho xy dV ; J_{xz} = \int_V \rho xz dV ; J_{yz} = \int_V \rho yz dV \end{aligned} \quad (6)$$

Этих выражений уже достаточно для вычисления тензора инерции в базовых координатах. Если же необходимо посчитать моменты инерции относительно произвольных осей, необходимо применить теорему Гюйгенса (3) для вычисления момента инерции относительно осей, проходящих через центр масс тела. После этого можно определить момент инерции тела относительно произвольной оси, проходящей через центр масс тела с помощью уравнения (7).

$$I_s = \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{s} \quad (7)$$

где: \mathbf{J} – тензор инерции тела в базисе, проходящем через центр масс тела и параллельно смещенный относительно базовой системы координат;

\mathbf{s} – единичный вектор, параллельный оси, относительно которой требуется определить момент инерции; $|\mathbf{s}|=1$

Далее применяя булевы операции и свойство аддитивности момента инерции, теорему Гюйгенса, может быть рассчитан момент инерции всей модели относительно произвольной оси.

Таким образом, основные массово-центровочные характеристики деталей, требующиеся при расчётах, могут быть получены в системах автоматизированного проектирования. При условии использования в системах автоматизированного проектирования современных и достоверных методов описания поверхностей, составляющих тело, таких как B-Rep, применения высокого разрешения, получаемые расчётные характеристики детали будут достоверны и точны.

При проектировании «цифровых двойников» динамических систем ключевыми параметрами также являются показатели жесткости соединений, поскольку именно упругие связи вносят такое нежелательное явление в поведение как резонанс. Поэтому одной из важных задач является определение показателей упругости системы для качественного её анализа и использования её «цифрового двойника» для проектирования автоматической системы управления [17]. В общем случае, определение характеристик упругости элементов проводится самим конструктором, поскольку только ему известны точки соединения элементов, между которыми должна рассчитываться упругость связи. Это обусловлено тем, что именно конструктор, разрабатывая форму объекта, должен проводить прочностной расчет, определять места креплений и соединений деталей приборов с другими частями проектируемого объекта.

Однако если не использовать средства компьютерного моделирования физических процессов, возможно лишь ориентировочно рассчитать геометрию конструкции, необходимую для противостояния номинальных прикладываемых нагрузок. А также определить лишь приблизительно упругость связей, хотя в динамических системах, таких как электропривод, упругость является одной из важнейших характеристик, которая непосредственно влияет на проектируемые в дальнейшем регуляторы систем управления. В отсутствие применения средств моделирования физических процессов, производится идентификация объекта управления как динамической системы. Но это требует наличия прототипа изделия.

Во-первых, производство макета увеличивает сроки производства. Во-вторых, макет требует бережного обращения с собой во избежание его поломки, а значит проведение испытаний на предельные нагрузки не всегда возможно. И наконец, в случае неудовлетворительных результатов разработчикам необходимо проходить заново все стадии проектирования, что практически эквивалентно созданию изделия с нуля.

Именно задачу минимизации временных и материальных ресурсов на производство призваны решить системы автоматизированного проектирования с возможностью моделирования физических процессов. Применительно к задачам инженерного проектирования такие системы выступают в роли решателя системы сложных дифференциальных уравнений, которые описывают поведение проектируемого объекта под воздействием внешних сил.

По результатам расчетов инженеру становится возможным идентифицировать параметры интересующих механических связей посредством определения упругих деформаций тела под воздействием заданных сил.

Обсуждение результатов. В общем случае связь между деформациями и силами, приложенными к малому объему, записывается в форме системы дифференциальных уравнений (8) [18].

$$\begin{cases} (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + F_x = 0 \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + F_y = 0 \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + F_z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где:

$$l = \frac{E\eta}{(1+\eta)(1-2\eta)} - \text{первый параметр Ламе};$$

$$m = \frac{E}{2(1+\eta)} - \text{второй параметр Ламе, он же модуль сдвига материала } G;$$

u_i – перемещение малого объема в направлении i под воздействием силы;

F_i – сила, приложенная к малому объему в направлении i ;

E – модуль Юнга материала;

η – коэффициент Пуассона материала.

Следует отметить, что такая система дифференциальных уравнений должна быть составлена для каждого малого объема в пределах исследуемого тела, для которого производится определение свойств упругости. Само по себе решение подобной системы – трудоемкая задача, осложняющаяся тем, что решение нужно находить для множества точек. Однако применение численных методов в системах автоматизированного проектирования для решения дифференциальных уравнений (например, метода Рунге-Кутты) позволяет производить подобные исследования и определять требуемые характеристики объектов. Принципиально решение таких систем производится посредством применения метода конечных элементов, для реализации которого тело разбивается сеткой на мелкие куски, которые в этом методе представляются как раз малыми объемами [19, 20]. По сути, при уменьшении размера этих элементов, что эквивалентно увеличению числа узлов сетки, задача сведется к решению систем дифференциальных уравнений для бесконечно малых объемов, что соответствует идее дифференциального счисления.

Таким образом, чем меньше малые объемы, на которые разбивается тело в системе автоматизированного проектирования, тем ближе решение к реальному физическому процессу деформации. Однако нельзя бесконечно сближать вершины разбивающей сетки, поскольку это

неоправданно увеличивает время решения систем. Поэтому актуальным остается вопрос определения оптимального соотношения между размером элементов разбивающей сетки и результатами вычисления, а также, какие погрешности вносит увеличение размера сетки и насколько значительны эти погрешности в процессе разработки приборов.

Для исследования точности расчётов физических параметров проектируемой системы выбран тривиальный случай соединения двух масс электропривода через вал, обладающий нежесткостью. Под первой массой электропривода понимается ротор электродвигателя, а под второй – некий присоединённый к ротору через вал маховик. В данном случае вал и обе массы представляются однородными цилиндрами, причем предполагается, что нежесткостью обладает только вал. На рис. 2 представлена модель соединения масс через вал.

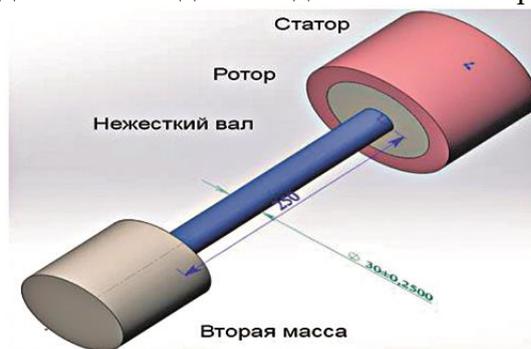


Рис. 2. Модель соединения ротора и статора электродвигателя через упругий вал
Fig.2. Model of stator with rotor connection through the elastic shaft

Для однородного цилиндра, который скрепляет две массы в рассматриваемом случае, связь между углом поворота между торцевыми плоскостями и приложенной нагрузкой выражается соотношением (9):

$$f = \frac{TL}{J_p G} \quad (9)$$

где:

f – угол, на который скручивается цилиндр;

T – величина прикладываемого момента, скручивающего цилиндр;

L – расстояние между торцевыми плоскостями цилиндра, иными словами высота цилиндра;

$J_p = \frac{D}{2} r^4$ – полярный момент инерции цилиндра;

r – радиус цилиндра;

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига материала цилиндра.

Коэффициент жесткости связи в случае скручивания тела равен отношению прикладываемого момента к углу, на который повернулось тело, при условии работы материала в области, не выходящей за границы предела упругости, и может быть выражен из (9) в форме (10):

$$c = \frac{T}{f} = \frac{GJ_p}{L} \quad (10)$$

где:

c – коэффициент жесткости.

Физическое описание процессов, происходящих в двухмассовой системе с упругой связью между массами, выражается системой дифференциальных уравнений (11):

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} \\ M_{12} = c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} \end{cases} \quad (11)$$

где:

J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй масс, соответственно;

M, M_{12} – внешний вращающий момент прикладываемый к первой массе и вращающий момент, оказываемый на вторую массу с первой, соответственно;

ω_1, ω_2 – угловые скорости вращения первой и второй масс соответственно;

φ_1, φ_2 – углы поворота первой и второй массы, соответственно;

c_{12} – коэффициент жесткости связи между первой и второй массами.

Из системы (11) видно, что упругость связи между массами, выражаемая коэффициентом жесткости c_{12} , является важным параметром, формирующим динамику системы. Поэтому точность определения этого параметра напрямую влияет на точность математической модели, основное назначение которой – это максимально точно передавать поведение реального объекта. Более того, чем точнее определяются параметры нежесткости на этапе конструирования, тем более точную, аккуратную и качественную систему управления сможет реализовать разработчик, основываясь на математической модели. И, конечно, чем точнее определены параметры нежесткости, тем вероятнее, что для системы управления не требующей сверхвысоких показателей точности отработки заданий потребуются коррекция регуляторов на реальном рабочем объекте.

Система (11) может быть представлена математической моделью в виде структурной схемы на рис. 3.

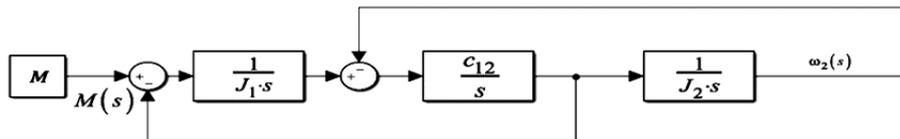


Рис.3. Математическая модель двухмассовой системы с нежесткостью

Fig.3. Mathematical model of two-mass system with elasticity

Система уравнений (11) в форме вход-выход может быть представлена выражением (12). За вход принимается момент, подаваемый на первую массу, а выходом считается угловая скорость второй массы.

$$\frac{\omega_2(s)}{M(s)} = \frac{1}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} s^3 + (J_1 + J_2) s} = \frac{1}{s \left(\frac{J_1 J_2}{c_{12}} s^2 + (J_1 + J_2) \right)} \quad (12)$$

где: s – комплексная переменная преобразования Лапласа.

Резонансная частота системы, описываемой выражением (12), находится посредством определения полюсов системы. Для этого необходимо приравнять к нулю знаменатель системы (12), найти корни этого уравнения относительно переменной s . После определения полюсов системы, производится подстановка $s \rightarrow j \cdot \omega$, где j это мнимая единица. Выраженная ω будет равна резонансной частоте. Полюса системы (12) равны: $0, \pm j \cdot \sqrt{\frac{c_{12}(J_1+J_2)}{J_1 J_2}}$. А резонансная частота в общем виде определяется выражением (13):

$$\omega_r = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} \quad (13)$$

где: ω_r – резонансная частота системы (12).

Отрицательная и нулевая частоты имеют смысл с математической точки зрения в контексте преобразования Лапласа, однако с физической точки зрения резонансная частота должна быть ненулевой и положительной.

Для определения параметра нежесткости модели, представленной на рис. 2, а также её массово центровочных характеристик в качестве системы автоматизированного проектирования выбран пакет Solid Works. Этот прикладной пакет широко используется при проектировании различного рода устройств и приборов, распространен в среде конструкторов в целом. Кроме того, он позволяет проводить исследования на механическую прочность конструируемых изделий методом конечных элементов, то есть, применяя разбиение моделей объектов на малые объемы и решая систему дифференциальных уравнений (8) для каждого из объемов. Тем самым возможным становится определять упругие деформации сложных конструкций.

Поскольку одна из важных задач исследования - это оценка точности и достоверности результатов, предоставляемых системами автоматизированного проектирования конструктору о деформациях моделей под нагрузками, в качестве метода исследования выбрана следующая последовательность действий:

- 1) Модель вала, соединяющая на рис. 2 вторую массу и ротор, разбивается сеткой на малые объемы с варьируемой дистанцией между вершинами сетки;
- 2) Для каждого размера сетки производится вычисление коэффициента упругости вала на основании физических характеристик материала и рассчитанного смещения точек модели относительно начального положения;
- 3) Из модели, созданной в Solid Works, получают данные о моменте инерции элементов деталей;
- 4) На основании данных, полученных в системе автоматизированного проектирования, рассчитывается резонансная частота системы, так как она является одной из важнейших характеристик динамической системы при проектировании системы управления электромеханическим объектом;
- 5) Результаты исследования сравниваются с аналитически рассчитанными величинами. В качестве материала выбрана сталь со следующими физическими параметрами:
 - 1) Модуль Юнга E – 210 ГПа;
 - 2) Модуль сдвига G – 79 ГПа;Коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$;
Плотность $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$.

Геометрические параметры модели, представленной на рис. 2:

- 1) Диаметр вала – 30 мм;
- 2) Диаметр второй массы и ротора – 100 мм;
- 3) Длина вала – 250 мм;
- 4) Длина второй массы и ротора – 100 мм.

В качестве внешнего воздействия принят крутящий момент, действующий вдоль торцевую грань и имеющий величину 300 Н•м. Другая торцевая плоскость вала является жестко закрепленной. Исследуемая модель вала, разбитая сеткой и с приложенной нагрузкой представлена рис. 4.

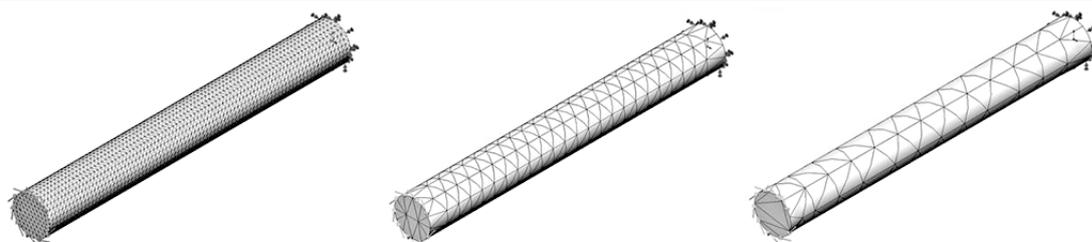


Рис.4. Модель вала, разбитая сеткой разного размера
Fig.4 Model of the shaft being divided on elementary cells of different size

Результаты исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследования
Table 1. Results of research

Показатели Indicators	Расстояние между вершинами сетки, мм Distance between mesh vertices, mm			Аналитически рассчитанное значение Analytically calculated value
	20	10	3	
φ , рад	0,011666	0,011693	0,011820	0,011939
c , кН•м/рад	25,715	25,656	25,381	25,129
ω_r , рад/с	2578,7	2575,7	2561,9	2549,1

Из результатов расчетов резонансной частоты системы видно, что размер разбивающей сетки оказывает влияние на значение угла скручивания вала, и как следствие на значение параметра жесткости. Это явление следует непосредственно из того факта, что для решения задачи деформации тела применяется численный метод решения системы (8) с конечным шагом разбиения.

В предельном случае погрешность определения резонансной частоты составляет приблизительно 1% (в случае разбиения модели крупной сеткой 20 мм). Поскольку в системах управления электроприводами для подавления механических резонансных частот используются режекторные фильтры [21], обладающие очень узкими полосами заграждения, погрешность в 1% может привести к тому, что система управления будет настроена недостаточно точно, а режекторный фильтр не будет подавлять реальную механическую резонансную частоту. Это, в свою очередь, может привести к длительному процессу доводки изделия и перенастройки системы управления, а в худшем случае к возникновению механического резонанса в рабочем режиме. В то же время, массово-центровочные характеристики цилиндра, рассчитанные средствами системы автоматизированного проектирования не отличаются от аналитически вычисленных. Это достигается за счет применения современных методов описания границ твердотельных моделей: B-Rep и C-Rep.

Вывод. В работе обоснована целесообразность и показана широта применения методов компьютерного моделирования для проектирования технических систем. Были описаны способы представления моделей и принципы вычисления массово-центровочных характеристик. Описан принцип, положенный в основу решения задачи нахождения механических деформаций под воздействием внешних нагрузок. На практическом примере показано, что погрешности, вносимые численными методами, с конечным шагом. Несмотря на то, что ошибки вычисления параметров, связанных с деформациями не так значительны, в ряде случаев, например в прецизионном электроприводе они могут оказывать ощутимое влияние, так как погрешности настройки систем управления меньше. Как следствие, ошибки, полученные во время компьютерного моделирования, могут оказывать доминирующее воздействие на итоговую точность работы системы.

Библиографический список:

1. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M. Industry 4.0 // Business & information systems engineering. 2014. Vol. 6. №. 4. pp. 239-242.
2. Ahuett-Garza H., Kurfess T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing // Manufacturing Letters. 2018. Vol. 15. pp. 60-63.

3. Cukovic S., Devedzic G., Ghionea I., Fiorentino M., & Subbaraj K. Engineering design education for industry 4.0: Implementation of augmented reality concept in teaching CAD courses // Proceedings of 2016 International Conference on Augmented Reality for Technical Entrepreneurs (ARTE'16). 2016. pp. 11-16.
4. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, Cham, 2017. pp. 85-113.
5. Tovey M. Drawing and CAD in industrial design // Design Studies. 1989. Vol. 10. №. 1. pp. 24-39.
6. Hürlimann, F., Kelm, R., Dugas, M., Oltmann, K., & Kress, G. Mass estimation of transport aircraft wingbox structures with a CAD/CAE-based multidisciplinary process // Aerospace Science and Technology. 2011. Vol. 15. No. 4. C. 323-333.
7. Абуфанас А.С., Лобатый А.А., Шведко А. Г. Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. №. 2.
8. Дуюн Т.А. Технологическое обеспечение точности формы контактной поверхности коллектора электродвигателя // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2010. №. 1 (95).
9. Васильцов А. А. и др. Влияние технологических погрешностей на динамику электродвигателя-маховика // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. №. 16.
10. Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Поречный С. С. Об одном подходе к практической оценке погрешностей численных результатов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. №. 3 (80).
11. Глазырин А. С., Боловин Е. В. Разработка и лабораторное апробирование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. №. 4. С. 112-115.
12. Choi J. W., Lee S. C., Kim H. G. Inertia identification algorithm for high-performance speed control of electric motors // IEE Proceedings-Electric Power Applications. 2006. Vol. 153. No. 3. pp. 379-386.
13. URL: <https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/VSP%20Workshop%20Inertias.pdf>/Mark McMillin. OpenVSP Inertia Calculation // OpenVSP Workshop NASA Ames Research Center August 23-25, 2016
14. Dovramadjiev, Tihomir. Calculating Mass Properties of the 3D geometry. Connection between SolidWorks 3D CAD system and Cinema 4D Tutorial presentation. // DOI: 10.13140/RG.2.2.18800.61444.
15. Al Akhras H. et al. Isogeometric analysis-suitable trivariate NURBS models from standard B-Rep models // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2016. Vol. 307. pp. 256-274.
16. Shapiro V. Solid Modeling // Handbook of computer aided geometric design. 2002. Vol. 20. pp. 473-518.
17. Lukichev D. V., Demidova G. L., Brock S. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction // 2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF). IEEE, 2015. pp. 443-448.
18. Lautrup B. Physics of continuous matter: exotic and everyday phenomena in the macroscopic world. CRC press, 2011.
19. Klocke F. et al. Examples of FEM application in manufacturing technology // Journal of Materials Processing Technology. 2002. Vol 120. No. 1-3. C. 450-457.
20. Śliwa A., Mikuła J., Dobrzański L. A. FEM application for modelling of PVD coatings properties // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2010. Vol. 41. No. 2. pp. 164-171.
21. Lee D. H., Lee J. H., Ahn J. W. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis // IET electric power applications. 2012. Vol. 6. No. 7. C. 455-461.

References:

1. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M., "Industry 4.0", Business & information systems engineering, Vol. 6, №. 4, 2014, pp. 239-242.
2. Ahuett-Garza H., Kurfess T. "A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing", Manufacturing Letters, Vol. 15, 2018, pp. 60-63.
3. Cukovic S., Devedzic G., Ghionea I., Fiorentino M., & Subbaraj K. "Engineering design education for industry 4.0: Implementation of augmented reality concept in teaching CAD courses", Proceedings of 2016 International Conference on Augmented Reality for Technical Entrepreneurs (ARTE'16), 2016, pp. 11-16.
4. Grieves M., Vickers J. "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems", Transdisciplinary perspectives on complex systems, Springer, Cham, 2017, pp. 85-113.
5. Tovey M. "Drawing and CAD in industrial design", Design Studies, Vol. 10, №. 1, 1989, pp. 24-39.
6. Hürlimann, F., Kelm, R., Dugas, M., Oltmann, K., & Kress, G. "Mass estimation of transport aircraft wingbox structures with a CAD/CAE-based multidisciplinary process" Aerospace Science and Technology, Vol. 15, №. 4, 2011, pp. 323-333.
7. Abufanas A. S., Lobaty A. A., Shvedko A. G. "Searching algorithm of parametric identification of electric drive of monitoring system", System analysis and applied informatics, 2017, Vol. 2 ["Poiskovy algoritm parametricheskoj identifikatsii elektroprivode sistemy monitoringa", Sistemny analiz i prikladnaya informatika, 2017, Vol. 2 (In Russ)]

8. Dyun T. A. Technological support of the tolerance of the shape of the contact surface of the electric drive collector, Scientific and technical bulletin of SPbPU. Natural and engineering sciences, №. 1 (95), 2010 [Tehnologicheskoe obespechenie tochnosti formy kontaktnoi poverhnosti kollektora dvigatelya, Nauchno-tehnicheskii vestnik SPbPU. Estestvennie i inzhenernye nauki, №. 1 (95), 2010] (In Russ)]
9. Vasil'tsov A. A. et al, "The influence of technological errors at the dynamics of the flywheel electric motor", Reshetnikov's readings, Vol. 1, №. 16, 2012 ["Vliyanie tehnologicheskikh pogreshnostei na dinamiku elektrodvigatelya-mahovika", reshetnikovskie chteniya, Vol. 1, №. 16, 2012] (In Russ)]
10. Zhitnikov V. P., Sherychalina N. M., Porechnyi S. S., "About one method of practical assesment of errors of numerical results", Scientific and technical statements of Saint-Petersburg state polytechnical university. Informatics. Telecommunications. Control, №. 3 (80), 2009 ["Ob odnom podhode k prakticheskoi otsenke pogreshnostei chislennykh rezultatov", Nauchno-tehnicheskiiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie, No. 3 (80), 2009] (In Russ)]
11. Glazyrin A. S., Bolovin E. V., "Development and laboratory approbation of method of identification of parameters of electric motors using difference schemes", Bulletin of Tomsk's polytechnical university, Vol. 321, No. 4, 2012, pp. 112-115 ["Razrabotka i laboratornoe aprobirovanie metoda identifikatsii parametrov elektrodvigatelya na osnove raznostnykh shem", Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta, Vol. 321, No. 4, 2012, pp. 112-115] (In Russ)]
12. Choi J. W., Lee S. C., Kim H. G., "Inertia identification algorithm for high-performance speed control of electric motors", IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 153, №. 3, 2006, pp. 379-386.
13. URL:<https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/VSP%20Workshop%20Inertias.pdf>/Mark McMillin. OpenVSP Inertia Calculation //OpenVSP Workshop NASA Ames Research Center August 23-25, 2016
14. Dovramadjiev, Tihomir, "Calculating Mass Properties of the 3D geometry. Connection between SolidWorks 3D CAD system and Cinema 4D Tutorial presentation", DOI: 10.13140/RG.2.2.18800.61444.
15. Al Akhras H. et al, "Isogeometric analysis-suitable trivariate NURBS models from standard B-Rep models", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 307, 2016, pp. 256-274.
16. Shapiro V. "Solid Modeling", Handbook of computer aided geometric design, Vol. 20, 2002, pp. 473-518.
17. Lukichev D. V., Demidova G. L., Brock S., "Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction" 2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF), IEEE, 2015, pp. 443-448.
18. Lautrup B., "Physics of continuous matter: exotic and everyday phenomena in the macroscopic world", CRC press, 2011.
19. Klocke F. et al. "Examples of FEM application in manufacturing technology", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 120, No. 1-3, 2002, pp. 450-457.
20. Śliwa A., Mikuła J., Dobrzański L. A., "FEM application for modelling of PVD coatings properties", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 41, No. 2, 2010, pp. 164-171.
21. Lee D. H., Lee J. H., Ahn J. W., "Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis", IET electric power applications, Vol. 6, No. 7, 2012, pp. 455-461.

Сведения об авторах:

Братчиков Степан Артемьевич, аспирант, факультет систем управления и робототехники; e-mail: loross90@gmail.com

Абрамова Евгения Александровна, аспирант, факультет программной инженерии и компьютерной техники; e-mail: vectra4444@mail.ru

Information about authors:

Stepan A. Bratchikov, Postgraduate Student, Faculty of Control Systems and Robotics; e-mail: loross90@gmail.com

Evgeniia A. Abramova, Postgraduate Student, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; e-mail: vectra4444@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.09.2020.

Принята в печать 10.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.09.2020.

Accepted for publication 10.11.2020.

Для цитирования: Х.М. Гаджиев, Ш.Т. Исмаилова, П.А. Курбанова. Проектирование энергоэффективной быстродействующей компьютерной техники на основе экономичных светотранзисторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4): 20-26. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-20-26

For citation: H.M. Gadgiev, Sh.T. Ismailova, P.A. Kurbanova. Design of energy-efficient high-speed computer equipment based on cost-effective light transistors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 20-26. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-20-26

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-20-26

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧНЫХ СВЕТОТРАНЗИСТОРОВ

Х.М. Гаджиев, Ш.Т. Исмаилова, П.А. Курбанова

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

Резюме. Цель. В статье рассматриваются вопросы формирования экономичных светотранзисторов для создания быстродействующих энергоэффективных компьютерных структур, способных с высоким быстродействием и точностью решать многочисленные задачи. Для этого используются полупроводниковые структуры различного типа, способные испускать и поглощать фотоны для приема и передачи цифровой информации. **Метод.** Применение зеркальных электродов позволяет осуществить многократное переотражение сгенерированных фотонов внутри светотранзистора для того, чтобы рекуперировать всю сгенерированную энергию в электричество. Это повышает энергоэффективность транзистора в целом и позволяет реализовать компьютерные устройства с высокой экономичностью, решающие различные задачи. **Результат.** Большая часть полезной энергии информационного сигнала будет переноситься от одного электрода к другому, причем перемещение будет иметь более высокую скорость за счет использования фотонов, а не дрейфующих электронов, а также это косвенно увеличит быстродействие светового транзистора во много раз на несколько порядков и позволит эффективно решить задачу реализации более мощных и быстродействующих транзисторов с большей экономической выгодой. **Вывод.** Доказаны перспективы для реализации быстродействующих энергоэффективных компьютерных структур на основе, как биполярных транзисторов, так и униполярных транзисторов, а также тиристоров, лазеров и других полупроводниковых компонентов в светоизлучающих структурах.

Ключевые слова: экономичный, светотранзистор, излучающий переход, поглощающий переход, компьютер

DESIGN OF ENERGY-EFFICIENT HIGH-SPEED COMPUTER EQUIPMENT BASED ON COST-EFFECTIVE LIGHT TRANSISTORS

H.M. Gadgiev, SH.T. Ismailova, P.A. Kurbanova

*Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachka 367026, Russia*

Abstract. Objective. The article deals with the formation of cost-effective light transistors for creating high-speed energy-efficient computer structures that can solve numerous problems with high speed and accuracy. For this purpose, various types of semiconductor structures are used that can emit and absorb photons for receiving and transmitting digital information. **Methods.** The use of mirror electrodes allows for repeated re-reflection of the generated photons inside the light transistor to

recover all the generated energy into electricity. This increases the energy efficiency of the transistor as a whole and allows implementing computer devices with high efficiency in solving various tasks.

Results. *Most of the useful energy of the information signal is transferred from one electrode to another, and the movement has a higher speed due to the use of photons, rather than drifting electrons, and this indirectly increases the speed of the light transistor by several orders of magnitude and effectively solves the problem of implementing more powerful and high-speed transistors with greater economic benefits.* **Conclusion.** *Prospects for the implementation of high-speed energy-efficient computer structures based on both bipolar transistors and unipolar transistors, as well as thyristors, lasers, and other semiconductor components in light-emitting structures have been developed.*

Keywords: *economical, light transistor, emitting junction, absorbing junction, computer*

Введение. Современный уровень развития компьютерной техники базируется на высокой степени интеграции электронных компонентов на полупроводниковых кристаллах. Основным ограничением является сложность изготовления большого количества электронных компонентов на малых площадях. Это связано с тем, что даже незначительное тепловыделение приводит к существенному перегреву в локальных зонах и способно привести к выходу из строя электронной схемы за счет теплового пробоя.

Постановка задачи. Для того чтобы устранить этот недостаток целесообразно использовать такие электронные компоненты, которые будут выделять меньше паразитного тепла. Паразитное тепло выделяется за счет двух факторов. Первым фактором являются Джоулевые тепловыделения. Они обусловлены протеканием электрического тока через резистивные структуры в виде полупроводниковых зон. Чем больше сопротивление оказывается протекающему току, тем больше выделяется паразитной тепловой энергии. В этом случае необходимо снижать уровень сопротивления таких полупроводниковых структур за счет уменьшения размеров, через которые протекает электрический ток.

Методы исследования. Применение полупроводниковых структур с высокими уровнями проводимости позволяет решить эту задачу с высокой эффективностью. Кроме того, изготовление транзистора в виде тонких пленок также позволяет осуществить снижение сопротивления полупроводниковых структур за счёт того, что поперечный размер полупроводниковой ветви будет значительно больше толщины этой полупроводниковой ветви, что обусловит малое электрическое сопротивление и низкий уровень тепловых выделений.

Дополнительным преимуществом такой структуры является экономия на электроэнергии. Помимо экономии электроэнергии на самом транзисторе, это позволяет осуществить экономию энергии и на последующем охлаждении транзистора в составе полупроводникового чипа компьютерной схемы.

Любой компьютерный процессор выделяет большое количество паразитного тепла. Это требует осуществить его охлаждение, на которое также расходуется энергия и средства [1-6]. Кроме того, тепловые пробой также имеют финансовые потери.

Снижение быстродействия за счет увеличения тепловых потерь также приводит к финансовым потерям. Таким образом, решая задачу по уменьшению тепловых потерь, мы решаем одновременно задачу по повышению экономии расходов при работе компьютерной техники [10-15].

Помимо Джоулевых тепловыделений имеются также термоэлектрические паразитные тепловыделения. Они обусловлены изменением энергии при прохождении зарядов из одной полупроводниковой зоны в другую. При рекомбинации электрона, который имел большую энергию, избыток энергии выделяется в виде тепла и осуществляет паразитный разогрев электронного компонента схемы. Если же энергия электронов при рекомбинации была маленькой, то происходит охлаждение такого участка полупроводникового компонента.

Сочетание нагрева и охлаждения реализует обычное термоэлектрическое устройство для охлаждения или нагрева. КПД таких устройств не очень высок, поэтому нагрев бывает, как правило, больше, чем охлаждение в несколько раз. В результате при протекании тока через по-

лупроводниковый биполярный транзистор один переход будет термоэлектрически разогреваться, а второй электрод будет термоэлектрически охлаждаться в соответствии с эффектом Пельтье.

Если рассмотреть эти эффекты совместно, то можно сделать вывод, что увеличение тепловых потерь при протекании тока связано также с термоэлектрическим дополнительным выделением тепла.

Если уровень энергии электрона при рекомбинации выше определенного значения, то вместо разогрева атома кристаллической решетки, электронный компонент будет испускать фотоны в диапазоне от инфракрасного света до ультрафиолетового в зависимости от уровня энергии. Чем выше уровень энергии рекомбинированного электрона, тем более высокую частоту будет иметь испускаемый фотон. Эта энергия будет уноситься из полупроводника со скоростью света и позволит сохранить его от теплового перегрева. При этом второй переход транзистора будет у нас поглощать эти фотоны, рекомбинируя их в электричество.

Сочетание испускания фотонов и поглощения их позволяет реализовать экономичный световой транзистор [7,8]. В таком транзисторе один переход испускает фотоны под действием информационного импульса, а второй поглощает часть фотонов. Та часть фотонов, которая не была поглощена, перемещается до столкновения с зеркальными металлическими электродами и переотражается обратно. Если изготовить полупроводник по светодиодной технологии из арсенидгаллия и других похожих материалов, то он имеет прозрачную структуру, не препятствующую перемещению фотонов [17-20].

Таким образом, фотоны будут до тех пор переотражаться между зеркальными металлическими электродами базы, коллектором и эмиттером пока не будут полностью поглощены поглощающим переходом.

На рис.1 приведена структура экономичного светового транзистора *n-p-n*-структуры [16].

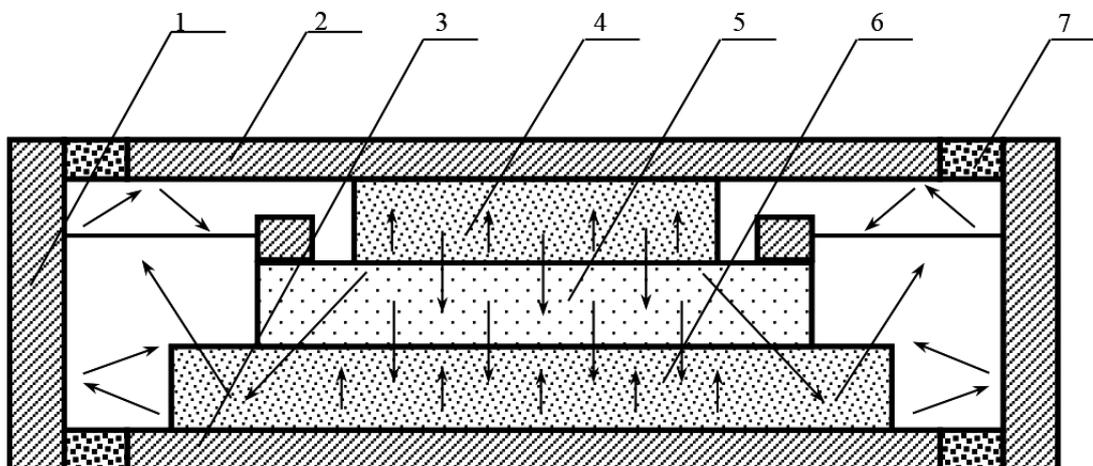


Рис.1. Экономичный световой транзистор *n-p-n*-структуры
Fig. 1. Economical light transistor *n-p-n*-structure

Конструктивно экономичный световой транзистор заключен внутри зеркальных металлических электродов: база 1, эмиттер 2, коллектор 3.

Светоизлучающим переходом в биполярном транзисторе является тот переход, на котором электроны переходят из *n* зоны 4 в *p* зону 5, в результате чего вместо тепловых потерь энергия рассеивается в виде оптического излучения. Фотопреобразующим является переход, на котором электроны переходят из *p* зоны 5 в *n* зону 6, приобретая извне дополнительную энергию от излучения, как в обычной солнечной батарее. База 1, эмиттер 2, коллектор 3 электрически изолированы друг от друга диэлектрическим материалом 7.

Обсуждение результатов. Экономичный световой транзистор, сохраняя достоинства способа охлаждения светодиодов [5], светотранзисторов [7] и высокое быстродействие свето-

транзистора [9], приобретает высокую экономичность за счет генерации электричества из фотонов на фотопреобразующем *n-p*-переходе при помощи зеркальных металлических электродов.

При прохождении электронов через один переход информационный импульс частично преобразуется вместо паразитного тепла в световые фотоны. Эти фотоны достигают поглощающего перехода и рекомбинируют опять в электрическую энергию. Часть фотонов достигает металлических электродов и переотражается обратно. После многократного переотражения рано или поздно эти фотоны рекомбинируют на поглощающем электроде в информационный сигнал.

Скорость, с которой перемещаются эти фотоны, максимальная на нашей вселенной, и практически мгновенно весь информационный цифровой импульс перейдет от одного перехода к другому. Реализация таких экономичных светотранзисторов в составе компьютерных устройств позволит создать с минимальными затратами новые электронные компоненты для решения многофункциональных задач.

Преимуществом таких устройств является не только их высокое быстродействие и экономичность, но и высокая надежность. Повышение надежности осуществляется за счет уменьшения тепловой нагрузки и исключения риска теплового пробоя. Затраты экономические на эксплуатацию таких изделий будут снижаться за счет того, что будет расходоваться меньше электроэнергии в процессе работы такого транзистора.

Вывод. Уменьшение паразитных тепловых выделений в таком экономичном световом транзисторе позволит увеличить мощность полупроводниковых электронных компонентов за счет того, что большая часть полезной энергии информационного сигнала будет достигать от одного электрода к другому.

Перемещение будет иметь более высокую скорость при помощи фотонов, чем при помощи дрейфующих электронов. То есть, это косвенно увеличит быстродействие светового транзистора во много раз на несколько порядков и позволит также решить задачу реализации более мощных и быстродействующих транзисторов с большей экономической выгодой. Такие транзисторы имеют ещё дополнительное преимущество за счет того, что не требуют дополнительного охлаждения.

Так как у них уровень паразитных тепловыделений меньше, они меньше нагреваются и не требуют воздушного охлаждения, жидкостного или термоэлектрического. Кондуктивно и конвекционно охлаждать такие транзисторы нет необходимости и даже излучение, которое испускают эти экономичные световые транзисторы, будет рекуперировано опять в полезную энергию. За счет того, что такой транзистор имеет меньшие тепловые выделения, имеется возможность для дальнейшего увеличения степени интеграции компьютерных процессоров, так как на единицу площади можно будет разместить большую функциональную схему.

Экономически это более выгодно, так как в тех же габаритах можно получить более мощную компьютерную структуру. Эксплуатация таких устройств также более выгодна за счет снижения финансовых затрат на систему охлаждения и защиты от перегрева.

Дополнительным преимуществом является возможность работы таких структур в режимах нестационарных, так как для них нет никакой разницы увеличения или уменьшения тепловой нагрузки. Широкая область применения для таких экономичных световых транзисторов - это космическое пространство, где невозможно осуществлять кондукцию и конвекцию при охлаждении, а возможно только излучение для переноса энергии от нагретых зон.

В экономичном световом транзисторе не требуется даже переносить излучение, так как всё излучение, произведенное этим транзистором, будет рекуперировано в полезную энергию. Для снижения экономических затрат при изготовлении таких световых транзисторов целесообразно использовать аддитивные технологии с применением различных порошков.

Наиболее целесообразным способом изготовления будет являться 3D принтер [15]. Экономичные световые транзисторы могут применяться не только в компьютерных технологиях,

но и в обычных дискретных структурах вплоть до СВЧ диапазона и выше для создания фотонных структур.

Библиографический список:

1. Патент РФ №2288555. Термоэлектрический теплоотвод / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Гафуров К.А., опубл. 27.11.2006.
2. Патент РФ №2335825. Термоэлектрическое устройство с высоким градиентом температур / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., опубл. 10.10.2008.
3. Патент РФ №2360380. Устройство для термостатирования компьютерного процессора / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Б.И. № 18, 2009.
4. Патент РФ №2369894. Термоэлектрическое устройство термостабилизации компонентов вычислительных систем с высокими тепловыделениями / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Б.И. № 28, 2009.
5. Патент РФ №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. // Б.И. № 33, 2010.
6. Патент РФ №2449417. Способ охлаждения полупроводниковых тепловыделяющих электронных компонентов через биметаллические термоэлектрические электроды / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 12, 2012.
7. Патент РФ №2487436. Светотранзистор / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 10.07.2013.
8. Патент РФ №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 5, 2014.
9. Патент РФ №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А. // Б.И. № 5, 2014.
10. Патент РФ № 2534954. Устройство для охлаждения компьютерного процессора с применением возгонки / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д. // Б.И. № 34, 2014.
11. Патент РФ № 2562742. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов на основе применения полупроводниковых лазеров / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. // Б.И. № 25, 2015.
12. Патент РФ № 2562744. Светотиристор / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкин Д.А., Челушкина Т.А. // Б.И. № 25, 2015.
13. Патент РФ № 2575618. Термоэлектрическое устройство с тонкопленочными полупроводниковыми ветвями и увеличенной поверхностью теплоотвода / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. // Бюл. №5, 2016.
14. Патент РФ № 2593443. Светотранзистор с двумя излучающими переходами / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. // Бюл. №22, 2016.
15. Патент РФ № 2702019. 3-D принтер для печати изделий, состоящих из различных по электрофизическим свойствам материалов / Каблов Е.Н., Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Шкурко А.С. // Б.И. № 10, 2019.
16. Патент РФ № 2 587 534. Экономичный световой транзистор / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Челушкина Т.А., Магомедова П.А. // Дата подачи заявки: 2014.12.08. Опубликовано: 2016.06.20
17. Anatyshuk L.I. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity . 1998.
18. Lyon J.R. Overview of Industry Interest in New Thermoelectric Materials // Thermoelectric Materials - New Directions and Approaches. MRS, 1997.
19. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design. Electron. Packag. and Prod. 1994, No.9.
20. Wartonowez T., Czarnecki A. Thermoelectric Cascade for Cryosurgical Destroyer // Proceedings of the 16th Int. Conf. jn Thermoelectrics, Dresden, Germany, 1997, p.705.

References:

1. Patent RF №2288555. Termoelektricheskiy teplootvod / Ismailov T.A., Gadzhiev K.H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A., publ. 27.11.2006. [RF patent №2288555. Thermoelectric heat removal / Ismailov T.A., Gadzhiev K.H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Gafurov K.A., publ. November 27, 2006. (In Russ)]
2. Patent RF №2335825. Termoelektricheskoye ustroystvo s vysokim gradiyentom temperatur / Ismailov T.A., Gadzhiev K.H.M., Gadzhieva S.M., publ. 10.10.2008. [RF patent No. 2335825. Thermoelectric device with a high temperature gradient / Ismailov T.A., Gadzhiev K.H.M., Gadzhieva S.M., publ. 10.10.2008. (In Russ)]
3. Patent RF №2360380. Ustroystvo dlya termostatirovaniya komp'yuternogo protsessora / Ismailov T.A., Gadzhiev K.H.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. // B.I. № 18, 2009. [RF patent No. 2360380. A device for

- thermostating a computer processor / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. // B. I. No. 18, 2009. (In Russ)]
4. Patent RF №2369894. Termoelektricheskoye ustroystvo termostabilizatsii komponentov vychislitel'nykh sistem s vysokimi teplovydeleniyami / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. // B.I. № 28, 2009. [RF patent No. 2369894. Thermoelectric device for thermal stabilization of components of computer systems with high heat release / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. // B.I. No. 28, 2009. (In Russ)]
 5. Patent RF №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov v vide izlucheniya / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. № 33, 2010. [RF patent №2405230. Method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. No. 33, 2010. (In Russ)]
 6. Patent RF №2449417. Sposob okhlazhdeniya poluprovodnikovyykh teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov cherez bimetallicheskiye termoelektricheskiye elektrody / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. № 12, 2012. [RF patent No. 2449417. Method of cooling semiconductor heat-generating electronic components through bimetallic thermoelectric electrodes / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina T.A. // B.I. No. 12, 2012. (In Russ)]
 7. Patent RF №2487436. Svetotranzistor / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 10.07.2013. [RF patent No. 2487436. Svetotransistor / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 10.07.2013. (In Russ)]
 8. Patent RF №2507613. Kaskadnoye svetoizluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. № 5, 2014. [RF patent No. 2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. No. 5, 2014. (In Russ)]
 9. Patent RF №2507632. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviyem / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov SH.A. // B.I. № 5, 2014. [RF patent No. 2507632. Light transistor with high speed / Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Nezhvedilov T.D., YusufovSh.A. // B.I. No. 5, 2014. (In Russ)]
 10. Patent RF № 2534954. Ustroystvo dlya okhlazhdeniya komp'yuternogo protsessora s primeneniyyem vozgonki / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D. // B.I. № 34, 2014. [RF patent No. 2534954. A device for cooling a computer processor using sublimation / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Gadzhieva SM, Nezhvedilov TD. // B.I. No. 34, 2014. (In Russ)]
 11. Patent RF № 2562742. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov na osnove primeneniya poluprovodnikovyykh lazerov / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // B.I. № 25, 2015. [RF patent № 2562742. Method of heat removal from heat-generating electronic components based on the use of semiconductor lasers / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina TA // B.I. No. 25, 2015. (In Russ)]
 12. Patent RF № 2562744. Svetotiristor/Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Chelushkin D.A., Chelushkina T.A. // B.I. № 25, 2015. [RF patent No. 2562744. Light thyristor / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Gadzhieva SM, Chelushkin DA, Chelushkina TA // B.I. No. 25, 2015 (In Russ)]
 13. Patent RF № 2575618. Termoelektricheskoye ustroystvo s tonkoplennymi poluprovodnikovymi vetvyami i uvelichennoy poverkhnost'yu teplootvoda / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. // Byul. №5, 2016. [RF patent No. 2575618. Thermoelectric device with thin-film semiconductor legs and increased heat sink surface / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Chelushkina TA, Chelushkin DA // Bul. No. 5, 2016. (In Russ)]
 14. Patent RF № 2593443. Svetotranzistor s dvumya izluchayushchimi perekhodami / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. // Byul. №22, 2016. [RF patent No. 2593443. Light transistor with two emitting transitions / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Gadzhieva SM, Chelushkina TA, Chelushkin DA // Bul. No. 22, 2016. (In Russ)]
 15. Patent RF № 2702019. 3-D printer dlya pechati izdeliy, sostoyashchikh iz razlichnykh po elektrofizicheskim svoystvam materialov / Kablov Ye.N., Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. // B.I. № 10, 2019. [RF patent No. 2702019. 3-D printer for printing products, consisting of materials of various electro-physical properties / Kablov E.N., Ismailov T.A., GadzhievKh.M., Chelushkina T.A., Shkurko A. FROM. // B.I. No. 10, 2019. (In Russ)]
 16. Patent RF № 2 587 534. Ekonomichnyy svetovoy tranzistor / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhieva S.M., Chelushkina T.A., Magomedova P.A. // Data podachi zayavki: 2014.12.08. Opublikovano: 2016.06.20 [RF patent № 2 587 534. Economical light transistor / Ismailov TA, GadzhievKh.M., Gadzhieva SM, Chelushkina TA, Magomedova PA // Application date: 2014.12.08. Published: 2016.06.20 (In Russ)]
 17. Anatychuk L.I. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 1998.
 18. Lyon J.R. Overview of Industry Interest in New Thermoelectric Materials // Thermoelectric Materials - New Directions and Approachis. MRS, 1997.

19. Tardiff David W., Dore-North Lyne. Thermal modeling speeds up design. - Electron. Packag. and Prod. 1994, no. 9.
20. Wartonowez T., Czarnecki A. Thermoelectric Cascade for Cryosurgical Destroyer // Proceedings of the 16th Int. Conf. jnThermoelectrics, Dresden, Germany, 1997, p.705.

Сведения об авторах:

Гаджиев Хаджимурат Магомедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Исмаилова Шани Тагировна, доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой экономической теории; e-mail: shani717@mail.ru

Курбанова Патимат Арсланалиевна, аспирантка кафедры теоретической и общей электротехники, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Information about the authors:

Khadzhimurat M. Gadjiev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Radio engineering, telecommunications and microelectronics; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Shani T. Ismailova, Dr. Sci.(Economics), Prof., Head of the Department of Economic theory; e-mail: shani717@mail.ru

Patimat A. Kurbanova, Post-graduate Student, Department of theoretical and General electrical engineering, Senior Lecturer, Department of theoretical and General electrical engineering; e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.10.2020.

Принята в печать 10.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.10.2020.

Accepted for publication 10.11.2020.

Для цитирования О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев. Температурное поле термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов при ее введении в тело человека. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (4):27-36. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-27-36

For citation: O. V. Evdulov, A. M. Nasrulaev. Temperature field of a thermoelectric system for extracting foreign objects when introducing into the human body Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):27-36.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-27-36

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-27-36

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ЕЕ ВВЕДЕНИИ В ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев

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

Резюме. Цель. Целью исследования является создание расчетной модели термоэлектрической системы (ТЭС) для извлечения инородных объектов (ИО) из тела человека методом примораживания при ее введении в полость, а также исследование происходящих в ней теплофизических процессов. **Метод.** Разработана расчетная модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания при ее введении в полость, основанная на решении задачи теплопроводности с учетом теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, термоэлектрического модуля (ТЭМ). **Результат.** В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для извлечения инородных объектов в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий. Определено, что в устройстве может быть использован стандартный ТЭМ холодопроизводительностью от 4500 Вт/м² до 7000 Вт/м² при продолжительности выхода на режим системы 6-7 мин. **Вывод.** Установлено, что подбор параметров ТЭМ должен ориентироваться на ограничения по эксплуатации прибора, а также медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилегающих тканей, что в предложенной конструкции обеспечивается в полной мере. Предложен способ повышения эффективности системы, согласно которому используется предварительное охлаждение ТЭС внешним источником холода, а также применением форсированных режимов работы ТЭМ.

Ключевые слова: извлечение инородных объектов, примораживание, термоэлектрическая система, математическое моделирование, теплофизические процессы, численный эксперимент

TEMPERATURE FIELD OF A THERMOELECTRIC SYSTEM FOR EXTRACTING FOREIGN OBJECTS WHEN INTRODUCING INTO THE HUMAN BODY

O. V. Evdulov, A. M. Nasrulaev

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

Abstract. Objective. The objective of the article is to create a design model of a thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body by freezing when introduced into the cavity, as well as to study the internal thermophysical processes. **Methods.** A design model of a thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body by freezing the thermoelectric system introduced into the cavity is developed, based on solving the problem of thermal conductivity, taking into account the thermophysical characteristics of a biological object, foreign object, and a thermoe-

lectric module. **Results.** As a result of the numerical experiment, the authors obtained graphs of temperature changes at various points of the thermoelectric system when introduced into the human body to extract a foreign object, depending on the power of the thermoelectric system, the parameters of the module materials, and external conditions. It is determined that the device can use a standard thermoelectric module with a cooling capacity from 4500 W/m^2 to 7000 W/m^2 with a duration of 6-7 minutes for entering the system mode. **Conclusion.** It is established that the selection of thermoelectric module parameters must be guided by the limitations of the device operation, as well as medical norms and standards to avoid the process of cold injury of adjacent tissues, which is fully provided in the proposed design. A method for improving the efficiency of the system is proposed, according to which the thermoelectric system is pre-cooled using an external cold source, and forced modes of thermoelectric module operation are used.

Keywords: foreign objects extraction, freezing, thermoelectric system, simulation modeling, thermophysical processes, numerical experiment

Введение. Организм человека представляет собой чрезвычайно сложную систему. Каждая его часть находится в определенном месте и выполняет строго определенную функцию. Извне в организм человека должны поступать только жизненно необходимые вещества, например, пища, вода, воздух. Посторонние предметы, случайно попавшие в организм человека, могут нанести ему непоправимый вред и нарушить его функции. Поэтому операции по извлечению инородных объектов (ИО) из тела человека являются важными и ответственными мероприятиями, качество и оперативность проведения которых напрямую влияет на здоровье и жизнь человека.

Проведенный литературный обзор [1-7] показал, что в настоящее время извлечение ИО из тела человека производится в основном хирургическим методом с использованием различного оборудования, в состав которого входят разнообразные механические приспособления. В случае извлечения ферромагнитных ИО могут быть также применены намагниченные зонды [8].

Методики проведения операций по извлечению посторонних тел также могут быть разнообразными [9-12]. Они зависят от местоположения ИО объекта, его формы, размеров и состава и включают в себя такие мероприятия, как отыскание местоположения ИО, приведение его в наиболее удобное для извлечения положение и непосредственно выем из тела человека.

Анализируя данные методики по извлечению ИО из тела человека и технические средства для их реализации необходимо отметить их недостаточную надежность, связанную, прежде всего, с качеством фиксации постороннего объекта в приспособлении, зависимость от квалификации персонала, проводящего операцию, болезненность и продолжительность процедуры. Поэтому представляет интерес разработка новых технических средств для извлечения ИО из тела человека и методик, реализованных на их основе.

В этих условиях перспективным является использование методики локального примораживания ИО к специальному зонду с охлажденным наконечником [13-15]. Надежность фиксации ИО в извлекающем приспособлении в данном случае будет обеспечиваться за счет высокой степени сцепления наконечника зонда и объекта при их примораживании друг к другу. В качестве источника холода в зонде может быть использован компактный ТЭМ, обладающий высоким ресурсом работы, надежностью, экологичностью, обеспечивающий требуемую мощность для надежной фиксации ИО на извлекающем приспособлении [16, 17].

Постановка задачи. Целью работы является создание расчетной модели ТЭС для извлечения ИО из тела человека методом примораживания при ее введении в полость, а также исследование происходящих в ней теплофизических процессов.

Методы исследования. На рис.1 изображена расчетная схема ТЭС при внедрении ее в тело человека (без учета фазового перехода).

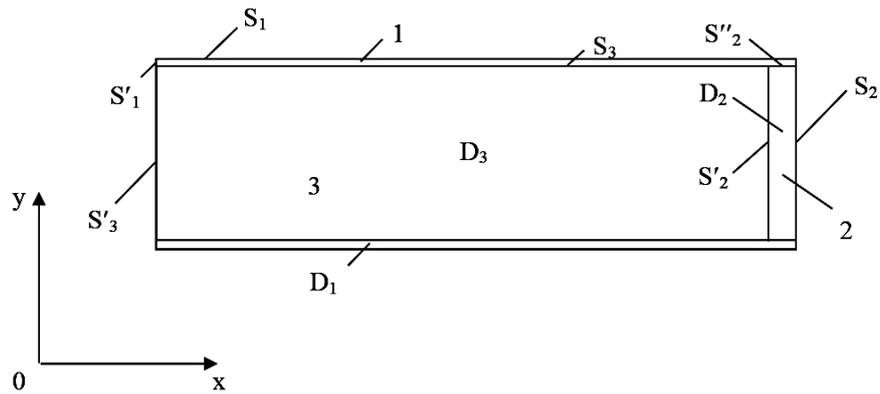


Рис.1. Тепловая модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека
Fig1. Thermal model of TPP for extracting AI from the human body ate

Здесь 1- специальная трубка для ввода в полость тела, 2 - ТЭМ, 3 - подвижный зонд с помощью направляющих, имеющий возможность перемещаться вдоль трубки, выполняющий также функции съема теплоты с горячих спаев ТЭМ.

При выполнении операции по извлечению ИО из тела человека трубка вводится в полость, с помощью зонда ТЭМ холодной поверхностью приводится контакт с объектом, происходит их сцепление за счет примораживания, затем производится выем ИО объекта за счет перемещения зонда в обратном направлении.

Для математического описания теплофизических процессов, происходящих в системе обозначим область соответствующую воздушному зазору D_1 , ТЭМ D_2 , подвижному зонду D_3 , поверхность стенки трубки ТЭС, контактирующую с телом человека (биологическим объектом) S_1 , с окружающей средой S'_1 , поверхность ТЭМ, контактирующую с биологическим объектом S_2 , зондом S'_2 , воздушным зазором S''_2 , поверхностью зонда с воздушным зазором S_3 , с окружающей средой S'_3 .

Ввиду того, что величина воздушного зазора предполагается незначительной и тепловые процессы, происходящие в системе, носят непродолжительный характер, предположим, что во всех элементах прибора процесс теплопередачи осуществляется только за счет теплопроводности.

Тогда математическое описание теплофизических процессов, протекающих в системе при ее внедрении в организм человека, без учета влажной губки (процессы, происходящие в ней при наличии фазового перехода, ведущие к примораживанию ИО к зонду, рассматриваются ниже) в обобщенном виде может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial \tau} \quad \text{при } x, y \in D_1, \\
 a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{Q_{\text{ТЭМ}}}{c_2 \rho_2} &= \frac{\partial T_2}{\partial \tau} \quad \text{при } x, y \in D_2, \\
 a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_3}{\partial \tau} \quad \text{при } x, y \in D_3, \\
 T_1, T_2, T_3 &= T_{\text{вг}} = T_{\text{ср}}, \quad \text{при } \tau = 0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} &= \alpha_{\text{бo}} (T_{\text{бo}} - T_1) \quad \text{при } x, y \in S_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_2} - q_{\text{х.ТЭМ}} &= \lambda_{\text{вг}} \frac{\partial T_{\text{вг}}}{\partial n_2} \quad \text{при } x, y \in S_2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n'_2} + q_{г.ТЭМ} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_2} \text{ при } x, y \in S'_2, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n''_2} + q_{г.ТЭМ} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n''_2} \text{ при } x, y \in S''_2, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_3} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n_3} \text{ при } x, y \in S_3, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n'_1} &= \alpha_{ср} (T_1 - T_{ср}), \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_3} &= \alpha_{ср} (T_3 - T_{ср}). \end{aligned}$$

где $T_1, T_2, T_3, T_{вг}, T_{60}$ – температуры стенки трубки, ТЭМ, зонда, влажной губки, биологического объекта;

a_1, a_2, a_3 – коэффициенты температуропроводности стенки трубки, ТЭМ, зонда;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_{вг}$ – коэффициенты теплопроводности стенки трубки, ТЭМ, зонда, влажной губки;

c_1, c_2, c_3 – удельная теплоемкость стенки трубки, ТЭМ, зонда;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – плотность стенки трубки, ТЭМ, зонда;

$Q_{ТЭМ} = I_{ТЭМ}^2 R_{ТЭМ}$; $I_{ТЭМ}$ – сила электрического тока, протекающего через ТЭМ;

$R_{ТЭМ}$ – электрическое сопротивление ТЭМ;

$q_{х.ТЭМ}$ – холодопроизводительность ТЭМ;

$q_{г.ТЭМ}$ – теплопроизводительность ТЭМ;

α_{60} – коэффициент теплообмена между стенкой трубки и биологическим объектом;

$\alpha_{ср}$ – коэффициент теплообмена ТЭС с окружающей средой;

$T_{ср}$ – температура окружающей среды;

$n_1, n'_1, n_2, n'_2, n''_2, n_3, n'_3$ – нормали к поверхностям $S_1, S'_1, S_2, S'_2, S''_2, S_3, S'_3$ соответственно; $n_i = (xh_i + yz_i)$;

h, z – единичные вектора; $i=1 \dots 7$.

Решение системы дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями (1) численным методом конечных элементов [18-20], реализованном в пакете прикладных программ Elcut дает возможность определить изменение температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС (холодопроизводительности и теплопроизводительности ТЭМ), параметров материалов модуля, а также внешних условий.

Обсуждение результатов. Численный эксперимент проводился в соответствии с требуемыми режимами тепловых процедур при воздействии на живой организм, а также ограничениями, накладываемыми на продолжительность и уровень заморозки биологического объекта для недопущения его переохлаждения.

За исходные принимались следующие параметры: $\lambda_1 = 0,159$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 1,5$ Вт/(м·К), $\lambda_3 = 401$ Вт/(м·К), $\lambda_{вг} = 0,133$ Вт/(м·К); $\rho_1 = 1350$ кг/м³, $\rho_2 = 7700$ кг/м³, $\rho_3 = 8890$ кг/м³; $c_1 = 1200$ Дж/(кг·К), $c_2 = 124$ Дж/(кг·К), $c_3 = 380$ Дж/(кг·К); $a_1 = 9,8 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $a_2 = 1,57 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a_3 = 11,87 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $T_{ср} = 293$ К, $\alpha_{ср} = 10$ Вт/(м²·К), $\alpha_{60} = 10$ Вт/(м²·К), $R_{ТЭМ} = 0,64$ Ом.

Модель ТЭС с конечно-элементной сеткой и соответствующими размерами представлена на рис.2. Размеры указаны в миллиметрах.

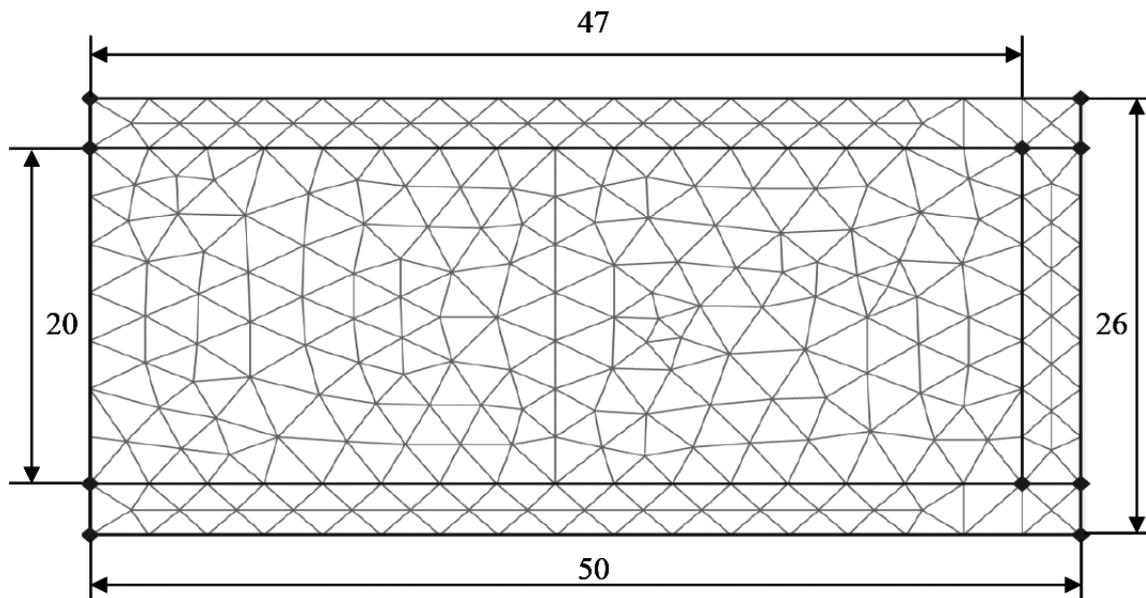


Рис.2. Структура ТЭС для извлечения ИО из тела человека с конечноэлементной сеткой
Fig. 2. The structure of a thermal power plant for extracting IO from a human body with a finite element mesh

Результаты расчетов изображены на рис.3-7. На рис.3 показано двумерное температурное поле ТЭС при ее введении в тело человека на глубину 50 мм при холодопроизводительности ТЭМ 7000 Вт/м^2 для условия выхода прибора на режим.

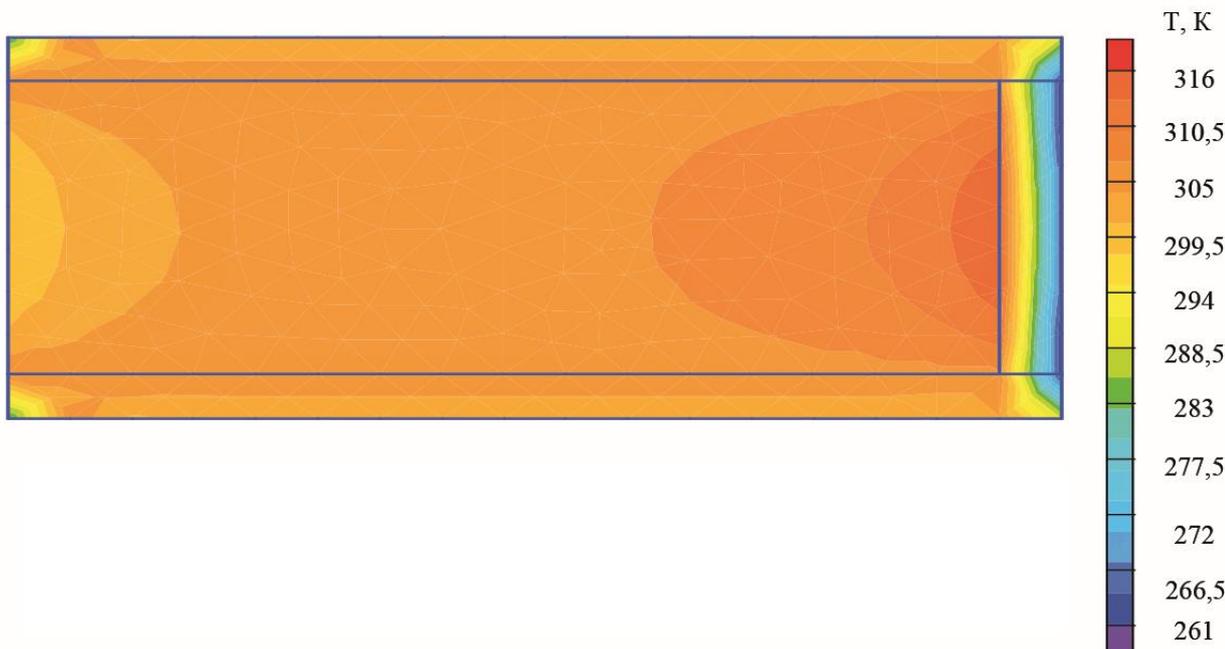


Рис.3. Двумерное температурное поле ТЭС при ее введении в тело человека
Fig. 3. Two-dimensional temperature field of TPP when it is introduced into the human body

Согласно представленным данным распределение температуры по ТЭС достаточно неоднородно. Со стороны холодных спаев ТЭМ температура существенно меньше, чем в остальных точках, а со стороны горячих – выше, что объясняется поглощением и выделением теплоты Пельтье. При этом температура по зонду изменяется относительно незначительно, что связано с высокой теплопроводностью материала, из которого он изготовлен (латуни). Более информативными являются одномерные зависимости, рассмотренные на рис.4-5, также полученные для стационарного режима работы системы.

На рис.4 приведены графики изменения температуры ТЭС в поперечном направлении (вдоль оси y) в непосредственной близости от холодных спаев ТЭМ при различных величинах его холодопроизводительности. Согласно полученным данным с увеличением теплового потока на холодных спаев ТЭМ температура на соответствующей поверхности снижается. Так при величине $q_{x,ТЭМ}=7000$ Вт/м² данная температура составляет чуть более 263 К и увеличивается примерно на 2,5 К при уменьшении $q_{x,ТЭМ}$ на 500 Вт/м². Анализируя распределение температуры по оси y необходимо отметить, что ее значение по поверхности ТЭМ практически не меняется. Это позволяет в дальнейшем рассмотреть задачу о промерзании влажной губки только в одной координате, по ее толщине, существенно упростив расчет теплообмена, связанного с фазовым переходом вещества. Другой важной информацией, которую позволяет получить рис.4, является то, что применение ТЭС при данных холодопроизводительностях ТЭМ не ведет к переохлаждению близлежащих зон человеческого организма.

В зазорах между стенкой трубки ТЭС и ТЭМ (3 мм) температура меняется достаточно быстро и уже на расстоянии 1,5 мм от края модуля становится равной 277 К, что, учитывая кратковременность проведения процедуры по извлечению ИО, практически не влияет негативным образом на состояние тканей.

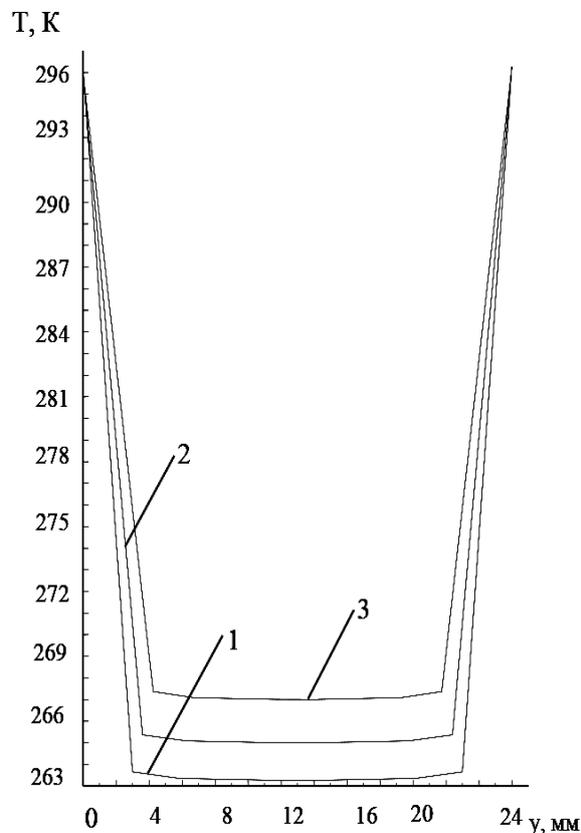


Рис.4. Изменение температуры ТЭС вдоль оси y в непосредственной близости от холодных спаев ТЭМ при различных величинах $q_{x,ТЭМ}$ 1- $q_{x,ТЭМ}=7000$ Вт/м², 2- $q_{x,ТЭМ}=6500$ Вт/м², 3 - $q_{x,ТЭМ}=6000$ Вт/м²

Fig. 4. Change in the temperature of TPP along the y -axis in the immediate vicinity of the cold junctions of the TEM at various values of q_x . TEM 1- q_x . TEM = 7000 W / m², 2- q_x . TEM = 6500 W / m², 3 - q_x . TEM = 6000 W / m²

На рис.5 изображено распределение температуры ТЭС в поперечном направлении (вдоль оси y) в непосредственной близости от горячих спаев ТЭМ (кривая 1) и вдоль центральной оси прибора при $y=25$ мм (кривая 2) для $q_{x,ТЭМ}=7000$ Вт/м².

Представленные результаты расчета показывают, что максимальная температура наблюдается в центральной части горячих спаев ТЭМ и составляет примерно 319,5 К, снижаясь до 312 К у стенки трубки ТЭС. При этом максимальная температура посередине прибора составляет 315,7 К, также уменьшаясь к стенке трубки ТЭС до 312 К.

Данное обстоятельство позволяет говорить, что для условий эксплуатации системы температура горячих спаев ТЭМ не выходит за допустимые пределы. Зонд, изготовленный из меди, в данном конструктивном исполнении в полной мере выполняет роль теплоотвода для требуемых величин холодопроизводительности модуля. Помимо этого, представленные данные показывают, что наличие перегрева зонда за счет выделяющейся на горячих спаях ТЭМ теплоты, практически не сказывается на температуре тканей биологического объекта. В зоне их контакта со стенкой трубки ТЭС температура составляет 312 К, что немного превышает температуру человеческого тела, т.е. риск ожога при использовании разработанной системы на практике также отсутствует. Таким образом, стенка трубки ТЭС и воздушный зазор исполняют роль надежной тепловой изоляции.

График, изображенный на рис.6, показывает распределение температуры вдоль центральной продольной оси прибора при $q_{x,ТЭМ}=7000 \text{ Вт/м}^2$. Согласно рис.6, в зонде температура плавно увеличивается от 300 К в зоне его контакта с окружающей средой до 319,5 К в области сопряжения с горячими спаями ТЭМ. Далее наблюдается резкое снижение температуры до 263 К за счет поглощаемой теплоты Пельтье.

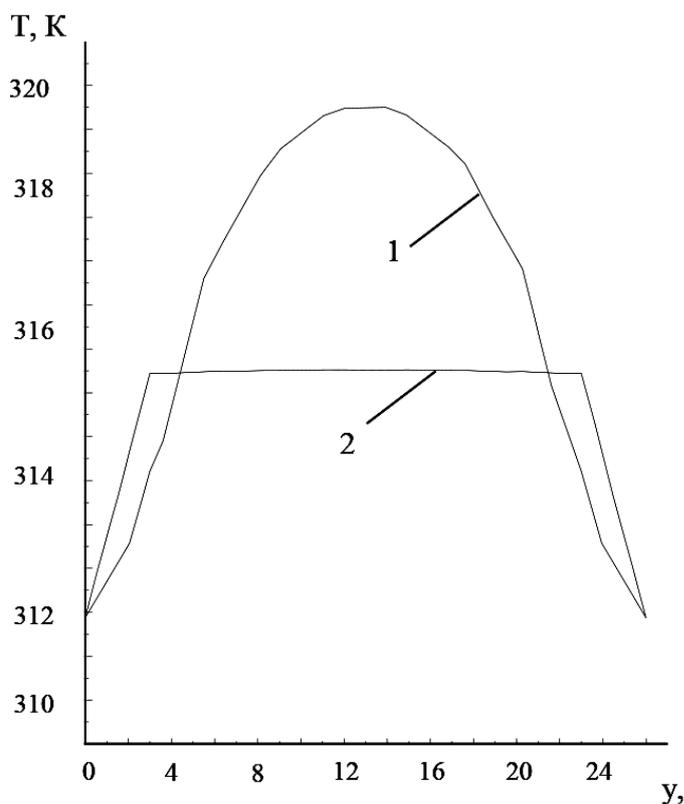


Рис.5. Изменение температуры ТЭС вдоль оси y в непосредственной близости от горячих спаев ТЭМ (1) и вдоль центральной поперечной оси прибора (2) при $q_{x,ТЭМ}=7000 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 5. Change in the temperature of the TPP along the y -axis in the immediate vicinity of the hot junctions of the TEM (1) and along the central transverse axis of the device (2) at $q_{x, TEM} = 7000 \text{ W / m}^2$

При увеличении и уменьшении мощности ТЭМ данный график смещается вверх и вниз, практически не изменяя свою форму. При этом, как и в случае рис.4 изменение $q_{x,ТЭМ}$ на 500 Вт/м^2 изменяет значение температуры примерно на 2,5 К.

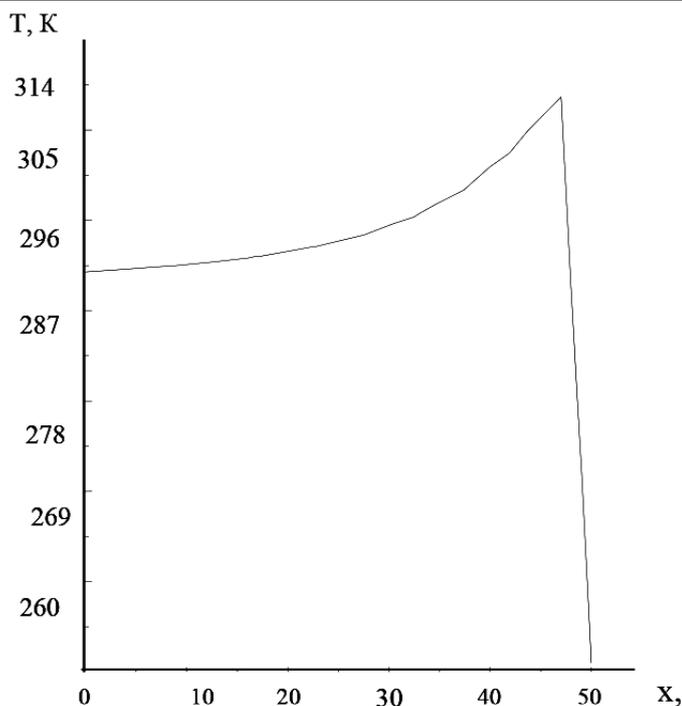


Рис.6. Изменение температуры ТЭС вдоль центральной продольной оси прибора при $q_{x.TEM}=7000 \text{ Вт/м}^2$
Fig. 6. Temperature change of TPP along the central longitudinal axis of the device at $q_{x.TEM} = 7000 \text{ W / m}^2$

Для анализа динамических характеристик ТЭС исследовано изменение температуры ее различных точек до выхода на стационарный режим. Полученные результаты представлены на рис.7.

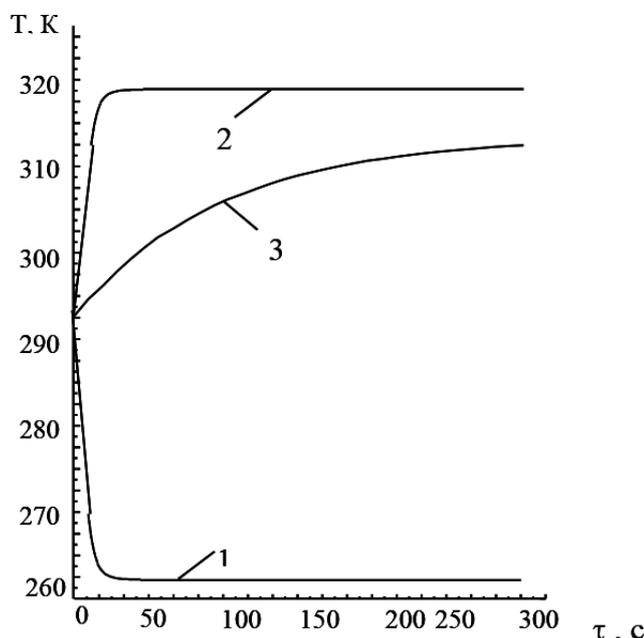


Рис.7. Изменение температуры в различных точках ТЭС: 1 - холодные спаи ТЭМ, 2 - горячие спаи ТЭМ, 3 - зонд
Fig. 7. Temperature change at different points of the TPP 1 - TEM cold junctions, 2 - TEM hot junctions, 3 - probe

По расчетным данным продолжительность выхода системы на установившийся режим невелика. Так, время, необходимое для термостабилизации спаев ТЭМ составляет 25 с, что связано с малыми габаритными размерами модуля и малой инерционностью эффекта Пельтье. Длительность же выхода на режим зонда ввиду его относительно больших размеров (относительно ТЭМ) находится в пределах 6-7 мин. В данной ситуации эффективным будет являться включение прибора до проведения процедур с целью вывода его на рабочий режим.

Вывод. Установлено, что эффективным методом оказания первой медицинской помощи, связанной с извлечением ИО из тела человека является использование методики фиксации его к зонду путем примораживания с использованием в качестве исполнительного элемента ТЭМ. Разработана модель ТЭУ для его реализации, основанная на решении задачи теплопроводности с учетом теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, ТЭМ. В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий. Определено, что в устройстве может быть использован стандартный ТЭМ холодопроизводительностью от 4500 Вт/м² до 7000 Вт/м² при продолжительности выхода на режим системы 6-7 мин. Указано, что подбор параметров ТЭМ должен ориентироваться на ограничения по эксплуатации прибора, а также медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилежащих тканей, что в предложенной конструкции обеспечивается в полной мере.

Библиографический список:

1. Блоцкий, А.А. Травмы и инородные тела ЛОР-органов / А.А. Блоцкий, С.А. Карпищенко, В.В. Антипенко, Р.А. Блоцкий. - СПб.: Диалог, 2018. 217 с.
2. Блоцкий, А.А. Неотложные состояния в оториноларингологии / А.А. Блоцкий, С.А. Карпищенко. - СПб.: Диалог, 2016. 203 с.
3. Юнусов, А.С. Эпидемиология инородных тел полости носа в условиях крупного мегаполиса / А.С. Юнусов, [и др.] // Российская оториноларингология. 2017. № 5. С. 83-87.
4. Войновский, А.Е. Диагностика и лечение при инородных телах желудочно-кишечного тракта / А.Е. Войновский, Г.В. Азаров, Т.Г. Коляденкова // Хирургия. 2012. №8. С. 51-54.
5. Загайнов, В.Е. Инородное тело брюшной полости, вызвавшее пролежень стенки желудка и двенадцатиперстной кишки. В.Е. Загайнов, Г.А. Евстигнеева, П.И. Рыхтик, [и др.] // Хирургия. 2011. №9. С. 78-80.
6. Корнеев, А.В. Первая медицинская помощь / А.В. Корнеев. Донецк: БАО, 2013. 240 с.
7. Cavazos M. A new positive-pressure device for nasal foreign body removal / M. Cavazos [et al.] // Pediatric emergency care. 2014. №2. pp. 94-96.
8. Антонова, Е.В. Случай длительного нахождения инородных магнитных тел в желудке / Е.В. Антонова, В.В. Холостова, Р.В. Халафов // Детская хирургия. 2013. №2. С. 52-53.
9. Kalyanasundaram, R. An unusual foreign body in the nasal cavity / R. Kalyanasundaram [et al.] // International journal of otolaryngology and head & neck surgery. 2014. No.3. pp. 267-270.
10. Хрыщанович, В.Я. Инородные тела пищеварительного тракта: хирургические аспекты диагностики и лечения / В.Я. Хрыщанович, И.М. Ладутько, Я.В. Прохорова // Медицинский журнал. 2009. №1. С. 9-14.
11. Яромич, И.В. Скорая и неотложная медицинская помощь / И.В. Яромич. Минск: Вышэйшая школа. 2010. 289 с.
12. Глыбочко, П.В. Первая медицинская помощь / П.В. Глыбочко, В.Н. Николаенко, [и др.]. М.: Академия, 2013. 305 с.
13. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015. 441 p.
14. Bouzigon, R. Whole- and partial-body cryostimulation / cryotherapy: current technologies and practical applications / R. Bouzigon, F. Grappe, G. Ravier, B. Dugue // Journal of Thermal Biology. 2016. No.61. pp. 67-87.
15. Цыганов, Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты / Д.И. Цыганов. М.: Сайнс-пресс, 2011. 304 с.
16. Евдулов О.В., Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, С.Г. Магомедова, И.Ш. Миспахов, Н.А. Набиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т.46, №1. С. 32-41.
17. Евдулов О.В. Экспериментальное исследование термоэлектрического устройства для внутрисполостной гипотермии / О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова, К.А. Магомедова // Холодильная техника. 2019. №4. С.31-35.
18. Александров, А.А., Теплотехника. / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 880 с.
19. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011. 1076 p.
20. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. СПб.: СПбНИИУИТМО, 2012. 195 с.

References:

1. Blotskiy, A.A. Travmy i inorodnyye tela LOR-organov / A.A. Blotskiy, S.A. Karpishchenko, V.V. Antipenko, R.A. Blotskiy. - SPb.: Dialog, 2018. 217 s. [Blotskiy, A.A. Injuries and foreign bodies of ENT organs / A.A. Blotskiy, S.A. Karpishchenko, V.V. Antipenko, R.A. Blotskiy. SPb.: Dialogue, 2018. 217 p. (In Russ)]
2. Blotskiy, A.A. Neotlozhnyye sostoyaniya v otorinolaringologii / A.A. Blotskiy, S.A. Karpishchenko. SPb.: Dialog, 2016. 203 s. [Blotskiy, A.A. Emergencies in otorhinolaryngology / A.A. Blotskiy, S.A. Karpishchenko. SPb.: Dialogue, 2016. 203 p. (In Russ)]
3. Yunusov, A.S. Epidemiologiya inorodnykh tel polosti nosa v usloviyakh krupnogo megapolisa / A.S. Yunusov, [i dr.] // Rossiyskaya otorinolaringologiya. 2017. № 5. - S. 83-87. [Yunusov, A.S. Epidemiology of foreign bodies in the nasal cavity in a large metropolis / A.S. Yunusov, [et al.] // Russian otorhinolaryngology. 2017. No. 5. pp. 83-87. (In Russ)]
4. Voynovskiy, A.Ye. Diagnostika i lecheniye pri inorodnykh telakh zheludochno-kishechnogo trakta / A.Ye. Voynovskiy, G.V. Azarov, T.G. Kolyadenkova // Khirurgiya. 2012. №8. S. 51-54. [Voinovsky, A.E. Diagnostics and treatment of foreign bodies of the gastrointestinal tract / A.E. Voinovsky, G.V. Azarov, T.G. Kolyadenkova // Surgery. 2012. No. 8. pp. 51-54. (In Russ)]

5. Zagaynov, V.Ye. Inorodnoye telo bryushnoy polosti, vyzvavsheye prolezhn' stenki zheludka i dvenadtsatiperstnoy kishki / V.Ye. Zagaynov, G.A. Yevstigneyeva, P.I. Rykhtik, [i dr.] // *Khirurgiya*. 2011. №9. S. 78-80. [Zagaynov, V.E. Foreign body of the abdominal cavity that caused a pressure ulcer of the stomach wall and duodenum / V.E. Zagaynov, G.A. Evstigneyeva, P.I. Rykhtik, [and others] // *Surgery*. 2011. No. 9. pp. 78-80. (In Russ)]
6. Korneyev, A.V. Pervaya meditsinskaya pomoshch' / A.V. Korneyev. Donetsk: BAO, 2013. 240 s. [Korneyev, A.V. First aid / A.V. Korneyev. Donetsk: BAO, 2013. 240 p. (In Russ)]
7. Cavazos, M. A new positive-pressure device for nasal foreign body removal / M. Cavazos [et al.] // *Pediatric emergency care*. - 2014. No. 2. pp. 94-96.
8. Antonova, Ye.V. Sluchay dlitel'nogo nakhozheniya inorodnykh magnitnykh tel v zheludke / Ye.V. Antonova, V.V. Kholostova, R.V. Khalafov // *Detskaya khirurgiya*. 2013. №2. S. 52-53. [Antonova, E.V. A case of long-term presence of foreign magnetic bodies in the stomach / E.V. Antonova, V.V. Kholostova, R.V. Khalafov // *Pediatric surgery*. 2013. No. 2. pp. 52-53. (In Russ)]
9. Kalyanasundaram, R. An unusual foreign body in the nasal cavity / R. Kalyanasundaram [et al.] // *International journal of otolaryngology and head & neck surgery*. 2014. No. 3. pp. 267-270.
10. Khryshchanovich, V.YA. Inorodnyye tela pishchevaritel'nogo trakta: khirurgicheskiye aspekty diagnostiki i lecheniya / V.YA. Khryshchanovich, I.M. Ladut'ko, YA.V. Prokhorova // *Meditsinskiy zhurnal*. 2009. №1. S. 9-14. [Khryshchanovich, V.Ya. Foreign bodies of the digestive tract: surgical aspects of diagnosis and treatment / V.Ya. Khryshchanovich, I.M. Ladutko, Ya. V. Prokhorov // *Medical Journal*. 2009. No. 1. pp. 9-14. (In Russ)]
11. Yaromich, I. V. Ambulance and emergency medical care / I.V. Yaromich. Minsk: Higher school. 2010. 289 p.
12. Glybochko, P.V. Pervaya meditsinskaya pomoshch' / P.V. Glybochko, V.N. Nikolayenko, [i dr.]. M.: Akademiya, 2013. 305 s. [Glybochko, P.V. First aid / P.V. Glybochko, V.N. Nikolaenko, [and others]. M.: Academy, 2013. 305 p. (In Russ)]
13. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015. 441 p. (In Russ)]
14. Bouzigon, R. Whole- and partial-body cryostimulation / cryotherapy: current technologies and practical applications / R. Bouzigon, F. Grappe, G. Ravier, B. Dugue // *Journal of Thermal Biology*. 2016. No. 61. pp. 67-87.
15. Tsyganov, D.I. Kriomeditsina: protsessy i apparaty / D.I. Tsyganov. M.: Sayns-press, 2011. 304 s. [Tsyganov, D.I. Cryomedicine: processes and devices / D.I. Tsyganov. M.: Sains-press, 2011. 304 p.
16. Yevdulov, O.V., Termoelektricheskaya sistema dlya izvlecheniya inorodnykh ob'yektov iz tela cheloveka / O.V. Yevdulov, A.M. Nasrulaev, S.G. Magomedova, I.SH. Mispakhov, N.A. Nabiyev // *Vestnik DGTU. Tekhnicheskiye nauki*. 2019. T.46, №1. S. 32-41. [Evdulov, O.V., Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body / O.V. Yevdulov, A.M. Nasrulaev, S.G. Magomedova, I. Sh. Mispakhov, N.A. Nabiev // *Bulletin of DSTU. Technical science*. 2019. Vol. 46, No. 1. pp. 32-41. (In Russ)]
17. Yevdulov, O.V. Eksperimental'noye issledovaniye termoelektricheskogo ustroystva dlya vnutripolostnoy gipotermii / O.V. Yevdulov, N.A. Nabiyev, S.G. Magomedova, K.A. Magomedova // *Kholodil'naya tekhnika*. 2019. №4. S.31-35. [Evdulov, O.V. Experimental study of a thermoelectric device for intracavitary hypothermia / O.V. Yevdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedov, K.A. Magomedova // *Refrigeration equipment*. 2019. No. 4. pp. 31-35. (In Russ)]
18. Aleksandrov, A.A., Teplotekhnika. / A.A. Aleksandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [i dr.]. - M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017. - 880 s. [Alexandrov, A.A., Heat engineering. / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [and others]. - M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 880 p. (In Russ)]
19. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011. 1076 p.
20. Dul'nev, G.N. Teoriya teplo- i massoobmena / G.N. Dul'nev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 s. [Dulnev, G.N. Theory of heat and mass transfer / G.N. Dulnev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович. доктор технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru.

Насрулаев Абдула Магомедович, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: nasrulaevam@yandex.ru.

Information about the authors:

Oleg V. Yevdulov, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru.

Abdula M. Nasrulaev, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering e-mail: nasrulaevam@yandex.ru.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.10.2020.

Принята в печать 11.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.10.2020.

Accepted for publication 11.11.2020.

Для цитирования А.Ю. Ефимов, М.Н. Сарайкин, В.А. Ефимов, Е.В. Трошкин. Система охлаждения поршневого компрессора с импульсным потоком теплоносителя с последующим использованием тепла в системе горячего водоснабжения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47(4):37-48. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-37-48

For citation: A.Yu. Efimov, M. N. Saraikin, V.A. Efimov, E.V. Troshkin. Piston compressor cooling system with a pulsed flow of coolant with subsequent use of heat in the hot water supply system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):37-48.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-37-48

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-37-48

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА С ИМПУЛЬСНЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛА В СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

А. Ю. Ефимов, М.Н. Сарайкин, В.А. Ефимов, Е.В. Трошкин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва,

430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68, Россия

Резюме. Цель. Большинство известных компрессоров используют механический привод от электродвигателя для достижения своей цели – перекачки необходимого потребителю количества сжатого воздуха. Во время работы любого компрессора прямого вытеснения выделяется большое количество тепла, которое вырабатывается как за счет трения движущихся частей блока, так и при сжатии воздуха. **Метод.** Предложена система охлаждения поршневого компрессора с импульсным потоком теплоносителя с последующим использованием тепла в системе ГВС при помощи пластинчатого теплообменника, зарекомендовавшего себя своей компактностью и эффективностью. **Результат.** С целью более глубокого отбора тепла в качестве типа движения нагреваемой линии был предложен импульсный поток, организованный при помощи ударного узла. **Вывод.** В качестве оценки системы было проведено сравнение с аналогичной системой со стационарным потоком, как по техническим параметрам (температура рубашки компрессора $t_{руб.}$; температура воздуха в ресивере $t_{возд.}$; средняя тепловая мощность $N^{cp.}$; коэффициент теплопередачи K ; объем воздуха, перекачиваемый за 1 цикл $V_{возд.}$) так и по экономическим параметрам (время окупаемости установки по сравнению с аналогичной установкой со стационарным потоком $T_{ок.}$).

Ключевые слова: охлаждение; температура; тепловая мощность, теплопередача; производительность

PISTON COMPRESSOR COOLING SYSTEM WITH A PULSED FLOW OF COOLANT WITH SUBSEQUENT USE OF HEAT IN THE HOT WATER SUPPLY SYSTEM

A. Yu. Efimov, M. N. Saraikin, V. A. Efimov, E. V. Troshkin

National Research Ogarev Mordovia State University,
68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia

Abstract. Objective. Most well-known compressors use a mechanical drive from an electric motor to achieve their goal – pumping the amount of compressed air required by the consumer. During the operation of any positive displacement compressor, a large amount of heat is released, which is generated both by the friction of the moving parts of the unit and by air compression. **Methods.** The article proposes a cooling system for a piston compressor with a pulsed flow of heat carrier followed by the use of heat in the domestic hot water system using a plate heat exchanger, which has proven to

be compact and efficient. **Results.** For deeper heat extraction, a pulse flow organized using a shock node was proposed as the type of movement of the heated line. **Conclusion.** As an evaluation of the system, a comparison was made with a similar system with a stationary flow both in terms of technical parameters (compressor jacket temperature t_{jack} ; air temperature in the receiver t_{air} ; average heat output N^{av} ; heat transfer ratio K ; air volume pumped per 1 cycle V_{air} .) and economic parameters (payback time of the installation in comparison with a similar installation with a stationary flow T_{pay}).

Keywords: cooling; temperature; heat output, heat transfer; efficiency

Введение. Охлаждение – один из важных аспектов работы компрессора. Оно влияет как на срок службы агрегата, так и на производительность. По этой причине важную роль в данном процессе играет охладитель [1,2]. В большинстве случаев в роли теплового агента, отбирающего тепло, выступает окружающий воздух [3]. К сожалению, данный вариант неэффективен и неэкономичен по причинам неиспользования отводящего тепла и постепенного нагревания самого охладителя. Однако при выборе воды в качестве охладителя открывается возможность передачи тепла исходной воде для системы ГВС при помощи пластинчатого теплообменника, что исключает оба недостатка воздушного охлаждения [4].

Постановка задачи. Цель данной статьи – разработать систему охлаждения поршневого компрессора с импульсным потоком теплоносителя и последующим отбором тепла для системы ГВС [5]. В ходе разработки предстаёт выбор между двумя типами потока системы ГВС: импульсный или стационарный.

Первый подразумевает подачу воды небольшими порциями с определенной периодичностью [6]. Это позволяет добиться высокого коэффициента теплопередачи, а также небольшого расхода воды. Недостатком данной организации потока является необходимость установки ударного узла [7,8]. Стационарный режим – это организация воды ламинарным потоком. Из достоинств – система не требует дополнительных устройств. Недостаток – параметры теплообмена хуже, чем в импульсном потоке.

Для решения данной дилеммы разработана установка, позволяющая провести процесс охлаждения, как в импульсным, так и в стационарном режимах с целью их дальнейшего технического и экономического сравнения.

Методы исследования. Схема охлаждения поршневого компрессорной станции с пластинчатым теплообменником и ударным узлом представлена на рис. 1.

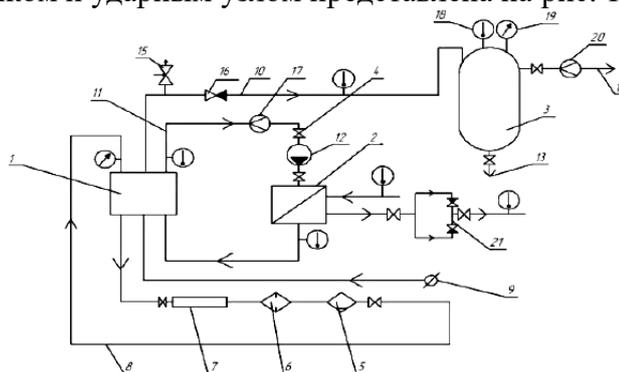


Рис. 1. Схема охлаждения поршневого компрессорной станции с пластинчатым теплообменником и ударным узлом

Fig.1. The cooling system of a reciprocating compressor station with plate heat exchanger and the shock node

Условные обозначения рис. 1: 1 Компрессор ЗИЛ-130 2-цилиндровый; 2 Пластинчатый теплообменник; 3 Ресивер; 4 Вентиль; 5–Масловодоотделитель; 6 Фильтр; 7 Масленный картер; 8 Масленный трубопровод; 9 Всасывающий трубопровод; 10 Система сжатого воздуха; 11 Система охлаждения; 12 Циркуляционный насос; 13 Слив конденсата; 14 Магистраль подачи сжатого воздуха; 15 Пусковой, разгрузочный клапан; 16 Обратный клапан; 17 Водомер; 18 Датчик температуры; 19 Датчик давления; 20 Расходомер сжатого воздуха; 21 Ударный узел.

Legend fig. 1: 1 Compressor ZIL-130 2-cylinder; 2 Plate heat exchanger; 3 Receiver; 4 Valve; 5 Oil-water separator; 6 Filter; 7 Oil sump; 8 Oil pipeline; 9 Suction pipeline; 10 Compressed air system; 11 Cooling system; 12 Circulation pump; 13 Condensate drain; 14 Compressed air supply line; 15 starting, unloading valve; 16 Check valve; 17 Water meter; 18 Temperature sensor; 19 Pressure sensor; 20 Compressed air flow meter; 21 Impact node.

Поршневая компрессорная станция работает следующим образом. При работе компрессора 1 атмосферный воздух поступает через всасывающий трубопровод 9. Пусковой разгрузочный клапан 15 и обратный клапан 16 предназначены для облегчения запуска поршневого компрессора. Из компрессора 1 сжатый воздух передаётся по трубопроводу сжатого воздуха 10 в ресивер 3. Далее сжатый воздух по магистрали подачи сжатого воздуха 14 подаётся потребителю. В ресивере стоит датчик давления и датчик температуры. Они служат для мониторинга свойств сжатого воздуха. Для выхода конденсата в ресивере предусмотрен трубопровод 13.

При работе компрессора 1 выделяется большое количество тепла при возвратно-поступательном движении поршня. Если данное тепло не отводить от компрессорной установки, то будет происходить его перегрев, и будет снижаться его производительность. Для охлаждения компрессора применяется пластинчатый теплообменник 2, в котором жидкость из компрессора по трубопроводу системы охлаждения 11 проходит через теплообменник, где охлаждается, затем возвращается в компрессор для отбора ещё одной порции тепла.

Это предоставляет возможность использовать отведённое тепло для нагрева воды для технологических нужд предприятия, тем самым экономить энергию на нагрев воды. Циркуляция жидкости в системе охлаждения происходит за счёт циркуляционного насоса 4. Замеры температуры при выходе жидкости из компрессора и при выходе жидкости из теплообменника происходит датчиком температуры.

При работе компрессорной установки необходима система смазки трущихся деталей. Циркуляция смазки происходит по масленому трубопроводу 8. При циркуляции масло проходя через компрессор, в этот период масло забирает на себя влагу, в его составе появляются механические примеси и для этого предусмотрены фильтр 6, масловодоотделитель 5 и масляный картер 7.

На рис. 1 жидкость, забирающая тепло у компрессора, охлаждалась посредством исходной воды системы ГВС.

Снаружи аппарат теплоизолирован. В расчете далее условно принято, что теплоизоляция обеспечивает абсолютное отсутствие теплообмена между наружной пластиной и окружающей средой.

Запуск установки в импульсном и стационарном режимах и обработка результатов. Перед пуском установки перекрывается кран подогрева исходной воды системы ГВС для более быстрого выхода компрессора на рабочую нагрузку. Далее запускается компрессорная установка (КУ). Через 28 минут открывается кран подогрева исходной воды системы ГВС и начинается охлаждение КУ. Данные снимаются каждые 2 минуты с 28-й минуты включительно. Установка работает ещё 8 минут.

Отличия принципа работы установки в импульсном режиме [9] от принципа работы в стационарном режиме заключается в том, что в первом случае включен ударный узел 21, создающий турбулентный поток жидкости.

Обсуждение результатов. Результаты работы [10] занесены в табл. 1 и показаны на рис. 2-3.

Снижение расхода исходной воды системы ГВС $G^{нагр.}$ при переходе со стационарного режима на импульсный, %

$$\Delta_{G_{ср.}^{нагр.}} = \frac{G_{ср.имп.}^{нагр.} - G_{ср.стац.}^{нагр.}}{G_{ср.стац.}^{нагр.}} \cdot 100\%$$

где $G_{ср.имп.}^{нагр.}$ – средний расход воды в нагреваемом контуре в импульсном режиме, кг/с
($G_{ср.имп.}^{нагр.} = 0,147 \text{ кг/с}$);

$G_{ср.стац.}^{нагр.}$ – средний расход воды в нагреваемом контуре в стационарном режиме, кг/с ($G_{ср.стац.}^{нагр.} = 0,199 \text{ кг/с}$);

$$\Delta_{G_{cp.}^{нагр.}} = \frac{0,147 - 0,199}{0,199} \cdot 100\% = 26,1\%$$

Таблица 1. Результаты работы
Table 1. The results

Время эксперимента, мин The time of experiment, min	Температура греющего теплоносителя Temperature of the heating medium		Температура нагреваемого теплоносителя Temperature of the heated coolant		Расход теплоносителя Coolant flow		Показатели воздуха после компрессора Indicators of the air after the compressor		Температура рубашки компрессора $t_{руб.}$, °C The temperature of the shirt of the compressor $t_{руб.}$, °C
	на входе $t_{вх.}^{зр.}$, °C	на выходе $t_{вых.}^{зр.}$, °C	на входе $t_{вх.}^{нагр.}$, °C	на выходе $t_{вых.}^{нагр.}$, °C	греющего $G^{зр.}$, кг/с	нагреваемого $G^{нагр.}$, кг/с	Температура $t_{возд.}$, °C	Влажность $\varphi_{возд.}$, %	
Стационарный поток Stationary flow									
28	12,94	9,5	9	10,13	0,0689	0,1947	48,2	16	63
30	12,94	9,44	9	10,15	0,0645	0,1999	44,1	15	58,5
32	12,94	9,25	9	10,16	0,0636	0,2	40,5	13	54,5
34	12,88	9,5	9	10,14	0,0699	0,2002	39,1	12	52
36	12,81	9,44	9	10,13	0,0666	0,2001	37,3	11	50
В среднем On average	-	-	-	-	-	0,199	-	-	-
Импульсный поток Impulse flow									
28	21,36	9,75	9	14,7	0,0633	0,1416	48,2	18	63
30	21,14	9,75	9	14,04	0,0583	0,1466	41,9	15	56
32	21,64	9,5	9	14,54	0,0616	0,15	39,5	13	53
34	21,39	9,31	9	14,39	0,0583	0,15	37,3	13	50
36	21,26	9,13	9	14,39	0,0583	0,1466	35,4	16	47
В среднем On average	-	-	-	-	-	0,147	-	-	-

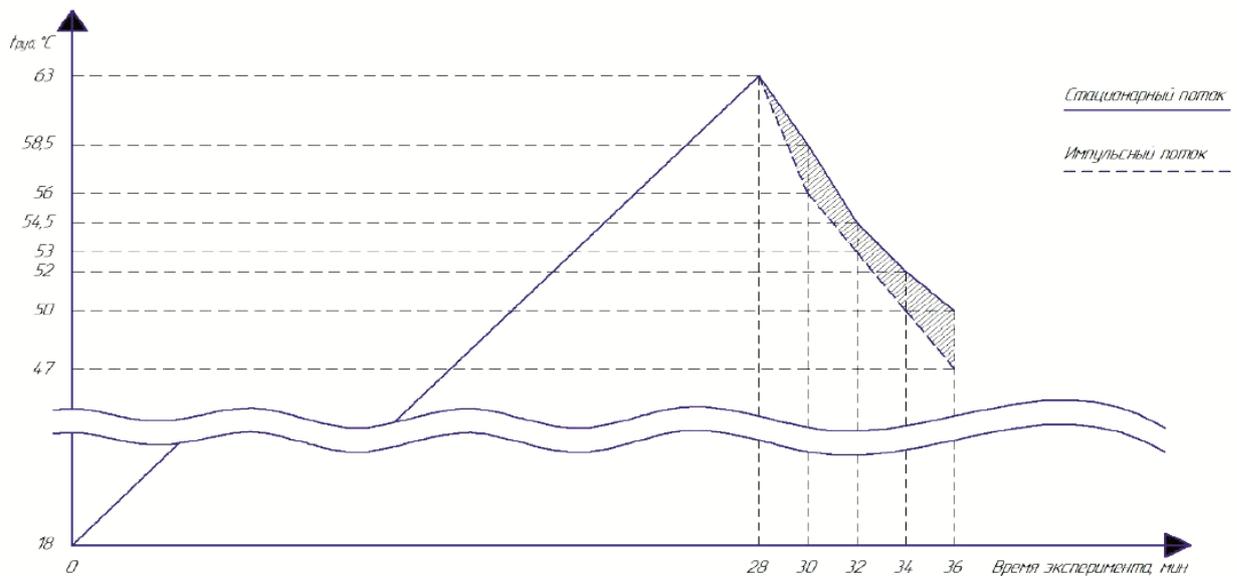


Рис.2. Температура рубашки компрессора
Fig.2. The temperature of the shirt of the compressor

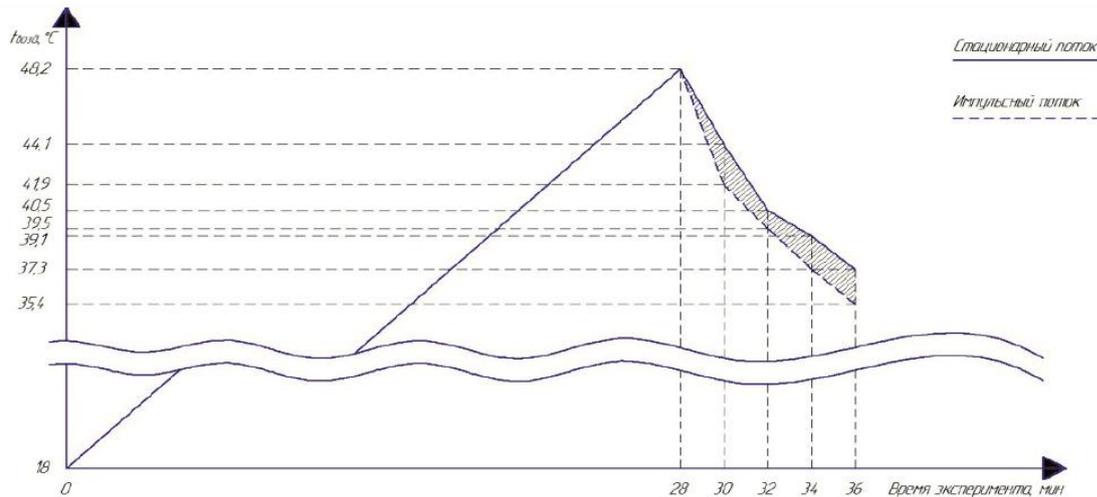


Рис.3. Температура воздуха в ресивере
 Fig.3. The temperature of the air in the receiver

В результате мы видим, что температура рубашки снижается интенсивнее в системе в импульсном режиме, нежели в стационарном режиме. Также зафиксировано снижение расхода исходной воды системы ГВС $\Delta G_{ср.нагр.}$ на 26,1% при переходе со стационарного режима на импульсный, что положительно сказывается на гидравлических показателях системы [11].

Оценим изменение теплового потока. Направление движения потоков – противоток.

$$\text{Удельная теплоёмкость воды } c = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Диаметр греющего трубопровода (наружный $d_{нар}^{гп} = 0,02\text{ м}$; внутренний $d_{вн}^{гп} = 0,0175\text{ м}$).

Диаметр нагреваемого трубопровода (наружный $d_{нар}^{нагр} = 0,089\text{ м}$; внутренний $d_{вн}^{нагр} = 0,0865\text{ м}$).

$$\text{Коэффициент теплопроводности стенки трубы } \lambda_{ст.} = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Отданная тепловая мощность линией охладителя, Вт

$$N_1 = G^{гп} \cdot c \cdot (t_{вх.}^{гп} - t_{вых.}^{гп})$$

где $t_{вх.}^{гп}$ – температура воды на входе для греющей среды, °C;

$t_{вых.}^{гп}$ – температура воды на выходе для греющей среды, °C;

$G^{гп}$ – расход воды для греющей среды, кг/с;

c – теплоёмкость воды, Дж/кг К.

$$N_1 = 0,0689 \cdot 4190 \cdot (12,94 - 9,5) = 993,097 \text{ Вт}$$

Передаваемая тепловая мощность исходной воде системы ГВС, Вт

$$N_2 = G^{нагр.} \cdot c \cdot (t_{вых.}^{нагр.} - t_{вх.}^{нагр.})$$

где $t_{вых.}^{нагр.}$ – температура воды на выходе для нагреваемой среды, °C;

$t_{вх.}^{нагр.}$ – температура воды на входе для нагреваемой среды, °C;

$G^{нагр.}$ – расход воды для нагреваемой среды, кг/с;

$$N_2 = 0,1947 \cdot 4190 \cdot (10,13 - 9) = 921,8 \text{ Вт}$$

Для импульсного режима расчет аналогичный. Коэффициент теплопередачи K рассчитали по стандартной методике.

Результаты расчётов занесли в табл. 2.

Таблица 2. Результаты теплового анализа
Table 2. The results of thermal analysis

Время эксперимента, мин The time of experiment, min	Отданная тепловая мощность охладителя N_1, Bm Heat output from the cooler line N_1, W	Передаваемая тепловая мощность исходной воде для системы ГВС N_2, Bm Heat power transferred to the source water for the DHW system N_2, W	Средняя тепловая мощность N^{cp}, Bm Average heat output N^{cp}, W	Коэффициент теплопередачи $K, Bm/m^2 K$ Heat transfer coefficient $K, W/m^2 K$
Стационарный поток Stationary flow				
28	993,097	921,8461	957,472	147,6153
30	945,8925	963,2182	954,555	149,3709
32	983,326	972,08	977,703	149,6172
34	989,9378	956,2753	973,107	150,7281
36	940,412	947,4135	943,913	149,9063
В среднем On average	-	-	961,35	149,358
Импульсный поток Impulse flow				
28	3351,703	3381,866	3366,784	154,6266
30	3125,929	3096,298	3111,113	152,0688
32	3135,514	3480,95	3308,232	152,8791
34	3603,802	3386,091	3494,946	154,6663
36	3486,574	3198,541	3342,558	154,3375
В среднем On average			3324,726	153,7151

Увеличение тепловой мощности N^{cp} при переходе со стационарного режима на импульсный, %

$$\Delta_N = \frac{N_{имп.}^{cp.} - N_{стац.}^{cp.}}{N_{стац.}^{cp.}} \cdot 100\%$$

где $N_{имп.}^{cp.}$ – средняя тепловая мощность в импульсном режиме, Bm
 ($N_{имп.}^{cp.} = 3324,726 Bm$);

$N_{стац.}^{cp.}$ – средняя тепловая мощность в стационарном режиме, Bm ($N_{стац.}^{cp.} = 961,35 Bm$);

$$\Delta_N = \frac{3324,726 - 961,35}{961,35} \cdot 100\% = 245\%$$

Увеличение коэффициента теплопередачи K при переходе со стационарного режима на импульсный, %

$$\Delta_N = \frac{K_{имп.}^{cp.} - K_{стац.}^{cp.}}{K_{стац.}^{cp.}} \cdot 100\%$$

где $K_{имп.}^{cp.}$ – средний коэффициент теплопередачи в импульсном режиме, $Bm/m^2 K$
 ($K_{имп.}^{cp.} = 153,7151 Bm / m^2 \cdot K$);

$K_{стац.}^{cp.}$ – средний коэффициент теплопередачи в стационарном режиме, $Bm/m^2 K$
 ($K_{стац.}^{cp.} = 149,358 Bm / m^2 \cdot K$);

$$\Delta_N = \frac{153,7151 - 149,358}{149,358} \cdot 100\% = 2,92\%$$

В результате теплового анализа зафиксирован рост тепловой мощности в 3,45 раза, а также увеличение коэффициента теплопередачи на 2,92%, что говорит нам о том, что отбор тепла при импульсной подаче происходит более качественно, чем при стационарном потоке [12,13].

Оценим влияние снижения температуры воздуха после компрессора $t_{возд}$ и температуры рубашки $t_{руб.}$ на объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл $V_{возд}$.

Объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл (30 секунд), л

$$V_{возд} = \frac{0,25 \cdot Q_k \cdot p_1 \cdot T_{руб.}}{f_{max} \cdot (p_u - p_l) \cdot T_{возд}}$$

где Q_k – паспортная производительность компрессора, л/с ($Q_k = 3,5$ л/с);

p_1 – давление на входе в компрессор, бар ($p_1 = 1$ бар);

$(p_u - p_l)$ – заданная разность нагрузки и разгрузки компрессора, бар ($(p_u - p_l) = 2$ бар);

f_{max} – максимальная частота ($f_{max} = 1$ цикл/30 секунд);

$T_{руб.}$ – температура рубашки компрессора, К;

$T_{возд}$ – температура воздуха на выходе из компрессора, К.

$$V_{возд} = \frac{0,25 \cdot 3,5 \cdot 1 \cdot 321,2}{1/30 \cdot 2 \cdot 336} = 12,547 \text{ л}$$

Для импульсного режима расчёт аналогичный [14]. Результаты занесены в табл. 3 и показаны на рис. 4.

Увеличение объёма воздуха, нагнетаемого за 1 цикл (30 секунд) $V_{возд}$ при переходе со стационарного режима на импульсный, %

$$\Delta_{возд} = \frac{V_{имп.}^{возд} - V_{стац.}^{возд}}{V_{стац.}^{возд}} \cdot 100\%$$

где $V_{имп.}^{возд}$ – объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл в импульсном режиме работы установки, л ($V_{имп.}^{возд} = 12,649$ л);

$V_{стац.}^{возд}$ – объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл стационарном режиме работы установки, л ($V_{стац.}^{возд} = 12,609$ л);

$$\Delta_{возд} = \frac{12,649 - 12,609}{12,609} \cdot 100\% = 0,32\%$$

Таблица 3. Результаты расчёта производительности
Table 3. The results of the performance calculation

Время эксперимента, мин The time of experiment, min	Объём воздуха, перекачиваемый за 1 цикл (30 секунд), $V_{возд}$, л Volume of air pumped in 1 cycle (30 seconds), $V_{возд}$, l
Стационарный поток Stationary flow	
28	12,547
30	12,555
32	12,564
34	12,604
36	12,609
Импульсный поток Impulse flow	
28	12,547
30	12,563
32	12,581
34	12,609
36	12,649

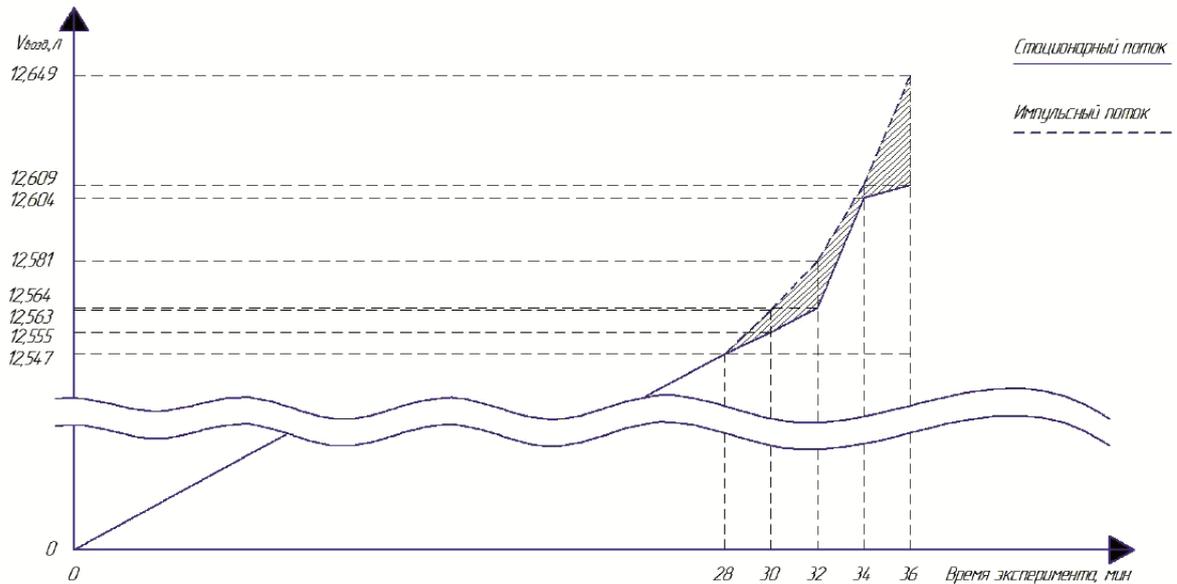


Рис.4. Объём воздуха, перекачиваемый за 1 цикл (30 секунд)
 Fig.4. Volume of air pumped in 1 cycle (30 seconds)

Итогом анализа производительности систем стало то, что при переходе со стационарного на импульсный режим происходит увеличение объёма воздуха нагнетаемого за 1 цикл на 0,32% [15,16].

Произведём оценку окупаемости системы с импульсным потоком по сравнению с аналогичной системой со стационарным потоком.

Время окупаемости системы, ч

$$T_{ок} = \frac{S}{\Theta_{ч}}$$

где S – затраты на изготовление ударного узла, руб. ($S = 1500$ руб.);

$\Theta_{ч}$ – часовой экономический эффект, руб/ч.

$$\Theta_{ч} = \Theta_{ч}^T + \Theta_{ч}^Э$$

где $\Theta_{ч}^T$ – часовой экономический эффект за счёт увеличения величины теплового потока, руб/ч.;

$$\Theta_{ч}^T = (Q_{имп.} - Q_{стац.} - Q'_{стац.}) \cdot 2,3885 \cdot 10^{-10} \cdot Cm^T$$

где Cm^T – тарифная ставка на тепловую энергию, руб./Гкал ($Cm^T = 1813,8$ руб/Гкал);

$Q_{имп.}$ – тепловая энергия, переданная нагреваемой линии за 1 час в импульсном режиме, Дж;

$$Q_{имп.} = N_{имп.}^{cp.} \cdot T$$

где $N_{имп.}^{cp.}$ – средняя тепловая мощность в импульсном режиме, Вт ($N_{имп.}^{cp.} = 3324,726$ Вт);

T – время, с ($T = 1ч = 3600$ с);

$$Q_{имп.} = 3324,726 \cdot 3600 = 11969013,6 \text{ Дж}$$

$Q_{стац.}$ – тепловая энергия, переданная нагреваемой линии за 1 час в стационарном режиме, Дж;

$$Q_{стац.} = N_{стац.}^{cp.} \cdot T$$

где $N_{\text{стац.}}^{\text{ср.}}$ – средняя тепловая мощность в импульсном режиме, Вт ($N_{\text{имп.}}^{\text{ср.}} = 961,35 \text{ Вт}$);

$$Q_{\text{стац.}} = 961,35 \cdot 3600 = 3460860 \text{ Дж}$$

$Q'_{\text{стац.}}$ – дополнительная тепловая энергия, переданная нагреваемой линии за разницу времени работы в стационарном и импульсном режимах для перекачки рабочего значения объёма воздуха в ресивере, Дж.

$$Q'_{\text{стац.}} = N_{\text{стац.}}^{\text{ср.}} \cdot \Delta T$$

где ΔT – разница времени работы в стационарном и импульсном режимах для нагнетания рабочего значения объёма воздуха в ресивере, с;

$$\Delta T = \frac{\frac{V_{\text{возд.}}^{\text{имп.}}}{T_{\text{цикл}}} \cdot T}{\frac{V_{\text{возд.}}^{\text{стац.}}}{T_{\text{цикл}}} \cdot T} - T$$

где $V_{\text{возд.}}^{\text{имп.}}$ – объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл (30 секунд) импульсном режиме работы установки, л ($V_{\text{возд.}}^{\text{имп.}} = 12,649 \text{ л}$);

$V_{\text{возд.}}^{\text{стац.}}$ – объём воздуха, нагнетаемый за 1 цикл (30 секунд) в стационарном режиме работы установки, л ($V_{\text{возд.}}^{\text{стац.}} = 12,609 \text{ л}$);

$T_{\text{цикл}}$ – время цикла, с ($T_{\text{цикл}} = 30 \text{ с}$).

$$\Delta T = \frac{\frac{12,649}{30} \cdot 3600}{\frac{12,609}{30} \cdot 3600} - 1 = 0,00317 \text{ ч} = 11,412 \text{ с}$$

$$Q'_{\text{стац.}} = 961,35 \cdot 11,412 = 10970,9 \text{ Дж}$$

$$\Theta_q^T = (11969013,6 - 3460860 - 10970,9) \cdot 2,3885 \cdot 10^{-10} \cdot 1813,8 = 3,6812 \text{ руб/ч}$$

$\Theta_q^{\text{э}}$ – часовой экономический эффект за счёт увеличения объёма нагнетаемого воздуха, руб/ч.

$$\Theta_q^{\text{э}} = \Delta T \cdot N_k \cdot C_m^{\text{э}}$$

где N_k – потребляемая электрическая мощность электродвигателем компрессора, кВт ($N_k = 2,1 \text{ кВт}$);

$C_m^{\text{э}}$ – тарифная ставка на электроэнергию, руб/кВт·ч ($C_m^{\text{э}} = 6,586 \text{ руб/кВт·ч}$);

$$\Theta_q^{\text{э}} = 0,00317 \cdot 2,1 \cdot 6,586 = 0,0438 \text{ руб/ч}$$

$$\Theta_q = 3,6812 + 0,0438 = 3,725 \text{ руб/ч}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1500}{3,725} = 402,68 \text{ ч}$$

Доля экономического эффекта за счёт увеличения величины теплового потока, %

$$\Delta_{\Theta_q^T} = \frac{\Theta_q^T}{\Theta_q} \cdot 100\%$$

$$\Delta_{\Theta_q^T} = \frac{3,6812}{3,725} \cdot 100\% = 98,82\%$$

Доля экономического эффекта за счёт увеличения нагнетаемого объёма нагнетаемого воздуха, %

$$\Delta_{\Theta_q^T} = \frac{\Theta_q^p}{\Theta_q} \cdot 100\%$$
$$\Delta_{\Theta_q^T} = \frac{0,0438}{3,725} \cdot 100\% = 1,18\%$$



Рис.5. Влияние различных типов экономии в общем экономическом эффекте
Fig.5. The effect of different types of savings in total economic impact

Подведя итог экономического анализа, можно сделать вывод о том, что система окупается за 402,68 ч. Основной вклад несёт увеличение величины теплового потока (его доля 98,82%), остаток уходит на увеличение объёма нагнетаемого воздуха (1,18%).

Вывод. В ходе оценки результатов работы установки в двух режимах было выявлено следующее:

1. Охлаждение рубашки компрессора происходит интенсивнее в импульсном режиме, нежели в стационарном. В таком случае компрессор будет меньше подвержен тепловым расширениям корпуса, т. е. будет иметь более длительный срок службы.
2. Зафиксировано снижение расхода исходной воды для системы ГВС $\Delta_{G_{ср.нагр.}}$ на 26,1% при переходе со стационарного режима на импульсный. Такое изменение снижает затраты на исходную воду, а также требуемый диаметр трубопровода, что в свою очередь уменьшает гидравлические потери и нагрузку на насос исходной воды.
3. Отмечен рост передаваемой тепловой мощности в 3,45 раза, а также увеличение коэффициента теплопередачи на 2,92% при переходе со стационарного режима на импульсный. Данная тенденция положительно сказывается на экономичности компрессора, в связи с тем, что уменьшается сброс тепла в окружающую среду.
4. При работе установки в импульсном режиме происходит увеличение объёма воздуха нагнетаемого за 1 цикл на 0,32%, что повышает как реальную производительность самой компрессорной установки, так и качество рабочего агента.
5. Установка ударного узла окупает себя за 402,68 ч, данная экономия характеризуется снижением потребления тепла и электричества, к примеру, на собственные нужды компрессорной станции.

Библиографический список:

1. Калинин Н. В. Компрессоры систем воздухообеспечения (СВС) / Н.В. Калинин, Ю.В. Яворовский, Е.В. Жигулина, М.В. Жаркова. М: Методическое пособие по курсу «Технологические энергоносители и энергосистемы промышленных предприятий», 2010. 31 с.
2. Кузнецов Ю. В. Поршневые компрессоры / Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов, А.А. Березий.–Екатеринбург: Сжатый воздух, 2012. 552 с.

3. Изобретение СССР № 315 791, 1971.10.01. Воронов Н.В. (RU), Козлов В.Я. (RU), Чипурин М.А. (RU) Поршневой компрессор с воздушным охлаждением// Изобретение СССР № 315 791. 1971.
4. Патент РФ № 2 603 498, 2016.11.27. Болштынский А.П. (RU), Щерба В.Е. (RU), Павлюченко Е.А. (RU), Кузеева Д.А. (RU), Носов Е.Ю. (RU) Поршневой компрессор с рубашечным охлаждением// Патент России № 2 603 498. 2016.
5. Анализ и оценка проблем систем горячего водоснабжения/А.Ю. Ефимов, В.А. Марков. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. 2016. С. 167-173.
6. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. 108 с
7. Овсепян В. М. Гидравлический таран и таранные установки. М.: "Машиностроение", 1998. 124 с
8. Конструктивные особенности и оценка работы оборудования для импульсной подачи теплоносителя/А.П. Левцев, Е.С. Лапин, М.В. Бикунова, В.В. Салмин. Региональная архитектура и строительство. 2018. № 4 (37). С. 151-158.
9. Импульсная циркуляция охлаждаемой среды для систем традиционного жидкостного охлаждения силовых полупроводниковых приборов /А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Ф. Кудашев, Д. Хуижди. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. 2014. С.3-10.
10. Параметрическая диагностика технического состояния поршневых компрессоров/Д.В. Кузнецов, А.Ю. Ефимов. Энергоресурсосберегающие технологии и системы в АПК. 2003. С. 17-22.
11. Анализ возможности использования тепла поршневого компрессора /А.Ю. Ефимов, А.А Попов. – Современные наукоемкие технологии. 2018. № 6. С. 77-81.
12. Параманов А. М. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / А.Ю. Параманов, А.П. Стариков. Санкт-Петербург: Системы воздухообеспечения предприятий, 2011. 151 с.
13. Пульсирующий усиленный теплообмен /Х. Цянь, С.Ф. Кудашев, В.А. Плотников. Бюллетень науки и практики. 2019 . № 8. С. 70-80.
14. О режимах работы поршневых компрессоров при изменении атмосферных температуры и давления /Р.В. Вачугов, Л.Л. Моисеев. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. № 3 (40). С. 62-66.
15. Проектирование систем воздухообеспечения и водоснабжения промышленных предприятий. Ефимов А.Ю., Ениватов А.В., Артемов И.Н. Учебное пособие / Саранск, 2014.
16. Влияние процесса внешнего охлаждения на рабочие параметры поршневого компрессора /М.В. Шамаров. Электронный научный журнал. 2017. № 2-1 (17). С. 209-216.

References:

1. Kalinin N. V. Kompresori sistem vosduhosnabzheniya (SVS) / N.V. Kalinin, Y.V. Yavorovskii, Ye.V. Zhigulina, M.V. Zharkova [The compressors of the air supply system (SVS). M: Methodological guide for the course " Technological energy carriers and power systems of industrial enterprises», 2010. 31 p. (In Russ)]
2. Kuznetsov Yu. V. Porshnevie kompressori / Yu.V. Kuznetsov, M.Yu. Kuznetsov, A.A. Berezii. [Reciprocating compressors. – Yekaterinburg: Compressed air, 2012. - 552 p. (In Russ)].
3. Izobrenenie SSSR № 315 791, 1971.10.01. Voronov N.V. (RU), Kozlov V.Ya. (RU), Chipurin M.A. (RU) Porshnevoj kompressor s vozdushnym ohlazhdeniem [SU invention No. 315 791. Air-cooled reciprocating compressor / Voronov N.V., Kozlov V.Ya., Chipurin M.A 10/01/1971. (In Russ)]
4. Patent RF № 2 603 498, 2016.11.27. Bolshtyanskiy A.P. (RU), Shcherba V.E. (RU), Pavlyuchenko E.A. (RU), Kuzeeva D.A. (RU), Nosov E.Yu. (RU) Porshnevoj kompressor s rubashechnym ohlazhdeniem [RF patent No. 2 603 498. Piston compressor with the cooling jacket / Bolshtyanskiy A.P., Shcherba V.E., Pavlyuchenko E.A., Kuzeeva D.A., Nosov E.Yu. publ. 11/27/2016. (In Russ)]
5. Analiz i ocenka problem sistem goryachego vodosnabzheniya/A.Yu. Efimov, V.A. Markov. [Analysis and assessment of problems of hot water supply systems. Energy-efficient and resource-saving technologies and systems. 2016. pp. 167-173. (In Russ)].
6. Zhukovskii N. Ye. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnich trubach[About hydraulic shock in water pipes.. – M-L.: State publishing house of technical and theoretical literature, 1949. 108 p. (In Russ)].
7. Ovsepyan Yu. V. Gidravlicheskie taran i tarannie ustanovki [The hydraulic RAM and RAM setup. – Moscow: "Mashinostroenie", 1998. 124 p. (In Russ)].
8. Konstruktivnye osobennosti i ocenka raboty oborudovaniya dlya impul'snoj podachi teplonosatelya/A.P. Levcev, E.S. Lapin, M.V. Bikunova, V.V. Salmin. [Design features and performance evaluation of equipment for pulsed coolant supply. Regional architecture and construction. 2018. No. 4 (37). pp. 151-158. (In Russ)].
9. Impul'snaya cirkulyaciya ohlazhdaemoj sredy dlya sistem tradicionnogo zhidkostnogo ohlazhdeniya silovyh poluprovodnikovyh priborov /A.P. Levcev, A.N. Makeev, S.F. Kudashev, D. Huizhdi. [Pulse circulation of the cooled medium for traditional liquid cooling systems for power semiconductor devices. – Energy-efficient and resource-saving technologies and systems. 2014. pp. 3-10. (In Russ)].
10. Parametricheskaya diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevyyh kompressorov/D.V. Kuznecov, A.Yu. Efimov. [Parametric diagnostics of the technical condition of reciprocating compressors. Energy-saving technologies and systems in agriculture. 2003. pp. 17-22. (In Russ)].

11. Analiz vozmozhnosti ispolzovaniya tepla porshnеvogo kompressorа/ A.Yu. Efimov, A.A. Popov. [Analysis of the possibility of using the heat of a reciprocating compressor. Modern high-tech technologies. 2018. no. 6. Pp. 77-81. (In Russ)].
12. Paramanov A. M. Sistemi otopleniya, ventilyacii i kondicionirovaniya vosduha/ A.Yu. Paramanov, A.P. Starikov. [Heating, ventilation and air conditioning systems. – Saint-Petersburg: Air supply systems of enterprises, 2011. 151 p. (In Russ)].
13. Pul'siruyushchij usilennyj teploobmen /H. Cyan', S.F. Kudashev, V.A. Plotnikov. [Pulsating enhanced heat transfer – Bulletin of science and practice. 2019. No. 8. pp. 70-80.].
14. O rezhimah raboty porshnevyyh kompressorov pri izmenenii atmosferynyh temperatury i davleniya /R.V. Vachugov, L.L. Moiseev. [Modes of reciprocating compressors by changes in atmospheric temperature and pressure. Bulletin of the Kuzbass state technical University. 2004. No. 3 (40). pp. 62-66. (In Russ)].
15. Proektirovanie sistem vosduhosnabzheniya i vodosnabzheniya promishlennykh predpriyatii/ Efimov A. Yu., Enivatov A. V., Artyomov I. N.. [Design of air supply and water supply systems for industrial enterprises. – Textbook / Saransk, 2014. (In Russ)].
16. Vliyaniye processа vneshnego ohlazhdeniya na rabochie parametry porshnеvogo kompressorа /M.V. Shamarov. [Influence of the external cooling process on the operating parameters of the reciprocating compressor. Electronic scientific journal. 2017. No. 2-1 (17). pp. 209-216. (In Russ)].

Сведения об авторах:

Ефимов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетических систем, e-mail: Sem314@yandex.ru

Сарайкин Михаил Николаевич, студент-магистр Института механики и энергетики, e-mail: mihail.saraikin@inbox.ru

Трошкин Егор Владимирович, студент-магистр Института механики и энергетики, e-mail: waslonter@list.ru

Ефимов Вадим Александрович, студент-бакалавр Института механики и энергетики, e-mail: sokol.off2401032@gmail.com

Information about authors:

Alexander Yu. Efimov, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Heat and Power Systems, e-mail: Sem314@yandex.ru

Mikhail N. Saraikin, Master's student of the Institute of Mechanics and Energy, e-mail: mihail.saraikin@inbox.ru

Egor B.Troshkin, Master's student at the Institute of Mechanics and Power Engineering, e-mail: waslonter@list.ru

Vadim A. Efimov, Bachelor student of the Institute of Mechanics and Energy, e-mail: sokol.off2401032@gmail.com

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.11.2020.

Принята в печать 20.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 06.11.2020.

Accepted for publication 20.11.2020.

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, Ш.А. Юсуфов, Э. Казалиева. Метод формирования контактного слоя титан-германий для термостабилизации транзисторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4): 49-56. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

For citation: T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, Sh. A. Yusufov, E. Kazalieva. Method for forming a titanium-germanium contact layer for thermostabilization of transistors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 49-56. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-49-56

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СЛОЯ ТИТАН-ГЕРМАНИЙ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ

Т.А. Исмаилов, А.Р. Шахмаева, Ш.А. Юсуфов, Э. Казалиева

Дагестанский государственный технический университет

367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является получение высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных металлических слоев от технологии формирования которых, зависит надежность и качество изделий микроэлектроники - кремниевых транзисторов. **Метод.** Предложен способ формирования двухслойной металлизации титан-германий для создания контакта и отвода тепла от коллекторного перехода мощных полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин с сформированными структурами. Предложенный метод обеспечивает качество паяного соединения и термостабилизацию полупроводниковых приборов, увеличивая надежность работы исследуемых приборов в системах радиоэлектронной аппаратуры. **Результат.** Данное сочетание напыляемых металлов обеспечивает получение надежного контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание корпуса, которое приводит к уменьшению сопротивления омического перехода и увеличивает процент выхода годных приборов. **Вывод.** По результатам экспериментальных исследований были получены оптимальные толщины слоев металлов напыляемых на обратную сторону кристаллов транзисторов при формировании металлизации для посадки кристаллов на основание корпуса. Исследована стабильность системы Ti-Ge. Техническим результатом исследований является повышение качества посадки за счет получения равномерного распределения слоя Ti-Ge в едином технологическом цикле при заданной температуре с определенной толщиной отдельно каждого металла.

Ключевые слова: титан, германий, припой, мощный полупроводниковый транзистор, кристалл, термостабилизация, температура плавления, напыление, контакт

METHOD FOR FORMING A TITANIUM-GERMANIUM CONTACT LAYER FOR THERMOSTABILIZATION OF TRANSISTORS

T.A. Ismailov, A.R. Shakhmayeva, Sh.A. Yusufov, E. Kazalieva

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachka 367026, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to obtain high-quality and reproducible electrophysical parameters of thin-film metal layers, the formation technology of which determines the reliability and quality of microelectronic products – silicon transistors. **Methods.** A method for forming a two-layer titanium-germanium metallization to create a contact and remove heat from the collector junction of high-power semiconductor transistors on the reverse side of plates with formed structures is proposed. The proposed method ensures the quality of the soldered connection and thermal stabilization of semiconductor devices, increasing the reliability of the studied devices in radio-

electronic equipment systems. **Results.** This combination of sprayed metals provides a reliable contact to the collector area when the crystal is placed on the base of the case, which reduces the resistance of the ohmic transition and increases the output of suitable devices. **Conclusion.** Based on the results of experimental procedures, the optimal thicknesses of metal layers deposited on the reverse side of transistor crystals were obtained during the formation of metallization to fit crystals on the base of the case. The Ti-Ge system stability is studied. The technical result of the research is to improve the quality of planting by obtaining a uniform distribution of the Ti-Ge layer in a single technological cycle at a given temperature with a certain thickness for each metal separately.

Keywords: titanium, germanium, solder, high-capacity semiconductor transistor, crystal, thermal stabilization, fusion point, sputtering, contact

Введение. Получение качественных, воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных металлических слоев является одним из важнейших технологических процессов формирования структур кристалла полупроводниковых транзисторов. Надежность полупроводниковых приборов зависит в значительной степени от совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок.

В технологии изучения полупроводниковых приборов широко используются тонкие пленки толщиной от микронных и субмикронных толщин. Такие пленки обычно получают вакуумным, магнетронным или электролитическим осаждением. Такие как: никель, золото, или серебро обладают антикоррозийными свойствами драгметаллов и имеют высокую электропроводность и обуславливают широкое применение их в качестве слоя, выполняющего функции проводника, а слой никеля используется в качестве диффузионного барьера между адгезионным слоем и драгметаллом.

Стабильность свойств таких слоев в полной мере не изучена. Исследования стабильности системы Ti-Ge с толщинами соответственно - 1,0-2,0 (мкм), полученная методом магнетронным осаждением на импортной установке LEYBOLD AG Z-600, показали, что система остается стабильной при температурах 280-600⁰С в отличие от системы Cr-Ni-Cu-Au, которая остается стабильной лишь в течение нескольких минут при повышенных температурах от 400-500⁰С [1, 2, 9,10].

В производстве полупроводниковых приборов с повышением требований к точности, надежности приборов ожесточаются требования к контактам. Без знания функциональных свойств покрытий и их зависимости от различных факторов, от условий их осаждения трудно прогнозировать надежность контакта изучаемого прибора.

Важным этапом в технологии металлизации обратной стороны мощных кремниевых транзисторов является контроль параметров тонких металлических пленок - скорости напыления, толщины и ее равномерности, поверхностного сопротивления.

В результате соприкосновения с кремниевой поверхностью формируется адгезионное взаимодействие кремния и металлизации пленки, чем лучше адгезия, тем лучше это взаимодействие. У каждого материала свои функции: адгезионные, припойные, защитные, барьерные и др. Поэтому очень важен выбор материалов, обеспечивающих хорошую адгезию к кремнию [3].

Наивысшей адгезией к полупроводниковым приборам обладают переходные материалы, такие как хром, титан, железо, молибден [2,19,21,22]. Увеличение адгезии происходит и при напылении на подогретую подложку. Но, материал напыляемой пленки должен диффундировать внутрь полупроводника. Переходные металлы обладают высоким удельным сопротивлением, поэтому применяются для создания надежной металлизации поверхности полупроводника [5,6].

Постановка задачи. На базе научно-исследовательской лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств при Дагестанском государственном техническом университете были проведены экспериментальные работы по посадке БСИТ-транзисторов (КП-961) с различной технологией обработки и напыления обратной стороны

пластин. Анализ статистических данных показал зависимость брака транзисторных структур КП-961 по электрическим параметрам от технологии обработки и напыления обратной стороны, а также от технологии посадки кристалла на основание корпуса ТО-218.

Анализ транзисторов, вышедших из строя в результате вторичного пробоя, показал, что он появляется из-за концентрации тока в пределах малых областей активной площади прибора, возникает проблема равномерного токораспределения по структуре и отвода выделяющего тепла в транзисторах.

Задачей исследований является разработка оптимальной технологии формирования слоя Ti-Ge и посадки кристалла на основание корпуса, обеспечивающих надежную работу полупроводникового прибора [18].

Методы исследования. Исследован способ соединения полупроводникового кристалла с кристаллодержателем, сущность которого заключается в напылении на обратную сторону пластин слоя металлов титан-германий (Ti-Ge). Между поверхностями кристалла и кристаллодержателя размещают припойную прокладку оловянно-свинцовую, нагревают детали до формирования паяного соединения. Данный метод обеспечивает качество паяного соединения и термостабилизацию полупроводниковых приборов, увеличивая надежность работы полупроводниковых приборов.

Обсуждение результатов. Для обеспечения требуемых характеристик и параметров мощных кремниевых транзисторов разработана оптимальная технология двухслойной металлизации обратной стороны кремниевых пластин, обеспечивающая надежность работы полупроводникового прибора [4,17, 20].

Современные мощные транзисторные структуры (рис.1.) в основном изготавливаются на планарно-эпитаксиальных структурах вертикального типа, в которых контакт к коллектору осуществляется через сильнолегированную подложку, поскольку она является телом коллектора. В работе биполярного транзистора в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном. Неосновные носители заряда, инжектированные эмиттером, переносятся от эмиттера к коллектору с помощью диффузии и дрейфа в неоднородной базе.

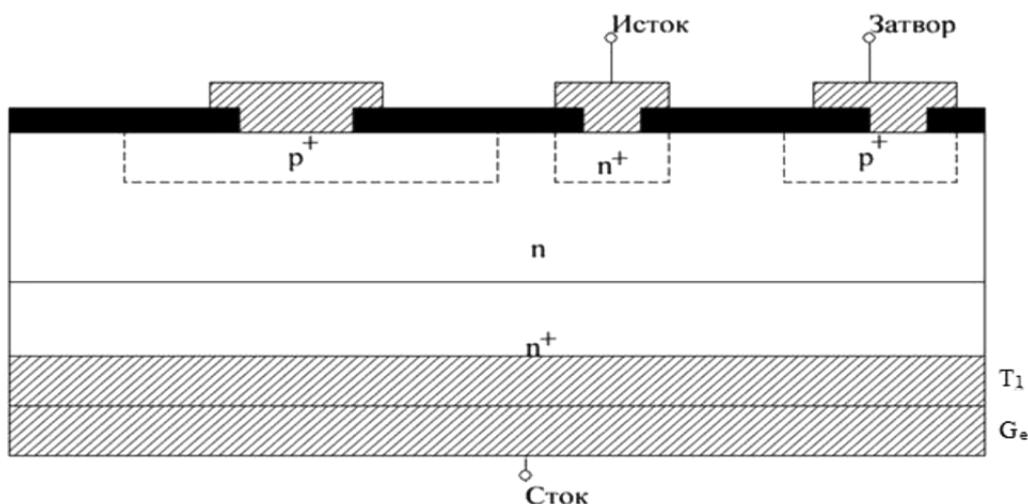


Рис.1. Структура исследования мощного кремниевого транзистора
Fig.1. Research structure of a high-power silicon transistor

В объеме базы происходит рекомбинация неосновных и основных носителей. При тонкой базе большая часть неосновных носителей, инжектированных эмиттером, доходит до границы коллекторного перехода и ускоряющим полем этого перехода переносится в область коллектора, образуя поток основных носителей. Режим отличается тем, что оба перехода находятся под прямым смещением. При этом инжекция осуществляется как эмиттерным, так и коллекторным переходами.

Одной из основных характеристик мощного транзистора является его сопротивление насыщения. Эта величина представляет собой напряжение, падающее между коллектором и эмиттером открытого транзистора при заданном значении коллекторного тока и достаточно большой степени насыщения. Благодаря наличию у транзистора не равного нулю сопротивления насыщения, его предельный ток в области малых напряжений зависит от величины приложенного напряжения. Действительно, для каждого значения напряжения коллектора ток в транзисторе не может быть больше, чем отношение этого напряжения к сопротивлению насыщения.

Техническим результатом изобретения является повышение надежности контакта кристалла с кристаллодержателем и стабильности процесса его присоединения. При посадке прибора на основание корпуса основной целью является защита поверхности полупроводника в нужных местах от проникновения примесей. Качество полученного маскирующего покрытия тщательно контролируют: измеряют его толщину, определяют однородность, наличие дефектных мест (проколов, кристаллических включений, инородных частиц), которые приводят к появлению участков с высоким тепловым сопротивлением и к выходу прибора из строя. Если площадь дефектов мала относительно площади кристалла и не влияет на активную структуру транзисторов, то основная часть изделия характеризуется низким уровнем теплового сопротивления. При длительной эксплуатации в неблагоприятных условиях надежность таких изделий снижается тем, что рост дефектов может привести к отказу элементов микросхемы [8].

Для образования паяного соединения необходимо смачивание поверхности металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. Паяное соединение должно иметь низкое переходное электрическое сопротивление, герметичность и требуемую прочность при различных условиях работы. В полупроводниковой технологии существуют различные способы монтажа кристаллов на подложку: пайка припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями на органической основе, присоединение с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Каждый из способов должен обеспечивать максимальный отвод тепла, высокую механическую прочность соединения, малое сопротивление контакта [1].

Для способа посадки кристалла на эвтектические сплавы, помимо технологических трудностей, характерны высокая температура, значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов и снижению надежности приборов, отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов [11]. Пайка считается единственным из всех перечисленных способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи.

Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. В приборах, мощность рассеяния кристалла в которых невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу устройства, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию. Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. При размещении прокладки припоя непосредственно под кристаллом существует вероятность, что в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении останутся в зоне шва, ухудшая смачиваемость припоем поверхности кристалла и приводя к образованию непропаев, что нарушает сплошность шва, ведет к ухудшению его теплопроводности и снижению надежности полупроводниковых изделий [10].

Качество посадки контролируется методом отрыва с определенным усилием и визуально под микроскопом. При проведении контроля посадки кристалла с двухслойной металлизацией кристалл не отрывается от кристаллодержателя при приложении соответствующего усилия, а при приложении большего усилия разламывается сам кремний. Это объясняет то, что посадка

кристалла качественная. При визуальном контроле под микроскопом со всех сторон кристалла по периметру проступает припой на 0,5-1,0 мм от края, что показывает удовлетворительное распределение припоя по всей площади кристалла.

Более того, контроль площади распределения припоя по основанию кристалла с помощью рентгеновского микроскопа показал 100% распределение припойного слоя по площади кристалла без пор, что улучшает тепловые свойства прибора [13-16]. Использование данного способа позволяет повысить надежность контакта кристалла с кристаллодержателем при проведении процесса напыления двух металлов: титан-германий в едином технологическом цикле.

Контроль толщины пленки металла проводился на импортной установке «Alpha-Step». Основными контролируруемыми параметрами при проведении экспериментов на определение оптимальных технологических режимов на получение заданных толщин являются: мощность катода, скорость движения полета, давление вакуума в камере. Система Ti-Ge с толщинами соответственно- 1,0-0,5 (мкм) напыляемой пленки зависит от задаваемых значений мощности и скорости движения полета.

Время предварительной очистки пластин в блоке плазмотравления устанавливаем на 1 мин. Расход аргона -185 - 220 см³/ч, давление вакуума в камере 5х10⁻³мбар. Определяем зависимость толщины напыляемой пленки от мощности катода и скорости движения полета для каждого металла (рис.2- 3).

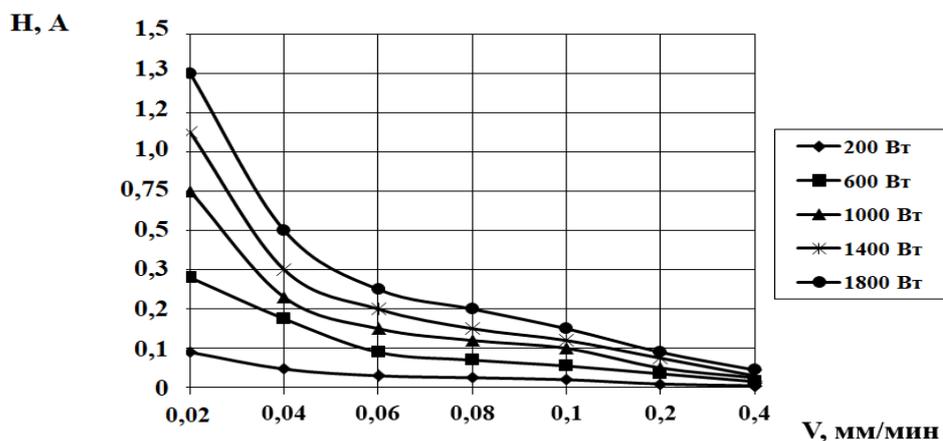


Рис.2. Зависимость толщины пленки титана от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig.2. Dependence of the titanium film thickness on the flight speed at different cathode power

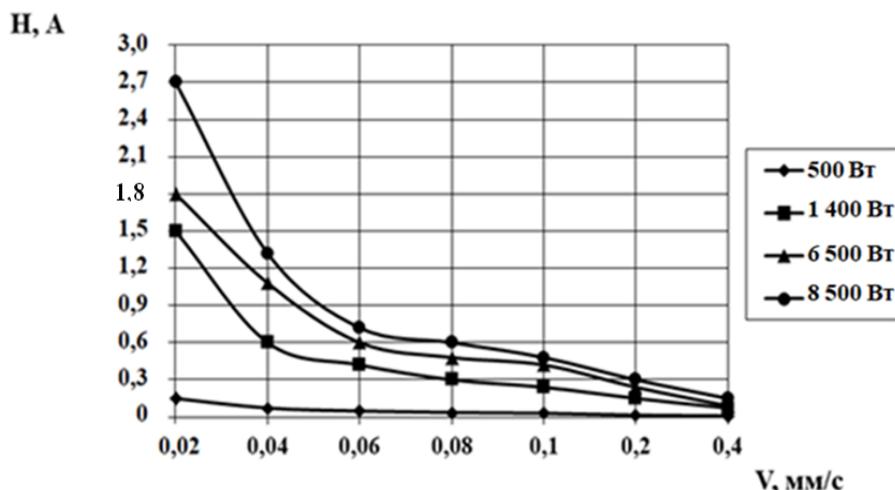


Рис.3. Зависимость толщины пленки германия от скорости движения полета при различной мощности катода

Fig.3. Dependence of the germanium film thickness on the flight speed at different cathode power

Вывод. На основании полученных результатов разработана оптимальная технология формирования контактного слоя Ti-Ge для термостабилизации кремниевых транзисторов. Сущность способа заключается в том, что на обратную сторону кремниевой пластины со стороны БСИТ-транзисторов КП-961 наносят в среде аргона последовательно в едином технологическом цикле два металла: титан и германий.

Для получения необходимых толщин их слоев получают следующие технические режимы напыления: титан при мощности катода-1400Вт и скорости движения полета - 0,03мм/мин, а германий при той же мощности скорость движения полета - 0,06 мм/мин. Затем по технологии разделяют пластину со структурами на кристаллы и производят пайку кристаллов к кристаллодержателю при температуре 280-300⁰С в течение 2-4 с. Данное сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение надежного контакта кристалла с кристаллодержателем, 100% распределение припоя по поверхности кристалла, отсутствие пор в припое, улучшение выходных характеристик прибора и увеличение на 10% выхода годных изделий.

Библиографический список:

1. Алиев Ш. Д., Шахмаева А. Р., Шангереева Б. А. Современные технологические методы контроля пайки // Сб. тезисов докл. XXIV итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 21-24 апр., 2003. Махачкала: ДГТУ, 2003. С. 87.
2. Белов А.Н., Голишиников А.А., Костюков Д.А., Шевяков В.И.// Металлизация высокотемпературных кремниевых ИС на основе сплава вольфрама с титаном. Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019.Т.24. №1. С.22-29.
3. Бурмаков А.П., Кулешов В.Н.//Высоко адгезионная металлизация керамики пленками оксида титана изменяющего толщине состава. Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2007. №1. С. 24-28.
4. Ванюхин К.Д., Захарченко Р.В., Сейдман Л.А., Пашков М.В., Воронова А.А., Блинов П.А., Евсеева Е.М., Миннебаев С.В.// Исследование структуры и морфологии поверхности двухслойной металлизации Ti/Al. В книге: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов: в 3-х томах.О.Н. Голотук. 2014. С.85.
5. Горлов М.И., Мешкова М.А. // Формирование металлизации на обратной стороне кремниевых пластин. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 1. С. 95-97.
6. Громов Д.Г., Мочалов А.И./ Материалы и процессы формирования систем металлизации кремниевых интегральных схем// Уч. пособие. М.: МИЭТ, 2006. С. 180.
7. Исмаилов Т.А., Алиев Ш.Д., Шахмаева А.Р.,ШангерееваБ.А. Контроль качества посадки кристалла на основание корпуса (тезисы докладов). Измерение, контроль, информатизация: сборник трудов Международной научно-технической конференции. Барнаул: АГТУ, 2004. С. 55-56.
8. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Транзисторные структуры силовой электроники. СПб.Политехника, 2011. 125 с.
9. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Экспериментальное исследование и оптимизация технологического процесса формирования контакта к коллекторной области кремниевых транзисторов// Базовые процессы формирования активных областей структуры мощных кремниевых транзисторов. СПб.:Политехника, 2009. С. 119.
10. Колпаков А. Новые технологии расширяют горизонты силовой электроники//Компоненты и технологии. 2007. № 4.
11. Ланин В. Паяемость выводов электронных компонентов//Технологии в электронной промышленности. 2010. № 4.
12. Климачев И.И., Литвинова Т.В., Сидоренко С.И. Исследование стабильности системы Cr-Cu-Ni-Au, со слоями, полученными электролитическим осаждением. Микроэлектроника. 1994, Т.23. Вып.2. с. 91-95. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. Планарная технология кремниевых приборов. Москва, «Энергия», 1974 г., стр. 318-321.
13. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. Планарная технология кремниевых приборов. Москва, «Энергия», 1974 г., стр. 318-321.
14. Патент 2460168 (RU), Н 01 L 21/52. Способ пайки кристаллов на основе карбида кремния / В. В. Зенин, В. И. Бойко, А. В. Кочергин, Б. А. Спиридонов, А. В. Строгонов; опубли. 27.08.2012. Бюл. № 19.
15. Патент РФ №2375787 «Способ посадки кремниевого кристалла на основание корпуса»/Т.А. Исмаилов, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева. Опубли.10.12.2009. Бил. №34.
16. Патент 2007127165/28 РФ, МПК H01L 21/283. Способ формирования контактного слоя титан-германий / Т. А. Исмаилов, А. Р. Шахмаева, Б. А. Шангереева. Опубли.10.01.2009. Бюл. №1.
17. Сенько С.Ф., Белоус А.И., Плебанович В.И.// Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов. Патент на изобретение RU 2333568 C1, 10.09.2008. Заявка №200614979/28 от 04.12.2006.
18. Шахмаева А.Р. Оптимизация технологии посадки кристалла кремниевого транзистора на основание корпуса // Проектирование и технология электронных средств, 2006. №4. С.26-27.
19. Jacobs, V. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures. / V. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. 2002. Vol. 241. pp. 15-18.
20. Liu, Q. Z. A review of the metal-GaN contact technology / Q. Z. Liu, S. S. Lau // Solid State Electron. 1998. Vol. 42, No 5. pp. 677-691.
21. Wang C., Cho S.-J., Kim N.-Y. Optimization of ohmic contact metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2013, Vol.14, № 1, pp. 32-35.
22. Yoon S., Bang J., Lee H., Oh J. Interfacial AlN formation of Si/Ti/Al/Cu Ohmic contact for AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. Microelectronic Engineering. 2016, No. 151, pp. 60-63.

References:

1. Aliyev SH. D., Shakhmayeva A. R., Shangereyeva B. A. Sovremennyye tekhnologicheskiye metody kontrolya payki // Sb. tezisov dokl. XXIV itogovoy nauch.-tekhn. konf. prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 21-24 apr., 2003.

- Makhachkala: DGTU, 2003. S. 87. [Aliev sh. D., Shakhmayeva A. R., Shangereeva B. A. Modern technological methods of soldering control // Collection of abstracts of the XXIV final scientific and technical conference of teachers, employees, post-graduates and students of DSTU, 21-24 APR., 2003. Makhachkala: DSTU, 2003. p. 87. (In Russ)]
2. Belov A.N., Golishnikov A.A., Kostyukov D.A., Shevyakov V.I.// Metallizatsiya vysokotemperaturnykh kremniyevykh IS na osnove splava vol'frama s titanom. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika. 2019.T.24. №1. S.22-29. [Belov A. N., Golishnikov A. A., Kostyukov D. A., Shevyakov V. I.// Metallization of high-Temperature silicon ICS based on a tungsten-titanium alloy. Newsofhighereducationalinstitutions. Electronics. 2019.T.24. No. 1. pp. 22-29. (In Russ)]
 3. Burmakov A.P., Kuleshov V.N. // Vysoko adgezionnaya metallizatsiya keramiki plenkami oksida titana izmenyayushchego tolshchine sostava. Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika. 2007. №1. S. 24-28. [Burmakov A. P., Kuleshov V. N. // Highly adhesive metallization of ceramics With titanium oxide films of thickness-changing composition. Bulletinof BSU. Series 1, Physics. Mathematics. Computerscience. 2007. No. 1. pp. 24-28. (In Russ)]
 4. Vanyukhin K.D., Zakharchenko R.V., Seydman L.A., Pashkov M.V., Voronova A.A., Blinov P.A., Yevseyeva Ye.M., Minnebayev S.V.// Issledovaniye struktury i morfologii poverkhnosti dvukhsloynoy metallizatsii TI/AL. V knige: Nauchnaya sessiya NIYAU MIFI-2014. Annotatsii dokladov: v 3-kh tomakh.O.N. Golotyuk. 2014. S.85. [Vanyukhin K. D., Zakharchenko R. V., Seidman L. A., Pashkov M. V., Voronova A. A., Blinov P. A., Evseeva E. M., Minnebaev S. V.// Investigation of the structure and morphology of the surface of two-layer metallization TI/AL. In the book: scientific session of MEPHI-2014. Abstracts of reports: in 3 Vol.O. N. Golotyuk. 2014. p. 85. (In Russ)]
 5. Gorlov M.I., Meshkova M.A. // Formirovaniye metallizatsii na obratnoy storone kremniyevykh plastin. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. T. 5. № 1. S. 95-97. [Gorlov M. I., Meshkova M. A. // formation of metallization on the reverse side of silicon plates. BulletinoftheVoronezhstatetechnicalUniversity. 2009. Vol. 5.No. 1. pp. 95-97. (In Russ)]
 6. Gromov D.G., Mochalov A.I./Materialy i protsessy formirovaniya sistem metallizatsii kremniyevykh integral'nykh skhem. // Uch. posobiye. M.: MIET, 2006. S.180. [Gromov D. G., Mochalov A. I. / Materials and processes of formation of metallization systems of silicon integrated circuits//Uch. manual. Moscow: MIET, 2006. p.180. (In Russ)]
 7. Ismailov T.A., Aliyev SH.D., Shakhmayeva A.R.,ShangereyevaB.A. Kontrol' kachestva posadki kristalla na osnovaniye korpusa (teziy dokladov). Izmereniye, kontrol', informatizatsiya: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Barnaul: AGTU, 2004. S. 55-56. [Ismailov T. A., Aliyev sh. D., Shakhmayeva A. R., Shangereeva B. A. quality Control of crystal landing on the base of the case (abstracts). Measurement, control, Informatization: proceedings of the International scientific and technical conference. Barnaul: AGTU, 2004, pp. 55-56. (In Russ)]
 8. Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. Tranzistornyye struktury silovoy elektroniki. SPb: Politehnika, 2011. 125 s. [Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. Transistor Structures of power electronics. SaintPetersburg: Politehnika, 2011. 125 p. (In Russ)]
 9. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R. Eksperimental'noye issledovaniye i optimizatsiya tekhnologicheskogo protsessa formirovaniya kontakta k kollektornoy oblasti kremniyevykh tranzistorov// Bazovyye protsessy formirovaniya aktivnykh oblastey struktury moshchnykh kremniyevykh tranzistorov. Spb.:Politehnika, 2009. S. 119. [Ismailov T. A., Shakhmayeva A. R. experimental research and optimization of the technological process of forming a contact to the collector region of silicon transistors// Basic processes of formation of active regions of the structure of high-power silicon transistors. SPb.:Politehnika, 2009, P. 119. (In Russ)]
 10. Kolpakov A. Novyye tekhnologii rasshiryayut gorizonty silovoy elektroniki//Komponenty i tekhnologii. 2007. № 4. [Kolpakov A. New technologies expand the horizons of power electronics//Components and technologies. 2007. № 4. (In Russ)]
 11. Lanin V. Payayemost' vyvodov elektronnykh komponentov//Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti. 2010. № 4. [Lanin V. Solderability of electronic component leads//Technologies in the electronics industry. 2010. № 4. (In Russ)]
 12. Klimachev I.I., Litvinova T.V., Sidorenko S.I. Issledovaniye stabil'nosti sistemy Cr-Cu-Ni-Au, so sloyami, poluchennymi elektroliticheskimi osazhdeniyem. Mikroelektronika. 1994, T.23. Vyp.2. s. 91-95. [Klimachev I. I., Litvinova T. V., Sidorenko S. I. stability study of the Cr-Cu-Ni-Au system with layers obtained by electrolytic deposition. Microelectronics, 1994, Vol. 23, issue 2, pp. 91-95. (In Russ)]
 13. Mazel' Ye.Z., Press F.P. Planarnaya tekhnologiya kremniyevykh priborov. Moskva, «Energiya», 1974 g., str. 318-321. [Mazel E. Z., Press F. P. Planar technology of silicon devices. Moscow, Energiya, 1974, pp. 318-321. (In Russ)]
 14. Patent 2460168 (RU), H 01 L 21/52. Sposob payki kristallov na osnove karbida kremniya / V. V. Zenin, V. I. Boyko, A. V. Kochergin, B. A. Spiridonov, A. V. Strogonov; opubl. 27.08.2012. Byul. № 19. [Patent 2460168 (RU), H 01 L 21/52. Method for soldering crystals based on silicon carbide / V. V. Zenin, V. I. Boyko, A.V. Kochergin, B. A. Spiridonov, A.V. Strogonov; publ. 27.08.2012. Byul.no. 19. (In Russ)]
 15. Patent RF №2375787 «Sposob posadki kremniyevogo kristalla na osnovaniye korpusa»/T.A. Ismailov, B.A. Shangereyeva, A.R. Shakhmayeva. Opubl.10.12.2009. Bil. №34. [Patent of the Russian Federation No. 2375787 "Method for planting a silicon crystal on the base of the case" /T. A. Ismailov, B. A. Shangereeva, A. R. Shakhmayeva. Publ.10.12.2009. Bill.No. 34. (In Russ)]
 16. Patent 2007127165/28 RF, MPK H01L 21/283. Sposob formirovaniya kontaktnogo sloya titan-germaniy / T. A. Ismailov, A. R. Shakhmayeva, B. A. Shangereyeva. Opubl.10.01.2009. Byul. №1. [Patent 2007127165/28 of the Russian Federation, IPC H01L 21/283. A method of forming a contact layer of titanium-germanium / T. A. Ismailov, A. R. Shakhmaeva, B. A. Shangereeva.Publ.10.01.2009. Byul.No. 1. (In Russ)]
 17. Sen'ko S.F., Belous A.I., Plebanovich V.I.// Sposob izgotovleniya sistemy metallizatsii kremniyevykh poluprovodnikovykh priborov. Patent na izobreteniyе RU 2333568 C1, 10.09.2008. Zayavka №200614979/28 ot 04.12.2006. [Senko S. F., Belous A. I., Plebanovich V. I.// Method for manufacturing a metallization system for silicon semiconductor devices. The patent for the invention EN 2333568 C1, 10.09.2008. Application no. 200614979/28 dated 04.12.2006. (In Russ)]
 18. Shakhmayeva A.R. Optimizatsiya tekhnologii posadki kristalla kremniyevogo tranzistora na osnovaniye korpusa // Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv, 2006. №4. S.26-27. [Shakhmayeva A. R. Optimization of the technology for plac-

- ing a silicon transistor crystal on the base of the case // Design and technology of electronic means, 2006, No.4, pp. 26-27. (In Russ)]
19. Jacobs, B. Optimisation of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures. / B. Jacobs, M. C. J. C. M. Kramer, E. J. Geluk, F. Karouta // J. Cryst. Growth. 2002. Vol. 241. pp. 15-18.
 20. Liu, Q. Z. A review of the metal–GaN contact technology / Q. Z. Liu, S. S. Lau // Solid State Electron. 1998. Vol. 42, No 5. pp. 677-691.
 21. Wang C., Cho S.-J., Kim N.-Y. Optimization of ohmic contact metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2013, Vol.14, № 1, pp. 32-35.
 22. Yoon S., Bang J., Lee H., Oh J. Interfacial AlN formation of Si/Ti/Al/Cu Ohmic contact for AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. Microelectronic Engineering. 2016, No. 151, pp. 60-63.

Сведения об авторах:

Исмаилов Тагир Абдурашидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ, Президент ДГТУ; e-mail: dstu@dstu.ru

Шахмаева Айшат Расуловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: frk12@mail.ru

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: yshirali@yandex.ru

Казалиева Эльмира, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: kazanova.em@mail.ru

Information about the authors:

Tagir A. Ismailov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical Engineering. Honored Worker of Science of the Russian Federation, President DSTU; e-mail: dstu@dstu.ru

Aishat R. Shakhmaeva, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: fpk12@rambler.ru

Shirali A. Yusufov, Cand.Sci. (Technical), Prof., Assoc.Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering. Electrical Engineering; e-mail: yshirali@yandex.ru

Elmira Kazalieva, Post-graduate student of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: kazanova.em@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.10.2020.

Принята в печать 02.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 09.10.2020.

Accepted for publication 02.11.2020.

Для цитирования М.А. Кальмова. Нестационарная задача обратного пьезоэффекта для длинного пьезокерамического термоупругого цилиндра. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (4):57-68. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-57-68

For citation: M.A. Kalmova. Dynamic inverse piezo-effect problem for a long piezoceramic thermoelastic cylinder. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):57-68.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-57-68

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-57-68

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА ДЛЯ ДЛИННОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ТЕРМОУПРУГОГО ЦИЛИНДРА

М.А. Кальмова

Самарский государственный технический университет,
443001 г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является решение несвязанной нестационарной задачи термоэлектроупругости для длинного полого пьезокерамического цилиндра при действии на его поверхностях электрической нагрузки в виде разности потенциалов. **Метод.** Математическая формулировка рассматриваемой задачи термоэлектроупругости включает систему несамосопряженных дифференциальных уравнений. Для ее решения на первом этапе рассматривается связанная задача обратного пьезоэффекта без учета влияния температурного поля, а на следующем – исследуется гиперболическая задача теплопроводности (LS–теория) при заданном (определенном) электроупругом поле. **Результат.** Построено новое замкнутое решение динамической задачи обратного пьезоэффекта для длинного пьезокерамического термоупругого цилиндра. Рассматривается случай действия на его лицевых поверхностях нестационарной электрической нагрузки в виде разности потенциалов. Заданы температура окружающей среды и закон конвекционного теплообмена (граничное условие 3– рода). Расчетные соотношения, полученные с помощью обобщенного метода конечных интегральных преобразований, дают возможность определить напряженно–деформированное состояние и термоэлектрические поля, индуцируемые в пьезокерамическом элементе при произвольном электрическом внешнем воздействии. **Вывод.** Построенное решение позволяет определить напряженно–деформированное состояние и электрическое поле в пьезокерамическом цилиндре, а также проанализировать с помощью гиперболической LS–теории теплопроводности влияние индуцируемого температурного поля на электроупругое состояние рассматриваемой системы. Анализ численных результатов позволяет сделать вывод о незначительных потерях энергии, связанных с нагревом электроупругой системы. Разработанный алгоритм расчета находит свое применение при проектировании нерезонансных и резонансных пьезоэлектрических измерительных приборов.

Ключевые слова: длинный пьезокерамический цилиндр, задача термоэлектроупругости, нестационарное воздействие, конечные интегральные преобразования

DYNAMIC INVERSE PIEZO-EFFECT PROBLEM FOR A LONG PIEZOCERAMIC THERMOELASTIC CYLINDER

M.A. Kalmova

Samara State Technical University,
244 Molodogvardeyskaya St., Samara 443001, Russia

Abstract. Objective. The objective of this work is to solve an unrelated dynamic problem of thermoelectroelasticity for a long hollow piezoceramic cylinder under the action of an electric load on its surfaces in the form of a potential difference. **Methods.** The mathematical formulation of the con-

sidered problem of thermoelectroelasticity includes a system of non-selfadjoint differential equations. At the first stage, the authors consider the associated inverse piezoelectric effect problem without taking into account the influence of the temperature field, and at the next stage, study the hyperbolic heat conduction problem (Lord–Shulman theory) for a given (defined) electroelastic field. **Result.** A new closed solution to the dynamic inverse piezoelectric effect problem for a long piezoceramic thermoelastic cylinder is constructed. The case of the action of a dynamic electric load in the form of a potential difference on its front surfaces is considered. The ambient temperature and the law of convection heat transfer (3-kind boundary condition) are set. The calculated relations obtained using the generalized method of finite integral transformations allow determining the stress-strain state and thermoelectric fields induced in a piezoceramic element under an arbitrary electrical external influence. **Conclusion.** The constructed solution allows determining the stress-strain state and electric field in a piezoceramic cylinder, as well as analyzing the effect of the induced temperature field on the electroelastic state of the system under consideration using the hyperbolic Lord–Shulman theory of thermal conductivity. Analysis of the numerical results allows concluding that there are insignificant energy losses associated with heating the electroelastic system. The developed calculation algorithm is used in the design of non-resonant and resonant piezoelectric measuring devices.

Keywords: long piezoceramic cylinder, thermoelasticity problem, dynamic action, finite integral transformations

Введение. Пьезокерамические материалы находят широкое применение при разработке измерительных приборов различного назначения. Их работа основана на связанности электроупругих полей, индуцируемых в элементе [1–6]. Для расширения функциональных возможностей приборов данного типа возникает необходимость углубленного анализа нестационарных процессов, позволяющего понять эффект взаимодействия электрических и упругих полей, а также влияние на них температурных полей.

Математическая формулировка начально-краевых задач термоэлектроупругости включает систему несамосопряженных дифференциальных уравнений, исследование которых, как правило, проводится при использовании численных методов [7–9]. Однако достаточно слабые эффекты взаимодействия полей различной физической природы удастся проанализировать только с помощью замкнутых аналитических решений. Проблема интегрирования исходных расчетных соотношений и построение общего решения приводит к проведению расчетов в упрощенной постановке, а именно, исследуются несвязанные задачи [10,11] или анализируются бесконечно длинные тела [12–14]. При этом в большинстве работ, в качестве внешнего воздействия рассматривается нестационарная температурная нагрузка. В свою очередь, при решении задач прямого и обратного пьезоэффектов, электроупругая конструкция рассматривается, как консервативная система без потери энергии на ее нагрев [15–18].

Постановка задачи. Целью настоящей работы является решение несвязанной нестационарной задачи термоэлектроупругости для длинного полого пьезокерамического цилиндра при действии на его поверхностях электрической нагрузки в виде разности потенциалов. Построенное решение позволяет определить напряженно–деформированное состояние и электрическое поле в пьезокерамическом цилиндре, а также проанализировать с помощью гиперболической LS–теории теплопроводности влияние индуцируемого температурного поля на электроупругое состояние рассматриваемой системы.

Методы исследования. Пусть полый длинный незакрепленный пьезокерамический цилиндр занимает в цилиндрической системе координат (r_*, θ, z) область $\Omega: \{a \leq r_* \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, -\infty < z < \infty\}$. Рассматривается случай действия на лицевых электродированных поверхностях нестационарной нагрузки в виде разности потенциалов $2V^*(t_*)$, явля-

ющейся произвольной функцией времени t_* . При этом известны температура окружающей среды ϑ^* и закон конвекционного теплообмена (граничное условие 3– рода).

В общем случае дифференциальные уравнения термоэлектроупругости и краевые условия рассматриваемой задачи в безразмерной форме записываются следующим образом [19, 20]:

$$\begin{aligned} \nabla \frac{\partial U}{\partial r} - n_1 \frac{U}{r^2} + \nabla \frac{\partial \phi}{\partial r} - n_2 \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} - \nabla \Theta + n_3 \frac{\Theta}{r} - \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ -\nabla \frac{\partial \phi}{\partial r} + n_4 \nabla \frac{\partial U}{\partial r} + n_5 \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + n_6 \nabla \Theta &= 0, \\ \nabla \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \left(\frac{\partial}{\partial t} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \left(n_7 \Theta + n_8 \nabla U - n_9 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial U}{\partial r} + n_{10} \frac{U}{r} + \frac{\partial \phi}{\partial r} - \Theta = 0, \quad \phi = \pm V, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} + n_{11} \Theta = n_{11} \vartheta; \quad (2)$$

$$t = 0 \quad U = \phi = \Theta = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} \{U, \phi, \Theta\} = \{U_0, \phi_0, \Theta_0\}; \quad (3)$$

где $\{U, U_0, r, R\} = \{U^*, U_0, r_*, a\}/b$, $\{\Theta, \Theta_0, \vartheta\} = \frac{\gamma_{33}}{C_{33}}$, $\{\Theta^*, \Theta_0, (\vartheta - T_0)\}$

$$\{\phi, \phi_0, V\} = \frac{e_{33}}{C_{33}b}, \quad \{\phi^*, \phi_0, V^*\}, \quad t = \frac{t_*}{b} \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad n_1 = \frac{C_{11}}{C_{33}}, \quad n_2 = \frac{e_{31}}{e_{33}}, \quad n_3 = \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{33}},$$

$$n_4 = \frac{e_{33}^2}{C_{33} \varepsilon_{33}}, \quad n_5 = \frac{e_{31} e_{33}}{C_{33} \varepsilon_{33}}, \quad n_6 = \frac{g_3 e_{33}}{\varepsilon_{33} \gamma_{33}}, \quad n_7 = k \frac{b}{\Lambda} \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad n_8 = \frac{b \gamma_{33}^2 T_0}{\Lambda \sqrt{C_{33} \rho}},$$

$$n_9 = \frac{b \gamma_{33} g_3 T_0}{e_{33} \Lambda} \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad n_{10} = \frac{C_{13}}{C_{33}}, \quad n_{11} = \alpha \frac{b}{\Lambda}, \quad \beta = \frac{\beta_{rel}}{b} \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r},$$

$U^*(r_*, t_*)$ – радиальная составляющая вектора перемещений; $\phi^*(r_*, t_*)$ – потенциал электрического поля; $\Theta^* = T - T_0$; Θ^*, T, T_0 – приращение и текущая температуры, а также температура первоначального состояния тела, при котором отсутствуют механические напряжения; $C_{ms}, e_{ms}, \varepsilon_{33}$ – модули упругости, пьезомодули и коэффициент диэлектрической проницаемости электроупругого материала ($m, s = \overline{1,3}$); Λ, k – коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости материала; γ_{11}, γ_{33} – компоненты тензора температурных напряжений; g_3 – компонента тензора пироккоэффициентов; β_{rel} – время релаксации; α – коэффициент теплоотдачи; $U_0^*, \phi_0^*, \Theta_0^*$ известные в начальный момент времени скорости перемещения, потенциала и температуры.

Невозможность построения общего решения для несамосопряженной системы дифференциальных уравнений (1) в связанной постановке приводит к использованию алгоритма, когда на первом этапе рассматривается задача обратного пьезоэффекта без учета влияния температурного поля, а на следующем – исследуется задача теплопроводности при заданном (определенном) электроупругом поле.

Построение общего решения задачи электроупругости. Математическая формулировка рассматриваемой задачи на основании расчетных соотношений (1)–(3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \nabla \frac{\partial U}{\partial r} - n_1 \frac{U}{r^2} + \nabla \frac{\partial \phi}{\partial r} - n_2 \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} - \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ -\nabla \frac{\partial \phi}{\partial r} + n_4 \nabla \frac{\partial U}{\partial r} + n_5 \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial U}{\partial r} + n_{10} \frac{U}{r} + \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0, \quad \phi = \pm V; \quad (5)$$

$$t = 0 \quad U = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = U_0; \quad (6)$$

На первом этапе решения выполняется процедура приведения расчетных соотношений (4) – (6) к виду, позволяющему в дальнейшем использовать метод конечных интегральных преобразований [21]. Для этого вводятся новые функции $u(r, t)$, $\chi(r, t)$, связанные с $U(r, t)$, $\phi(r, t)$ следующими соотношениями:

$$U(r, t) = H_1(r, t) + u(r, t), \quad \phi(r, t) = H_2(r, t) + \chi(r, t), \quad (7)$$

$$\text{где } \{H_1(r, t), H_2(r, t)\} = \{f_1(r), f_2(r)\}V(t).$$

Подстановка (7) в (4) – (6), при удовлетворении условий

$$r = R, 1 \quad \frac{df_1(r)}{dr} + n_{10} \frac{f_1(r)}{r} + \frac{df_2(r)}{dr} = 0, \quad f_2(r) = \pm 1; \quad (8)$$

позволяет получить краевую задачу относительно функций $u(r, t)$, $\chi(r, t)$ с однородными граничными условиями:

$$\begin{aligned} \nabla \frac{\partial u}{\partial r} - n_1 \frac{u}{r^2} + \nabla \frac{\partial \chi}{\partial r} - n_2 \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= R_1, \\ -\nabla \frac{\partial \chi}{\partial r} + n_4 \nabla \frac{\partial u}{\partial r} + n_5 \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} &= R_2; \end{aligned} \quad (9)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial u}{\partial r} + n_{10} \frac{u}{r} + \frac{\partial \chi}{\partial r} = 0, \quad \chi = 0; \quad (10)$$

$$t = 0 \quad u = -H_1, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = U_0 - \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad (11)$$

$$\text{где } R_1 = -\nabla \frac{\partial H_1}{\partial r} + n_1 \frac{H_1}{r^2} - \nabla \frac{\partial H_2}{\partial r} + n_2 \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 H_1}{\partial t^2}, \quad R_2 = \nabla \frac{\partial H_2}{\partial r} - n_4 \nabla \frac{\partial H_1}{\partial r} - n_5 \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r}.$$

Начально–краевую задачу (9)–(11) решаем, используя структурный алгоритм вырожденного обобщенного конечного интегрального преобразования (КИП) [21]. Для этого вводим на сегменте $[R, 1]$ КИП с неизвестными компонентами вектор–функции ядра преобразований $K_1(\lambda_i, r), K_2(\lambda_i, r)$:

$$G(\lambda_i, t) = \int_R^1 u(r, t) n_4 K_1(\lambda_i, r) r dr, \quad (12)$$

$$\{u(r, t), \chi(r, t)\} = \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_i, t) \{K_1(\lambda_i, r), K_2(\lambda_i, r)\} \|K\|^{-2}, \quad \|K_i\|^2 = n_4 \int_R^1 K_1(\lambda_i, r)^2 r dr,$$

где λ_i – собственные значения.

В результате использования алгоритма КИП получаем задачи для трансформанты $G(\lambda_i, t)$:

$$\frac{d^2 G_i}{dt^2} + \lambda_i^2 G_i = R_H, \quad (13)$$

$$t = 0 \quad G_{i|t=0} = G_0, \quad \left. \frac{dG_i}{dt} \right|_{t=0} = \frac{dG_0}{dt}; \quad (14)$$

и компонент ядра преобразований $K_1(\lambda_i, r), K_2(\lambda_i, r)$:

$$\nabla \frac{dK_1}{dr} - n_1 \frac{K_1}{r^2} + \nabla \frac{dK_2}{dr} - n_2 \frac{1}{r} \frac{dK_2}{dr} + \lambda_i^2 K_1 = 0, \quad (15)$$

$$-\nabla \frac{dK_2}{dr} + n_4 \nabla \frac{dK_1}{dr} + n_5 \frac{1}{r} \frac{dK_1}{dr} = 0;$$

$$r = R, 1 \quad \frac{dK_1}{dr} + n_{10} \frac{K_1}{r} + \frac{dK_2}{dr} = 0, \quad K_2 = 0; \quad (16)$$

$$\text{где } R_H = -\int_R^1 (R_1 K_1 + R_2 K_2) r dr, \quad G_0 = -\int_R^1 H_{i|t=0} K_1 r dr, \quad \frac{dG_0}{dt} = \int_R^1 \left(U_0 - \frac{\partial H_1}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} K_1 r dr$$

Общий интеграл уравнения (13), с учетом начальных условий (14), имеет вид:

$$G(\lambda_i, t) = G_0 \cos \lambda_i t + \frac{dG_0}{dt} \frac{\sin \lambda_i t}{\lambda_i} + \lambda_i^{-1} \int_0^t R_H(\tau) \sin \lambda_i(t - \tau) d\tau. \quad (17)$$

Система (15) приводится к следующему разрешающему уравнению относительно функции $K_1(\lambda_i, r)$:

$$\frac{d^2 K_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dK_1}{dr} + \left(A_i^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) K_1 = n_{12} \frac{D_{1i}}{r^2}, \quad (18)$$

решение которого, имеет вид

$$K_1(\lambda_i, r) = D_{1i} n_{12} Q_{v,-1}(A_i r) + D_{2i} J_v(A_i r) + D_{3i} Y_v(A_i r). \quad (19)$$

Здесь $Q_{v,-1}(\dots), J_v(\dots), Y_v(\dots)$ – неэлементарные функции Ломмеля, обыкновенные функции Бесселя 1-го и 2-го родов порядка v [22]; $D_{1i} \dots D_{3i}$ – постоянные интегрирования;

$$A_i^2 = \frac{\lambda_i^2}{1+n_4}, \quad v^2 = \frac{n_1+n_2 n_5}{1+n_3}, \quad n_{12} = \frac{n_2}{1+n_4}.$$

Интегрирование второго уравнения (15) позволяет определить функцию $K_2(\lambda_i, r)$:

$$K_2(\lambda_i, r) = n_4 K_1(\lambda_i, r) + n_5 \int K_1(\lambda_i, r) r^{-1} dr + D_{4i} \ln(r) + D_{4i}. \quad (20)$$

Подстановка $K_1(\lambda_i, r), K_2(\lambda_i, r)$ в граничные условия (16) формирует систему алгебраических уравнений, решение которой позволяет определить постоянные интегрирования $D_{1i} \dots D_{4i}$ и собственные значения λ_i .

Окончательные выражения функций $U(r, t), \phi(r, t)$ получим, применяя к трансформанте (17) формулы обращения (12). В результате, с учетом (7), имеем:

$$\{U(r, t), \phi(r, t)\} = \{H_1(r, t), H_2(r, t)\} + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_i, t) \{K_1(\lambda_i, r), K_2(\lambda_i, r)\} \|K_i\|^2. \quad (21)$$

Функции $f_1(r), f_2(r)$ определяются при решении следующих дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \nabla \frac{df_1(r)}{dr} - n_1 \frac{f_1(r)}{r^2} + \nabla \frac{df_2(r)}{dr} - n_2 \frac{1}{r} \frac{df_2(r)}{dr} &= 0, \\ \nabla \frac{df_2(r)}{dr} - n_4 \nabla \frac{df_1(r)}{dr} - n_5 \frac{1}{r} \frac{df_1(r)}{dr} &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

и удовлетворение граничных условий (8), что позволяет существенно упростить правые части расчетных соотношений (9).

Построение общего решения задачи теплопроводности. Математическая формулировка данной задачи записывается следующим образом:

$$\nabla \frac{\partial \Theta}{\partial r} - n_7 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Theta = R_3; \quad (23)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} + n_{11} \Theta = n_{11} \mathcal{G}; \quad (24)$$

$$t = 0 \quad \Theta = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \Theta_0; \quad (25)$$

$$\text{где} \quad R_3 = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \left(n_8 \nabla U - n_9 \frac{\partial \phi}{\partial r} \right).$$

Процедура стандартизации граничных условий (24) выполняется с помощью замены $\Theta(r, t)$ новой функцией $L(r, t)$ с помощью такого разложения:

$$\Theta(r, t) = \mathcal{G} + L(r, t), \quad (26)$$

Подстановка (26) в (23) – (25) позволяет получить краевую задачу относительно функций $L(r, t)$ с однородными граничными условиями:

$$\nabla \frac{\partial L}{\partial r} - n_7 \left(\frac{\partial}{\partial t} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) L = R_3; \quad (27)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial L}{\partial r} + n_{11} L = 0; \quad (28)$$

$$t = 0 \quad L = -\mathcal{G}, \quad \frac{\partial L}{\partial t} = \Theta_0; \quad (29)$$

Использование обобщенного конечного интегрального преобразования (КИП) [21] путем введения неизвестной функции ядра преобразований $N(\mu_i, r)$:

$$Y(\mu_i, t) = \int_R^1 L(r, t) N(\mu_i, r) r dr, \quad (30)$$

$$L(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} Y(\mu_i, t) N(\mu_i, r) \|N_i\|^{-2}, \quad \|N_i\|^2 = \int_R^1 N(\lambda_i, r)^2 r dr,$$

позволяет получить задачи для трансформанты $Y(\mu_i, t)$:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) Y_i + \frac{\mu_i^2}{n_7} Y_i = F_H, \quad (31)$$

$$t = 0 \quad Y_0 = -\mathcal{G} \int_R^1 N r dr, \quad \frac{\partial Y_0}{\partial t} = \int_R^1 \Theta_0 r N dr; \quad (32)$$

и функции ядра преобразований

$$\frac{d^2 N}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dN}{dr} + \mu_i^2 N = 0, \quad (33)$$

$$r = R, 1 \quad \frac{\partial N}{\partial r} + n_{11} N = 0; \quad (34)$$

где $F_H = -\frac{1}{n_7} \int_R^1 R_3 r N dr$, μ_i – собственные значения.

Общий интеграл уравнения (31), с учетом начальных условий (32), имеет вид:

$$Y(t) = (p_1 - p_2)^{-1} \left\{ \frac{\partial Y_0}{\partial t} (\exp p_2 t - \exp p_1 t) + \int_0^t F_H(\tau) [\exp p_1(t - \tau) - \exp p_2(t - \tau)] d\tau \right\}, \quad (35)$$

а решение равенства (33) записывается следующим образом:

$$N(\mu_i, r) = E_{1i} J_0(\mu_i r) + E_{2i} Y_0(\mu_i r), \quad (36)$$

$$\text{где } p_{1,2} = \frac{-\beta^{-1} \pm \sqrt{\beta^{-2} - 4\mu_i^2 (\beta n_7)^{-1}}}{2}.$$

Подстановка (36) в граничные условия (34) формирует выражения для постоянных интегрирования E_{1i}, E_{2i} :

$$E_{1i} = n_{11} Y_0(\mu_i R) - \mu_i Y_1(\mu_i R), \quad E_{2i} = \mu_i J_1(\mu_i R) - n_{11} J_0(\mu_i R),$$

и трансцендентное уравнение для определения μ_i :

$$E_{1i} [n_{11} J_0(\mu_i) - \mu_i J_1(\mu_i)] + E_{2i} [n_{11} Y_0(\mu_i) - \mu_i Y_1(\mu_i)] = 0.$$

Окончательные выражения функции $\Theta(r, t)$ получим, применяя к трансформанте (35) формулу обращения (30).

В результате, с учетом (26), имеем:

$$\Theta(r, t) = \mathcal{G} + \sum_{i=1}^{\infty} Y(\mu_i, t) N(\mu_i, r) \|N_i\|^2. \quad (37)$$

Численный анализ результатов. В качестве примера рассматривается радиально поляризованный пьезокерамический цилиндр ($R = 0.8$, $b = 0.02$ м) состава PZT-4, имеющего следующие физические характеристики: $\{e_{31}, e_{33}\} = \{-5.2, 15.1\}$ Кл/м²,

$$\varepsilon_{33} = 5.62 \times 10^{-9} \text{ Ф/м}, \quad \{C_{11}, C_{33}, C_{13}\} = \{13.9, 11.5, 7.43\} \times 10^{10} \text{ Н/м}^2, \quad \rho = 7500 \text{ кг/м}^3,$$

$$\{\gamma_{11}, \gamma_{33}\} = \{4.6, 3.9\} \times 10^5 \text{ Н/(м}^2 \text{ К)}, \quad g_3 = 2 \times 10^{-4} \text{ Кл/(м}^2 \text{ К)}, \quad k = 3 \times 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \text{ К)}, \quad \Lambda = 1.6$$

Вт/(м К), $\alpha = 5.6 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ [16].

Рассматривается случай действия гармонической электрической нагрузки на поверхностях цилиндра:

$$V(t) = V_0 \sin \theta t,$$

где V_0, θ – амплитудное значение потенциала и частота вынужденных колебаний в безразмерной форме.

Обсуждение результатов. На рис. 1,2 представлены графики изменения перемещений $U(r, t)$ по времени t , а также потенциала $\phi(r, t)$ (кривая 1) и напряженности $E_r(r, t)$ (2) электрического поля по радиальной координате r ($\theta = 0.9\lambda_1$). Пунктирной линией обозначена оциллограмма внешней электрической нагрузки.

Анализ представленных графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. При высокочастотном внешнем воздействии ($\theta = 0.9\lambda_1$) вследствие наложения волн деформирования в электроупругой системе наблюдается сложная зависимость изменения перемещений во времени (рис. 1). Поэтому обычно применяемое, при исследовании подобных задач, допущение об установившемся режиме вынужденных колебаний можно использовать только при решении задач на собственные значения;
2. Использование гипотез о линейной зависимости потенциала $\phi(r, t)$ и постоянном значении напряженности $E_r(r, t) = \frac{\partial\phi(r, t)}{\partial r}$ электрического поля при исследовании задач обратного пьезоэффекта с помощью прикладных теорий не находят свое подтверждение при решении динамических задач (рис. 2).

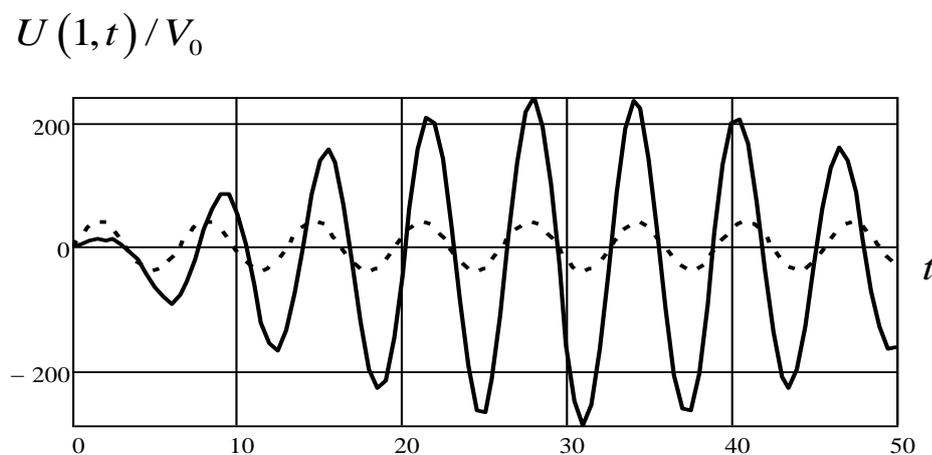


Рис.1. График изменения перемещений $U(1, t)$ по времени t
 Fig.1. Time displacement graph

При решении задачи теплопроводности на первом этапе решается обратная задача, связанная с определением скорости изменения температуры $\Theta_0(r) = \Theta_0$ в начальный момент времени. Величина Θ_0 определялась из условия, что в случае действия гармонической нагрузки при установившемся режиме в исследуемом элементе наблюдается постоянное температурное поле.

$$\{\phi(r, t), E_r(r, t) / 5\} / V_0$$

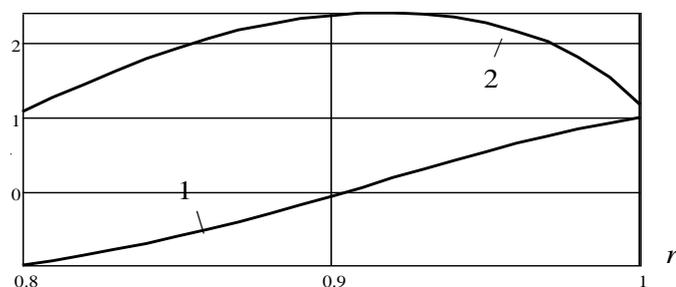


Рис.2. Графики изменения амплитудных значений потенциала $\phi(r, t)$ (кривая 1) и напряженности $E_r(r, t)$ (2) электрического поля по радиальной координате r
 Fig.2. Graphs of changes in the amplitude values of the potential (curve 1) and intensity (2) of the electric field along the radial coordinate

На рис. 3 представлены графики изменения температуры $\Theta^*(1,t)$ во времени t . Очевидно, при $t > 10$ условие $\frac{\partial \Theta^*(1,t)}{\partial t} = 0$ выполняется при $\Theta_0 = 1.9/V_0$ (рис. 3, график 1).

Здесь следует отметить, что полученные качественные результаты можно получить только при использовании гиперболической теории теплопроводности.

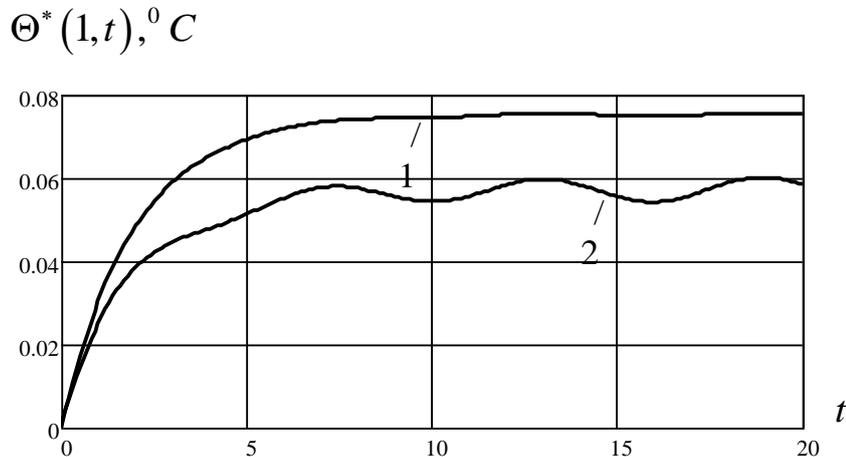


Рис.3. Графики изменения температуры $\Theta^*(1,t)$ по времени t
Fig.3. Temperature graphs over time
 (1 – $\Theta_0 = 1.9/V_0$, 2 – $\Theta_0 = 1.4 V_0$)

Принимая $T_0 = 295 K (22 ^\circ C)$, $\Theta_0 = 1.9/V_0$, $V_0^* = 10 B$, получаем следующую картину изменения температурного поля по радиальной координате в цилиндре (рис. 4). Цифрами 1,2 обозначены результаты для времени $t = 30, 7$.

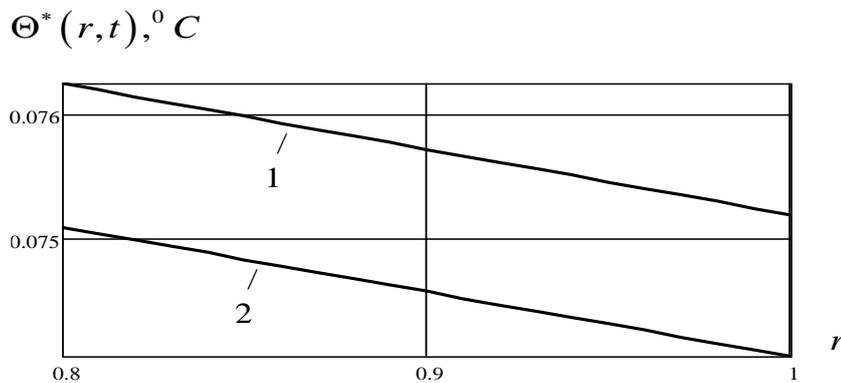


Рис.4. Графики изменения температуры $\Theta^*(1,t)$ по радиальной координате r (1– $t = 30$, 2– $t = 7$)

Fig.4. Temperature graphs $\Theta^*(1,t)$ along the radial coordinate r (1– $t = 30$, 2– $t = 7$)

Был выполнен эксперимент, где измерения температуры проводились с помощью прибора Center 301. Результаты показали, что температура на лицевых поверхностях исследуемого элемента при внешнем воздействии повысилась на $0.1 ^\circ C$, что практически повторяет результаты теоретических расчетов (рис.3,4).

Для оценки влияния температуры на электроупругое поле правые части дифференциальных уравнений R_1, R_2 (9), с учетом равенств (1), записываются следующим образом:

$$R_1 = \nabla \Theta - n_3 \frac{\Theta}{r} - \nabla \frac{\partial H_1}{\partial r} + n_1 \frac{H_1}{r^2} - \nabla \frac{\partial H_2}{\partial r} + n_2 \frac{1}{r} \frac{\partial H_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 H_1}{\partial t^2},$$

$$R_2 = -n_6 \nabla \Theta + \nabla \frac{\partial H_2}{\partial r} - n_4 \nabla \frac{\partial H_1}{\partial r} - n_5 \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial r}.$$

На рис.5 представлены зависимости " $U(1,t) - t$ " с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) влияния температуры на радиальные перемещения. Численный анализ результатов показывает, что температурное поле практически не влияет на величину $U(1,t)$, т.е. в задачах обратного пьезоэффекта можно пренебречь потерями энергии на нагрев электроупругой системы.

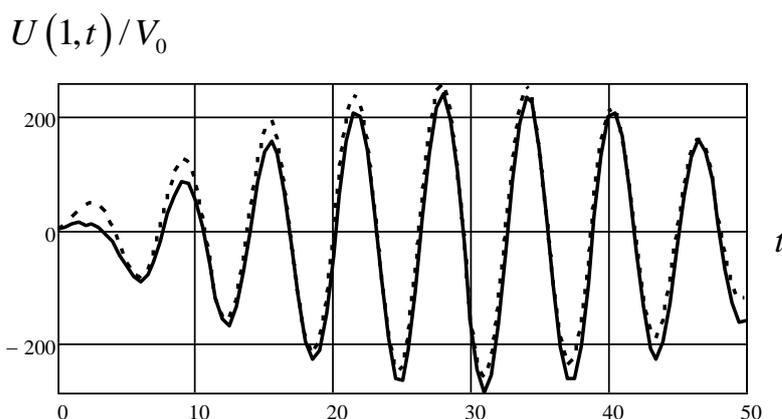


Рис.5. Графики изменения температуры $U(1,t)$ по времени t
 (сплошная и пунктирная линии – с учетом и без учета влияния температурного поля)
Fig.5. Temperature graphs $U(1,t)$ over time t

(solid and dotted lines - with and without taking into account the influence of the temperature field)

Вывод. Следует отметить, что при решении динамических задач прямого и обратного пьезоэффекта пьезокерамические элементы можно рассматривать, как консервативные системы.

Однако при решении нестационарных задач термоэлектроупругости в случае действия температурной нагрузки необходимо исследовать расчетные соотношения с учетом связанности упругих, электрических и тепловых полей [13].

Библиографический список:

1. Бобцов А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб ГУ ИТМО, 2011.131 с.
2. Джагуров Р.Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. СПб.: Политехника, 1994. 608 с.
3. Евсейчик Ю.Б., Медведев К.В. Чувствительность гидроакустического датчика давления // Гидравлика и гидротехника. Науч.- техн. сб. Киев: НТУ. 2008. Вып. 62. С. 10-16.
4. Янчевский И.В. Управление колебаниями изгиба круглого асимметричного биморфного пьезопреобразователя с разрезными электродами // Пробл. машиностроения. 2012. Т.15, № 2. С. 37-43.
5. Abedi M., Jafari-Talookolaei R., Valvo P. A new solution method for free vibration analysis of rectangular laminated composite plates with general stacking sequences and edge restraints // Computers & Structures. 2016. Vol. 175. pp. 144-156.
6. Berndt E.A., Sevostianov I. Action of a smooth flat charged punch on the piezoelectric half-space possessing symmetry of class // International Journal of Engineering Science. 2016. Vol. 103. pp. 77-96.
7. Abbas I.A., Youssef H.M. Finite element analysis of two-temperature generalized magneto-thermoelasticity/ Arch Appl Mech. 2009.79. 917-925.
8. He T. et al. A generalized electromagneto-thermoelastic problem for an infinitely long solid cylinder/ European Journal of Mechanics A-Solids. 24 (2005). pp.349-359.
9. Youssef H.M. Theory of two-temperature generalized thermoelasticity/ IMA J.Appl.Math. 71(3) (2006)/383-390.
10. Фирсанов В.В., Нгуен, Ле Хунг. Напряженно-деформированное состояние произвольных оболочек с учетом термоэлектрического воздействия на основе уточненной теории// Тепловые процессы в технике. 2010. №3. С.110-117.

11. Abbas I.A., Zenkour A.M. LS model on electro-magneto-thermoelastic response of an infinite functionally graded cylinder/ Composite Structures. 96. (2013) 89–96.
12. Ватульян А.О., Кирютенко А.Ю., Наседкин А.В. Плоские волны и фундаментальные решения в линейной термоэлектроупругости // ПМТФ. 1996. Т.37. №5. С.135–142.
13. Ватульян А.О., Нестеров С.А. Динамическая задача термоэлектроупругости для функционально-градиентного слоя // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т.10. №2. С.117–126.
14. Белянкова Т.И., Калинин В.В. К моделированию преднапряженного термоэлектроупругого полупространства с покрытием // Изв. РАН. МТТ. 2017. № 1. С. 117–135.
15. Ватульян А.О., Рынкova А.А. Об одной модели изгибных колебаний пьезоэлектрических биморфов с разрезными электродами и ее приложениях // Изв. РАН. МТТ. 2007. №4. С. 114–122.
16. Бардзокас Д.И. Математическое моделирование в задачах механики связанных полей. Т. II: Статические и динамические задачи электроупругости для составных многосвязных тел. М.: Комкнига, 2005. 376 с.
17. Шляхин Д.А. Вынужденные осесимметричные колебания пьезокерамической тонкой биморфной пластины // Изв. РАН. МТТ. 2013. №2. С. 77–85.
18. Шляхин Д.А. Вынужденные осесимметричные колебания толстой круглой жестко закрепленной пьезокерамической пластины // Изв. РАН. МТТ. 2014. №4. С. 90–100.
19. Коваленко А.Д. Введение в термоупругость. Киев: Наук. думка, 1965. 204 с.
20. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Киев: Наук. думка, 1989. 279 с.
21. Сеницкий Ю.Э. Метод конечных интегральных преобразований – обобщение классической процедуры разложения по собственным вектор-функциям // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Матем., механ., информатика, 2011. № 3(1). С. 61–89.
22. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1965. 703 с.

References:

1. Bobtsov A.A. Iсполnitelnyye ustroystva i sistemy dlya mikroperemescheniy. SPb GU ITMO, 2011. 131 s. [Bobtsov A.A. Actuators and systems for micromovements. - SPb GU ITMO, 2011. 131 p. (In Russ)]
2. Dzhagurov R.G. Pezoelektronnyye ustroystva vychislitel'noy tehniki, sistem kon-trolya i upravleniya. SPb.: Politehnika, 1994. 608 s. [Dzhagurov R.G. Piezoelectronic devices of computer technology, control and management systems. SPb.: Polytechnic, 1994. 608 p. (In Russ)]
3. Yevseychik Y.B., Medvedev K.V. Sensitivity of the hydroacoustic pressure sensor // Hydraulics and hydraulic engineering. Scientific and technical Sat. Kiev: NTU. 2008. Issue. 62. pp. 10–16
4. Yanchevskiy I.V. Upravlenie kolebaniyami izgiba kruglogo asimmetrichnogo bi-morf'nogo pezo-preobrazovatelya s razreznymi elektrodami // Probl. mashinostroeniya. 2012. T.15, № 2. S. 37–43 [Yanchevsky I.V. Control of bending vibrations of a circular asymmetric bi-morphic piezoelectric transducer with split electrodes // Probl. mechanical engineering. 2012. T.15, No. 2. pp. 37–43 (In Russ)]
5. Abedi M., Jafari-Talookolaei R., Valvo P. A new solution method for free vibration analysis of rectangular laminated composite plates with general stacking sequences and edge restraints // Computers & Structures. 2016. Vol. 175. pp. 144–156.
6. Berndt E.A., Sevostianov I. Action of a smooth flat charged punch on the piezoelectric half-space possessing symmetry of class // International Journal of Engineering Science. 2016. Vol. 103. pp. 77–96.
7. Abbas I.A., Youssef H.M. Finite element analysis of two-temperature generalized magneto-thermoelasticity/ Arch Appl Mech. 2009.79. 917–925.
8. He T. et al. A generalized electromagneto-thermoelastic problem for an infinitely long solid cylinder / European Journal of Mechanics A–Solids. 24 (2005).pp.349–359.
9. Youssef H.M. Theory of two-temperature generalized thermoelasticity/ IMA J.Appl.Math. 71(3) (2006)/383–390.
10. Firsanov V.V., Nguen, Le Hung. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye proiz-volnykh obolochek s uchedom termoelektricheskogo vozdeystviya na osnove utochnennoy teorii // Teplovyie protsessy v tehnike. 2010. – №3. pp.110–117.
11. Abbas I.A., Zenkour A.M. LS model on electro-magneto-thermoelastic response of an infinite functionally graded cylinder/ Composite Structures. 96. (2013) 89–96.
12. Vatulyan A.O., Kiryutenko A.Yu., Nasedkin A.V. Ploskie volny i fundamentalnyye resheniya v lineynoy termoelektro-uprugosti // PMTF. –1996. –Т.37. –№5. – S.135–142 [Vatulyan A.O., Kiryutenko A.Yu., Nasedkin A.V. Plane waves and fundamental solutions in linear thermoelectroelasticity // PMTF. 1996. T.37. №5. pp.135–142 (In Russ)]
13. Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Dinamicheskaya zadacha termoelektro-uprugosti dlya funktsionalno-gradientnogo sloya// Vychislitel'naya mehanika sploshnykh sred. 2017. T.10. №2. S.117–126 [Vatulyan A.O., Nesterov S.A. Dynamic problem of thermoelectroelasticity for a functional-gradient layer // Computational mechanics of continuous media. 2017. T.10. №2. pp.117–126 (In Russ)]
14. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. K modelirovaniyu prednapryazhennogo termoelekt-rouprugogo poluprostranstva s pokrytiem // Izv. RAN. MTT. 2017. № 1. S. 117–135 [Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. On modeling a prestressed thermoelectroelastic half-space with a coating. Izv. RAS. MTT. 2017. No. 1. pp. 117–135 (In Russ)]
15. Vatulyan A.O., Ryinkova A.A. Ob odnoy modeli izgibnykh kolebaniy pezo-elektri-cheskikh bimorfov s razreznymi elektrodami i ee prilozheniyah// Izv. RAN. MTT. 2007. №4. S. 114–122 [Vatulyan A.O., Rynkova A.A. On one model of bending vibrations of piezoelectric bimorphs with split electrodes and its applications // Izv. RAN. MTT. 2007. No. 4. pp. 114–122 (In Russ)]
16. Bardzokas D.I. Matematicheskoye modelirovaniye v zadachah mehaniki svyazannykh po-ley. T.II: Sticheskie i dinamicheskie zadachi elektro-uprugosti dlya sostavnykh mnogo-svyaznykh tel. – М.: Komkniга, 2005. 376 s. [Bardzokas D.I. Mathematical

- modeling in problems of mechanics of coupled fields. Vol. II: Static and dynamic problems of electroelasticity for compound multi-connected bodies. М.: Komkniga, 2005. 376 p. (In Russ)]
17. Shlyahin D.A. Vyinuzhdennyye osesimmetrichnyye kolebaniya pezoeramicheskoy ton-koy bimorfnoy plastiny // Izv. RAN. MTT. 2013. №2. S. 77–85 [Shlyahin D.A. Forced axisymmetric vibrations of a piezoceramic thin bimorph plate // Izv. RAS. MTT. 2013. №2. pp. 77–85. (In Russ)]
 18. Shlyahin D.A. Vyinuzhdennyye osesimmetrichnyye kolebaniya tolstoy krugloy zhestko zakreplennoy pezoeramicheskoy plastiny // Izv. RAN. MTT. 2014. №4. S. 90-100 [Shlyahin D.A. Forced axisymmetric vibrations of a thick circular rigidly fixed piezoceramic plate // Izv. RAS. MTT. 2014. №4. pp. 90–100. (In Russ)]
 19. Kovalenko A.D. Vvedenie v termouprugost. –Kiev: Nauk. dumka, 1965. –204 s. [Kovalenko A.D. Introduction to thermoelasticity. Kiev: Nauk. dumka, 1965. 204 p. (In Russ)]
 20. Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shulga N.A. Mechanics of linked fields in structural elements. Kiev: Nauk. dumka, 1989. 279 p.
 21. Senitskiy Yu.E. Metod konechnykh integralnykh preobrazovaniy – obobshchenie klassicheskoy protsedury razlozheniya po sobstvennyim vektor-funktsiyam // Izv. Sara-tovskogo un-ta. Novaya seriya. Matem., mehan., informatika, 2011. № 3(1). S. 61–89. [Senitskiy Yu.E. The method of finite integral transformations is a generalization of the classical procedure for expansion in eigenvector functions // Izv. Saratovskiy University. New series. Mat., Mechan., Informatics, 2011. No. 3 (1). pp. 61-89. (In Russ)]
 22. Kamke E. Spravochnik po obyiknovennym differentsialnyim uravneniyam. М.: Nauka, 1965. 703 s. [Kamke E. Handbook of ordinary differential equations. М.: Nauka, 1965. 703 p. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Кальмова Мария Александровна, старший преподаватель кафедры строительная механика, инженерная геология, основания и фундаменты, e-mail: kalmova@inbox.ru

Information about the authors:

Kalmova Maria Aleksandrovna, senior lecturer of the department of structural mechanics, engineering geology, foundations and foundations, e-mail: kalmova@inbox.ru

Конфликт интересов:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.10.2020.

Принята в печать 14.11.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 12.10.2020.

Accepted for publication 14.11.2020.

Для цитирования А.В. Месропян, Р.Р. Рахматуллин. Исследование влияния геометрии корпуса на буксировочное сопротивление самоходных паромов при преодолении водных преград. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47(4):69-80. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-69-80

For citation: A.V. Mesropyan, R.R. Rakhmatullin. Study of the effect of hull geometry on the towing resistance of motor ferries when overcoming water obstacles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):69-80. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-69-80

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 623.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-69-80

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КОРПУСА НА БУКСИРОВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ САМОХОДНЫХ ПАРОМОВ ПРИ ПРЕОДОЛЕНИИ ВОДНЫХ ПРЕГРАД

А.В. Месропян, Р.Р. Рахматуллин

*Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ),
450008, г. Уфа, ул.К.Маркса, 12, Россия*

Резюме. Цель. В статье приведены результаты исследования влияния геометрии корпуса на буксировочное сопротивление и скорость движения на воде паромных машин при преодолении водных преград. **Метод.** Для исследования степени влияния геометрии корпуса на сопротивление воды движению паромной машины применяются методы трехмерного моделирования в САД- и САЕ- пакетах, позволяющие с достоверной точностью моделировать рабочие процессы, протекающие при обтекании самоходных паромов. **Результат.** Проведен анализ результатов численного моделирования движения по воде паромной машины исходной конструкции. Определены достоинства и недостатки паромно-мостовой машины исходной конструкции, предложены различные варианты исполнения конструктивно-компоновочных схем, использование которых позволяет добиться повышения скоростных и маневровых характеристик паромных машин. **Вывод.** Предложен вариант конструктивно-компоновочной схемы самоходного парома, позволяющий добиться повышения гидродинамических характеристик корпуса паромной машины путем использования современных технических решений, направленных на снижение буксировочного сопротивления и повышения скорости транспортировки при преодолении водных преград.

Ключевые слова: паромно-мостовая машина, буксировочное сопротивление, конструктивно-компоновочная схема, машина-амфибия, моделирование рабочих процессов, самоходный паром

STUDY OF THE EFFECT OF HULL GEOMETRY ON THE TOWING RESISTANCE OF MOTOR FERRIES WHEN OVERCOMING WATER OBSTACLES

A.V. Mesropyan, R.R. Rakhmatullin

*Ufa State Aviation Technical University (USATU),
12 K. Marx St., Ufa 450008, Russia*

Abstract. Objective. The article studies the influence of the hull geometry on the towing resistance and speed of ferry vehicles on the water when overcoming water obstacles. **Methods.** 3D modeling methods are used in CAD and CAE packages to study the degree of influence of the hull geometry on the water resistance to the movement of the ferry vehicle, which makes it possible to accurately model the working processes occurring when flowing around motor ferries. **Results.** The analysis of the results of computer simulation of the movement of a ferry vehicle of the original design on the water is carried out. The advantages and disadvantages of the ferry bridge machine of the original design are determined, and various variants of design and layout schemes are proposed, the use of

which allows increasing the speed and maneuvering characteristics of ferry vehicles. **Conclusion.** A variant of the design and layout scheme of a motor ferry is proposed, which allows improving the hydrodynamic characteristics of the ferry vehicle body by using modern technical solutions aimed at reducing towing resistance and increasing the speed of transportation when overcoming water obstacles.

Keywords: ferry-bridge machine, towing resistance, structural and layout scheme, amphibious vehicle, working processes modeling, motor ferry

Введение. Глубокая модернизация паромной техники, находящейся на вооружении в частях МО и МЧС, предъявляет все более высокие требования к грузоподъемности, скоростным и маневровым характеристикам машин подобного класса. В условиях ограничений доступной мощности, передаваемой на водоходный движитель, существенное значение приобретает оптимизация геометрии корпуса и компоновки составных элементов паромно-мостовых машин с целью уменьшения буксировочного сопротивления и повышения скорости движения на воде машин-амфибий.

Сопротивление воды движению амфибий главным образом зависит от размеров и форм корпуса, от конструкции ходовой части, от скорости движения, глубины водной преграды и других условий эксплуатации.

Постановка задачи. Для исследования влияния геометрии корпуса паромной техники рассматривается определение сопротивления воды движению корпуса в программном комплексе (ПК) *Ansys CFX* на примере паромно-мостовой машины ПММ-2М (рис. 1). В отличие от традиционных методов определения буксировочного сопротивления амфибийных машин по эмпирическим зависимостям [1-5], трехмерное численное моделирование позволяет учитывать особенности геометрии корпуса и выступающих элементов ходовой части [6-12].



Рис.1. Паромно-мостовая машина ПММ-2М
Fig.1. Ferry-bridge machine PMM-2M

Методы исследования. Подготовка трехмерной модели паромной машины для численного моделирования проводится в ПК КОМПАС-3D, где строится 3D-модель ПММ-2М исходной конструкции с требуемой проработкой элементов ходовой части, корпуса и понтонов, находящихся ниже уровня ватерлинии (рис. 2).

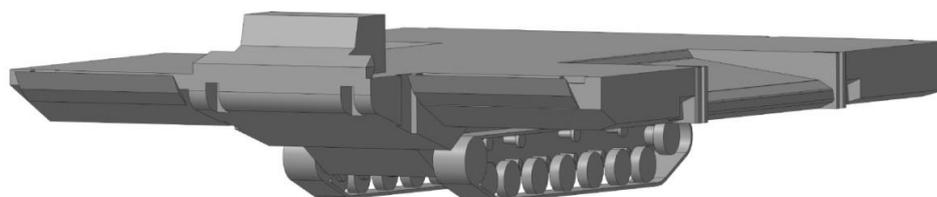


Рис.2. Трехмерная твердотельная модель паромно-мостовой машины ПММ-2М
Fig.2. Three-dimensional solid model of the PMM-2M ferry bridge machine

Расчетная область моделирования для определения буксировочного сопротивления паромной машины представляет собой параллелепипед (рис.3) с размерами, исключающими влияние краевых эффектов [1,6]. Расчеты ведутся для ПММ в загруженном состоянии с максимальной осадкой и при нулевом дифференте.

В *Ansys Mesh* расчетная область разбивается на неструктурированную тетраэдрическую сетку с замелечением ячеек в области амфибийной машины и структурированной сеткой для пограничного слоя, с количеством ячеек 8 млн.

В *CFX-Pre* настраиваются граничные условия для расчетной математической модели с использованием модели турбулентности $k-\epsilon$, возможностью варьирования скорости потока на входе от 0 до 13 км/ч, гидростатическим распределением давления ниже свободной поверхности.

На рис.3 представлена настроенная математическая модель расчетной области.

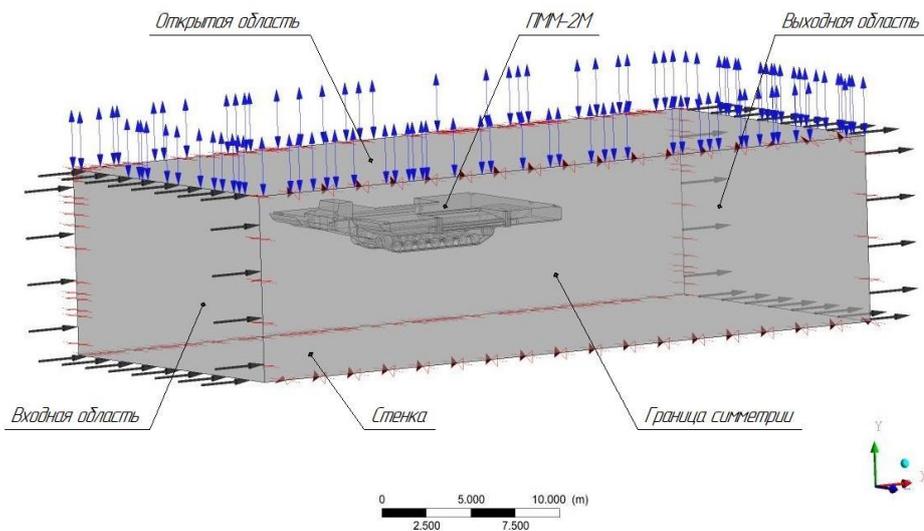


Рис.3. Расчетная область определения буксировочного сопротивления паромной машины
Fig.3. Calculated area for determining the towing resistance of a ferry machine

Расчет проводится в *CFX-Solver* до получения погрешности не более 10^{-4} по каждому из гидродинамических параметров (скорость, давление, массовый расход, параметры турбулентности).

Результаты расчета для исходной компоновки представлены на рис. 4-9.

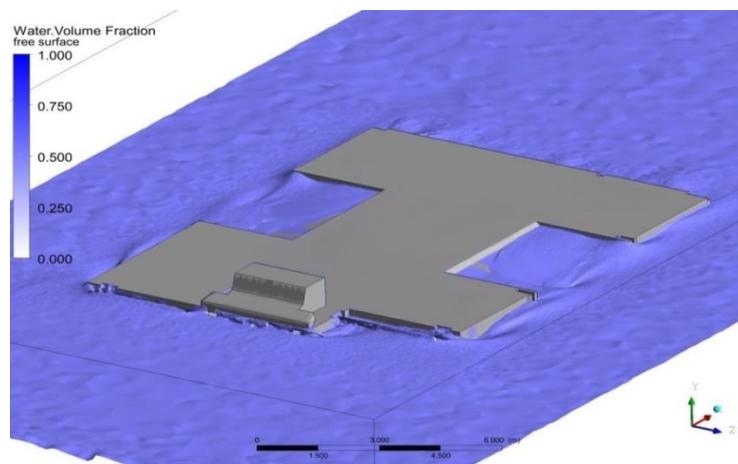


Рис.4. Обтекание корпуса ПММ-2М при движении на скорости 10 км/ч
Fig.4. Flow around the PMM-2M hull when driving at a speed of 10 km / h

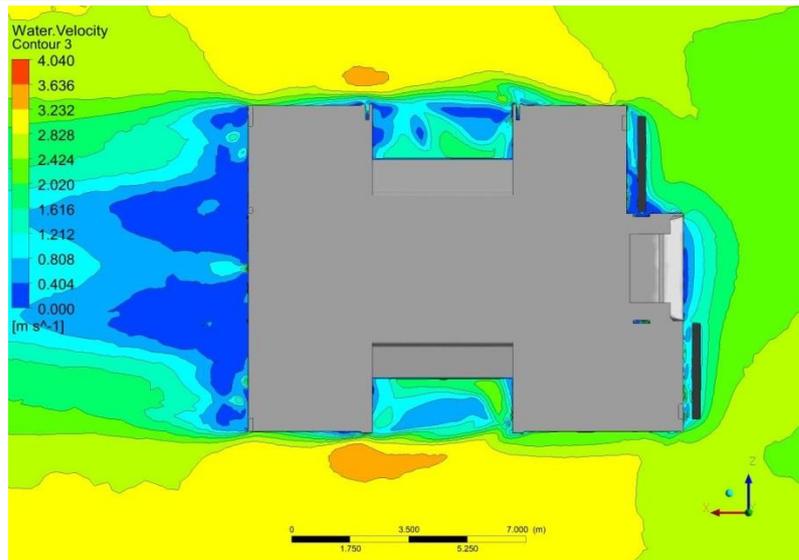


Рис.5. Поле скоростей на плоскости ватерлинии при движении ПММ-2М
Fig.5. The field of velocities on the plane of the waterline when moving PMM-2M

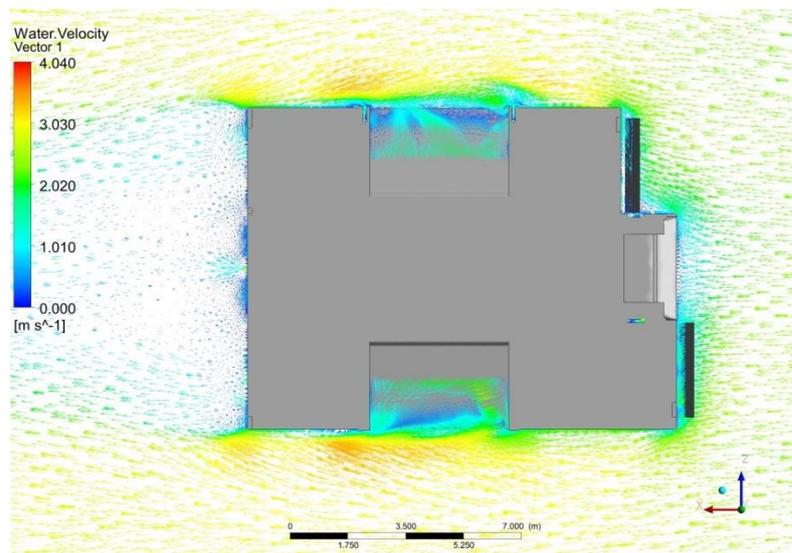


Рис.6. Векторное поле скоростей на плоскости ватерлинии при движении ПММ-2М
Fig.6. Vector field of velocities on the plane of the waterline when moving PMM-2M

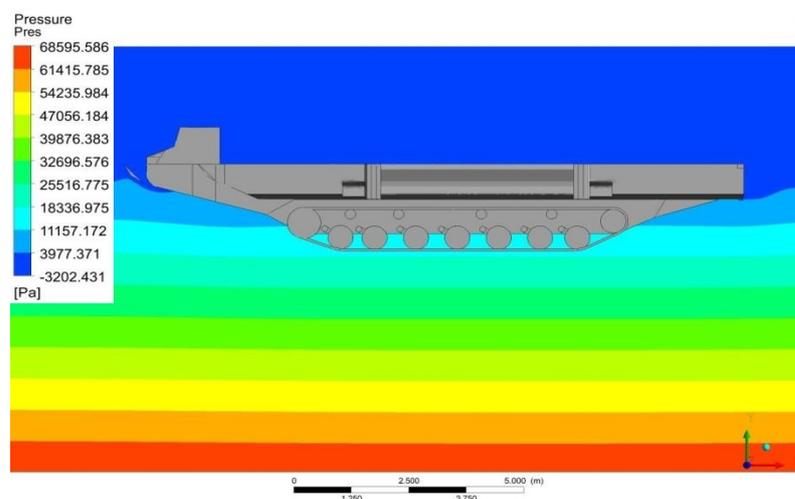


Рис.7. Гидростатическое распределение давления
Fig.7. Hydrostatic pressure distribution

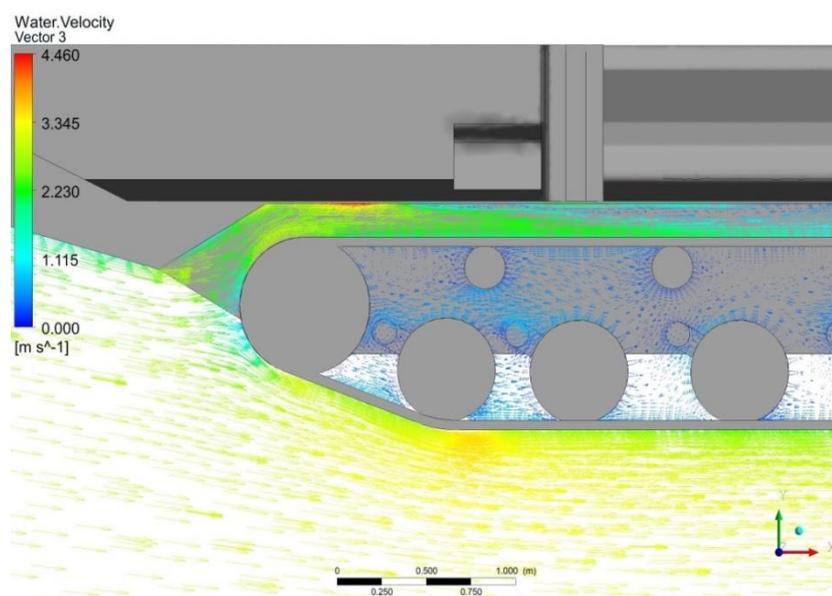


Рис. 8. Векторное поле скоростей в области гусеничного движителя ПММ-2М
Fig. 8. Vector field of velocities in the area of the tracked mover PMM-2M

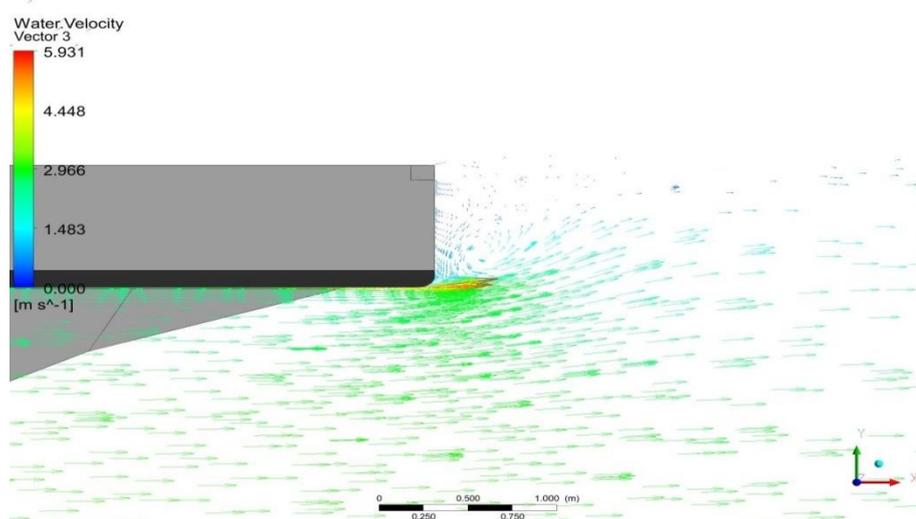


Рис. 9. Векторное поле скоростей в кормовой части понтона ПММ-2М
Fig. 9. Vector field of velocities in the aft part of the pontoon PMM-2M

Обсуждение результатов. Анализ результатов численного моделирования, приведенный на рис. 4, показывает, что при движении паромной машины возникает ярко выраженная носовая волна и менее выраженная волна в кормовой части машины.

Кроме них, в проезжей части грузовой платформы возникают дополнительные волны, приводящие к увеличению сопротивления машины и появлению вихребразований. Эти волны могут интерферировать, что при благоприятной интерференции приводит к некоторому уменьшению сопротивления, при неблагоприятных – к увеличению [1].

Форма корпуса паромной машины в плоскости ватерлинии (рис. 5-6) близка к прямоугольной (отношение длины машины к ширине $L/B=1,3$).

При такой форме корпуса линии тока воды, огибающие кормовую часть машины и бортовые ниши, не замыкаются непосредственно за кормой, основная часть потока отделяется от задней плоскости кормы, оставляя за ней пространство, характеризующееся сравнительно низкими давлениями и насыщенное крупными вихрями [1].

Разная картина обтекания паромной машины с правой и левой ее стороны обусловлена несимметричностью ПММ-2М относительно продольной плоскости базовой машины. Отрыв-

ные течения в кормовой части ПММ-2М, представленные на рис. 6, 9, существенно влияют на структуру и скорость потока, подходящего к водоходному движителю, что значительно меняет условия работы гребных винтов, уменьшая их упор, момент и КПД.

На рис. 8 представлены результаты моделирования, которые показывают вектора скоростей в гусеничном движителе паромной машины. Сопротивление, вызываемое элементами ходовой части машины-амфибии, достигает 30-45% от общего сопротивления воды, в зависимости от типа ходовой части, степени ее погружения в воду и размеров корпусных ниш для размещения ходовой части. При этом распределение сопротивления воды между корпусом и ходовой частью изменяется по мере увеличения скорости движения на воде.

По результатам численного моделирования построена зависимость распределения сопротивления воды между корпусом и гусеничным движителем, представленная на рис. 10.

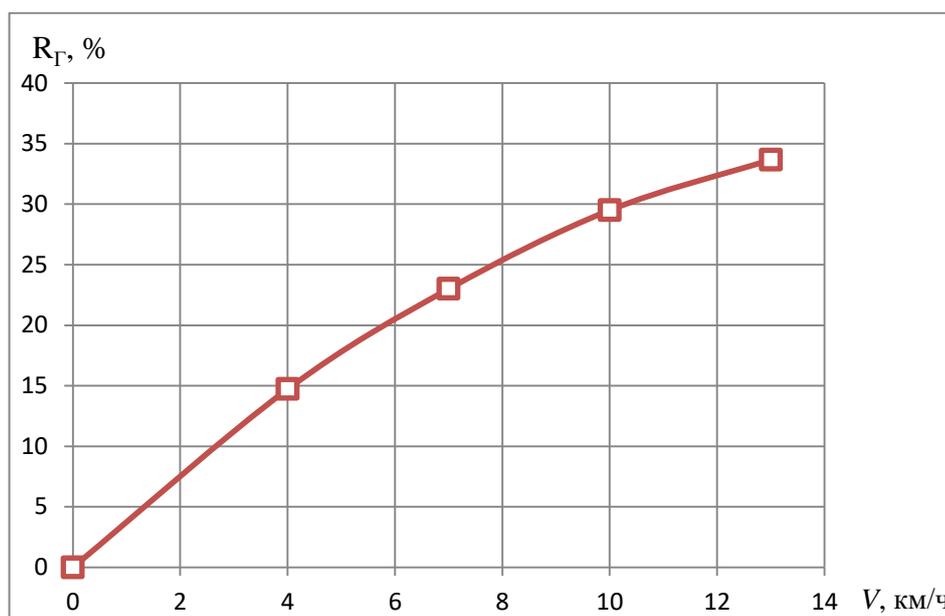


Рис. 10. Зависимость сопротивления ходовой части (в процентах от общего значения буксировочного сопротивления паромной машины) от скорости движения на воде

Fig. 10. Dependence of the resistance of the undercarriage (as a percentage of the total towing resistance of the ferry vehicle) on the speed of movement on the water

Результаты расчета, представленные на графике (рис.10), показывают, что распределение сопротивления происходит по корневой функции, при этом максимальное сопротивление достигает 34% от общего буксировочного сопротивления.

На величину сопротивления гусеничного движителя оказывает влияние ширина траков, их форма, размеры, количество опорных и поддерживающих катков. Сопротивление воды, создаваемое только гусеничной цепью, достигает 25%, катками – от 7 до 10% от общего сопротивления [1].

Учитывая описанные выше особенности исходной компоновки паромно-мостовой машины ПММ-2М, целесообразно изменение конструкции, направленное на увеличение скорости движения по воде и уменьшение буксировочного сопротивления машины-амфибии.

Различные варианты исследуемых конструкций представлены на рис. 11.

На основе модели исходной конструкции строятся модели ПММ с измененной компоновкой: с разнесенными понтонами (рис. 11, а), со скосами в кормовой части понтонов (рис. 11, б), с волнорезом (рис. 11, в) и с поднятой и закрытой ходовой частью (рис. 11, г).

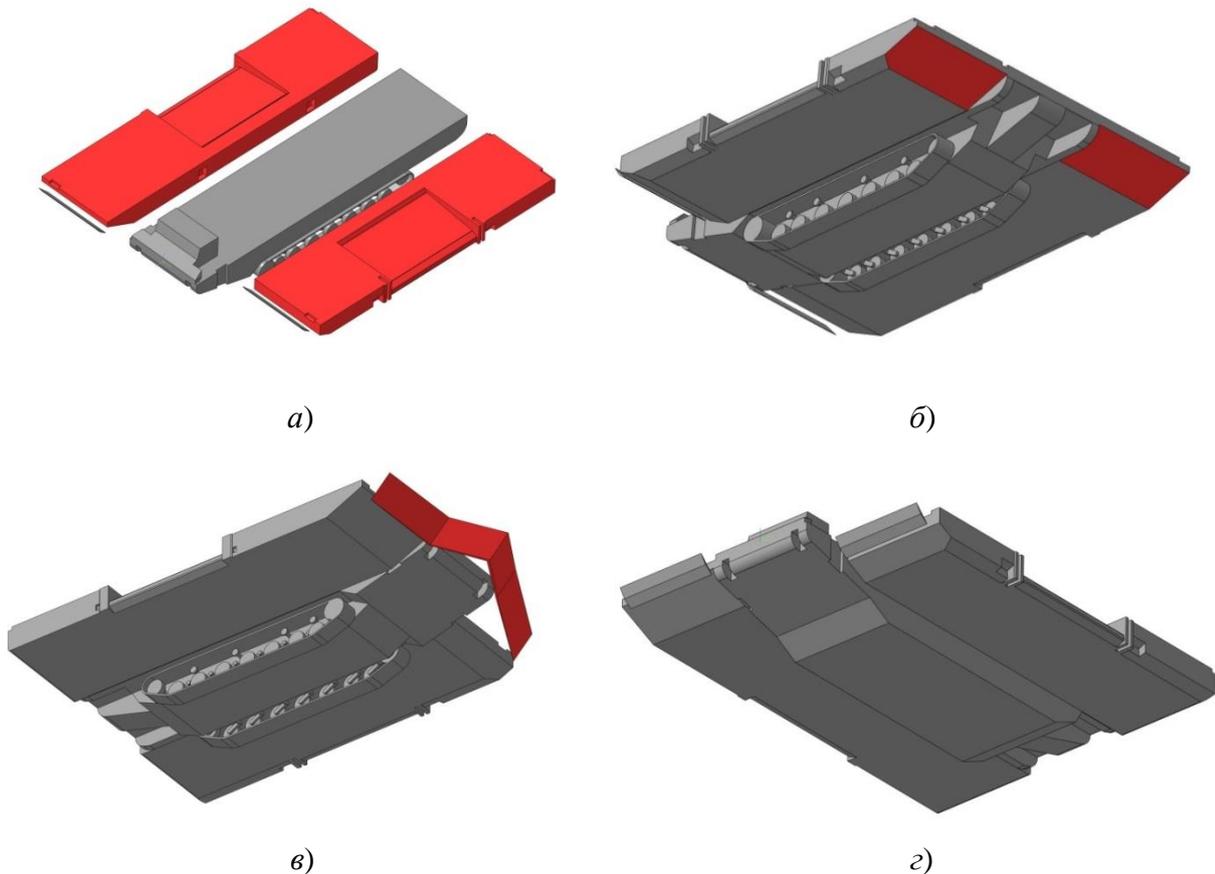


Рис. 11. Различные варианты исследуемых компоновок ПММ-2М
a – модель ПММ-2М с разнесенными понтонами; *б* – модель ПММ-2М со скосами на корме; *в* – модель ПММ-2М с волнорезом; *з* – модель ПММ-2М с убраным гусеничным движителем

Fig. 11. Various variants of the investigated assemblies PMM-2M
a - model PMM-2M with spaced pontoons; *б* - model PMM-2M with bevels at the stern;
в - model PMM-2M with a breakwater; *з* - model PMM-2M with retracted tracked mover

Вариант паромной машины с волнорезом требует дополнительных исследований влияния углов установки волнореза α и β (рис. 12) на буксировочное сопротивление ПММ-2М с целью определения оптимальных углов расположения элементов волнореза. Результаты расчета вариантов установки волнореза представлены на рис. 13.

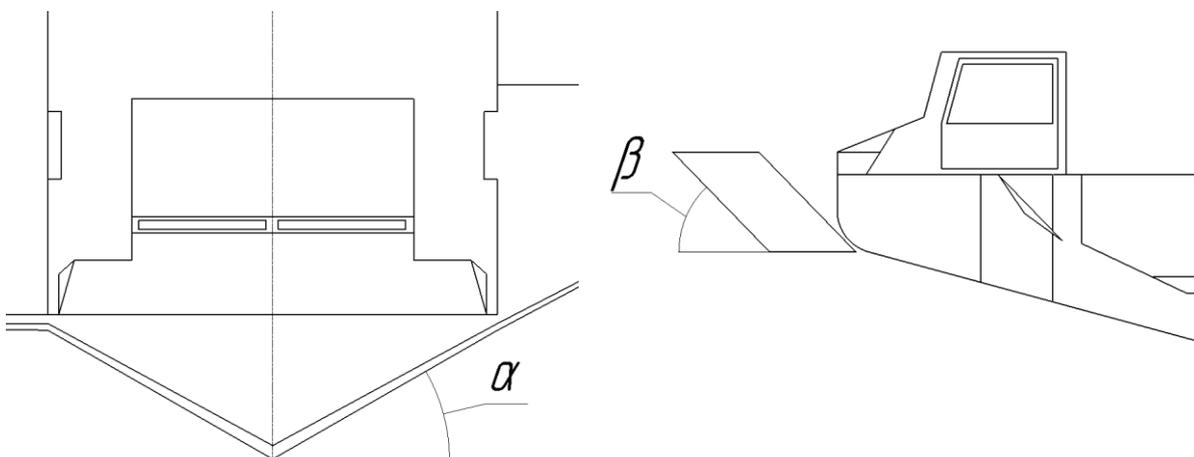


Рис. 12. Конструктивные углы установки элементов волнореза
Fig. 12. Constructive angles of installation of breakwater elements

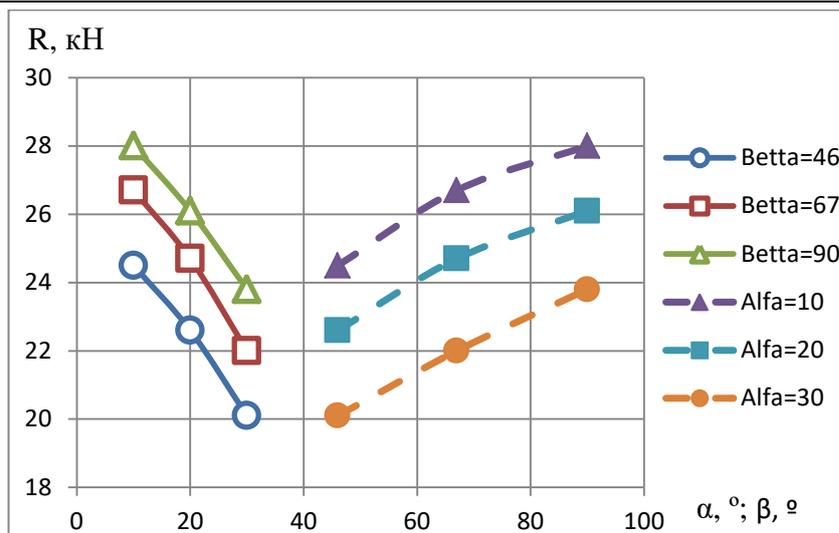


Рис. 13. Зависимость сопротивления корпуса ПММ-2М от конструктивных углов установки элементов волнореза

Fig. 13. Dependence of the resistance of the PMM-2M body on the design angles of installation of the breakwater elements

Анализ результатов моделирования показывает, что наименьшим буксировочным сопротивлением обладает паромная машина с углами установки элементов волнореза $\alpha = 30^\circ$ и $\beta = 46^\circ$, что обуславливается благоприятными условиями обтекания корпуса, и используется в дальнейших расчетах определения буксировочного сопротивления варианта ПММ-2М с волнорезом.

Результаты численного моделирования рассматриваемых вариантов исполнений паромно-мостовой машины приведены на рис. 14 в виде графика зависимости буксировочного сопротивления корпуса ПММ-2М от ее скорости движения на воде (рис. 14).

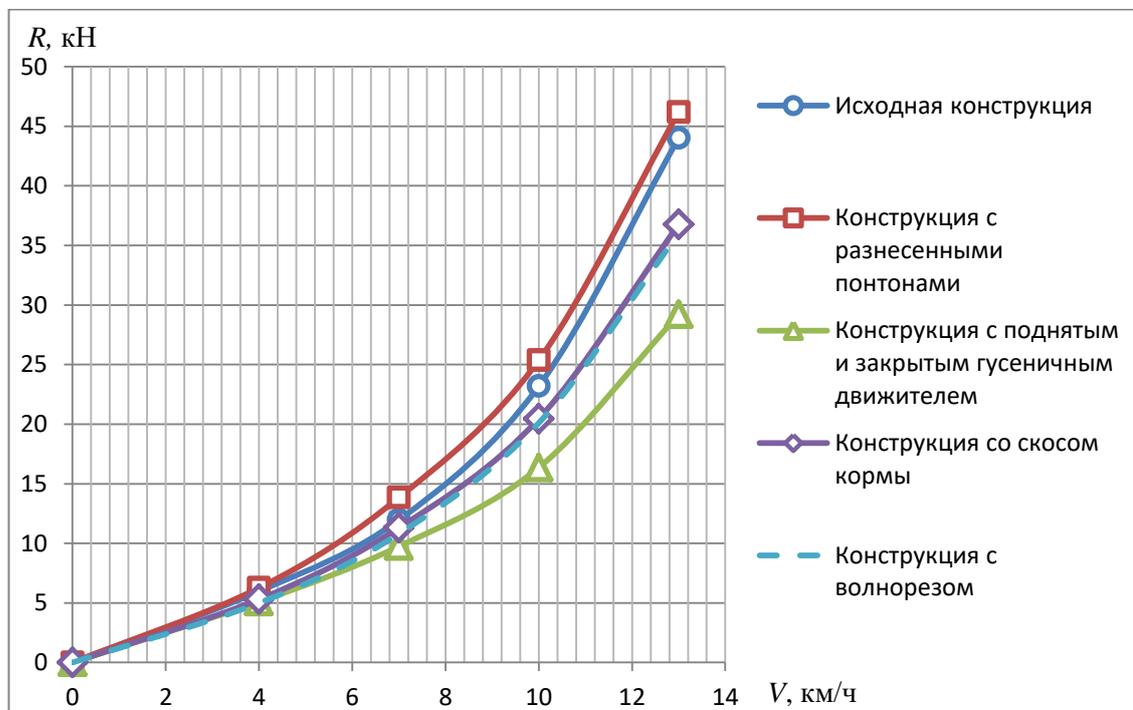


Рис. 14. Зависимость сопротивления корпуса ПММ от скорости движения по воде

Fig. 14. Dependence of the resistance of the PMM body on the speed of movement on water

Анализ полученных результатов показывает, что вариант компоновки амфибийной машины с разнесенными понтонами обладает наибольшим сопротивлением, хоть и имеет большую устойчивость. Увеличение сопротивления происходит из-за увеличения площади смочен-

ной поверхности и появления дополнительных вихревых течений между понтонами и корпусом машины (рис.15). При увеличении площади смоченной поверхности на 5%, сопротивление возрастает на 9%, что в конечном итоге приводит к снижению скорости на 4%.

Конструкции с волнорезом и со скосом понтонов в кормовой части имеют практически равные значения сопротивления воды движению паромной машины.

Обтекание кормовой части паромной машины при использовании скосов в продольной плоскости происходит более плавно (рис.16), без отрывных течений. Отсутствие завихрений и отрывных течений благоприятно сказывается на рабочем процессе водоходных движителей, позволяя им работать в невозмущенном потоке без потерь упора и КПД [1, 13, 14]. В свою очередь скосы в кормовой части паромно-мостовой машины уменьшают полезный объем, из-за чего грузоподъемность паромной машины уменьшается на 5%.

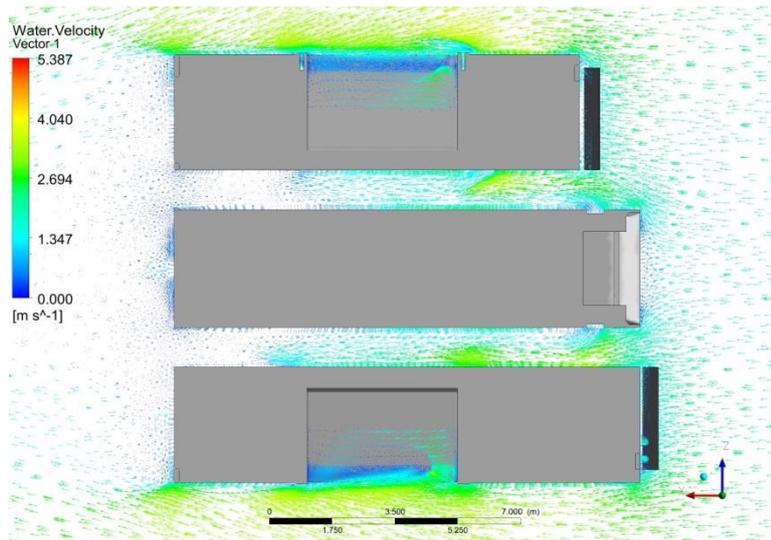


Рис. 15. Векторное поле скоростей на плоскости ватерлинии при движении варианта ПММ-2М с разнесенными понтонами

Fig. 15. Vector field of velocities on the plane of the waterline during the movement of the PMM-2M version with spaced pontoons

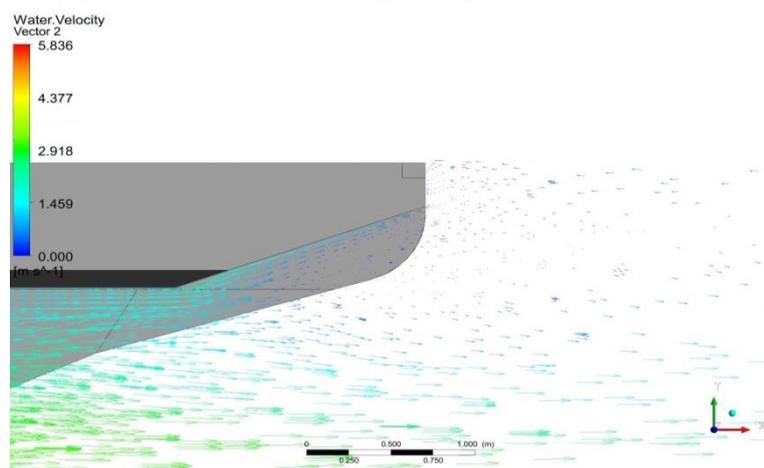


Рис. 16. Векторное поле скоростей в кормовой части ПММ-2М со скосом понтонов

Fig. 16. Vector field of velocities in the aft part of the PMM-2M with a bevel of the pontoons

Использование волнореза позволяет обеспечить более плавное обтекание корпуса паромной машины (рис.17), что позволяет снизить сопротивление корпуса на 15% и увеличить скорость движения по воде на 6%, по сравнению с машиной исходной конструкции. В то же время, для обеспечения функционирования волнореза сложной геометрии требуется учесть множество факторов, такие как, кинематика складывания и раскладывания составных элемен-

тов волнореза, обеспечение их сохранности в транспортном положении, ремонтпригодность в полевых условиях и т.д.

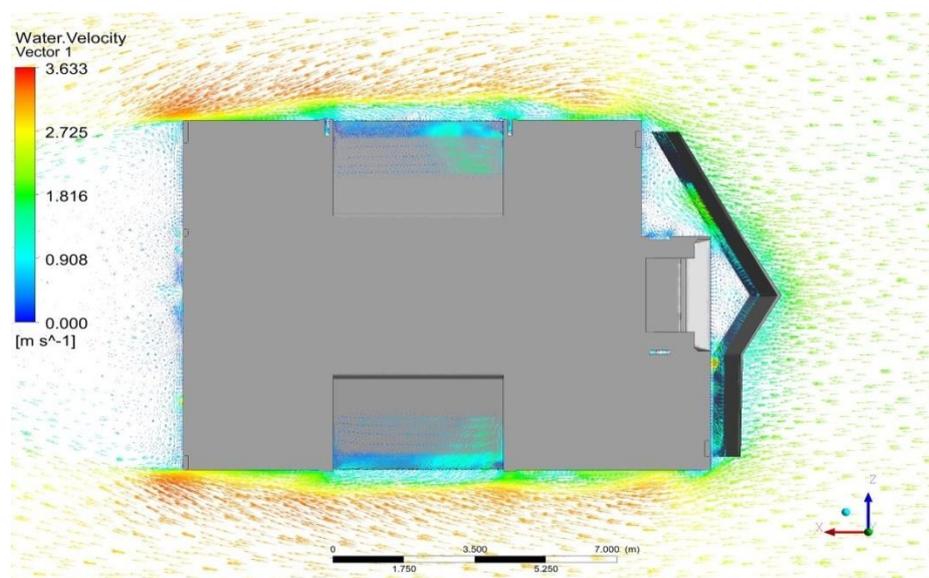


Рис. 17. Векторное поле скоростей на плоскости ватерлинии при движении варианта ПММ-2М с волнорезом

Fig. 17. Vector field of velocities on the plane of the waterline during the movement of the PMM-2M version with a breakwater

Минимальным сопротивлением обладает вариант компоновки паромной машины с поднятым и закрытым гусеничным движителем. Отсутствие «сухопутного» движителя позволяет уменьшить сопротивление ПММ-2М на 31%, обеспечив при этом повышение скорости движения на воде на 16%. Недостатком используемой конструкции является увеличенная масса из-за дополнительных механизмов подъема и опускания элементов ходовой части с возможностью их закрытия специальными щитками.

Вывод. Анализ проведенных исследований показывает, что наиболее оптимальным и менее затратным способом улучшения гидродинамических характеристик корпуса паромной машины является конструкция ПММ с волнорезом, который не требует внесения изменений в силовую схему конструкции паромной машины, позволяя проводить ремонт и модернизацию техники в кратчайшие сроки и с минимальными затратами.

Таким образом, по результатам проведенных исследований, выявлена целесообразность проведения работ, направленных на доработку конструктивно-компоновочной схемы ПММ-2М за счет применения таких технических решений, как установка волнореза и механизмов подъема и опускания элементов гусеничного движителя, закрытие ходовой части специальными щитками, использование дополнительных объемов для увеличения плавучести (пустотелых опорных катков, надувных емкостей под днищем парома, выдвижных объемов из понтонов [15, 16] и т.д.). Реализация указанных мер будет способствовать повышению гидродинамических характеристик корпусов паромных машин, снижению буксировочного сопротивления и повышению скорости транспортировки при преодолении водных преград.

Библиографический список:

1. Степанов А. П. Проектирование амфибийных машин. М.: Мегалион, 2007. 420 с.
2. Веретенников А. И. Особенности расчета сопротивления движению боевой колесной машины на плаву / А. И. Веретенников, Ю. М. Мушинский, А. В. Нефёдов // Механика та машинобудування. 2009. №2. С. 11-16.
3. Толстолуцкий В. А. Сравнение водоходных качеств изделий БТР-3Е и БТР-4Е / В. А. Толстолуцкий, А. А. Павлюченко, И. И. Рассказов, Т. В. Толстолуцкая // Механика та машинобудування. 2014. №1. С. 128-135.
4. Study on Force Characteristics and Resistance for Water by Amphibious Vehicle / Ling Duan et. al. // 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems (ICMEIS 2015)

5. Полунгян А. А. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов: П79 в 3т. Т. 1 / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Г. И. Гладов и др.; под ред. А. А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. 496 с.: ил.
6. Хренов И. О. Метод расчета силы сопротивления движению на воде амфибийных колесных и гусеничных машин с использованием программного комплекса ANSYS CFX // Журнал автомобильных инженеров. 2018. №1. С. 31-33.
7. Simulation of amphibious vehicle water resistance based on fluent / Zhangxia Guo, et. al. // International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications. 2015. Vol.10, No. 1. Pp. 485-489.
8. Nakisa M. RANS simulation of viscous flow around hull of multipurpose amphibious vehicle / M. Nakisa, A. Maimin, A. Yasser, F. Behrouzi, A. Tarmizi // International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2014. Vol. 8, No. 2. pp. 298-302.
9. Филатов В. В. Гидродинамическое исследование перспективной быстроходной амфибийной машины малого класса // Вестник гражданских инженеров. 2017. №2 (61). С. 219-223.
10. Piyush A. Stability and drag analysis of wheeled amphibious vehicle using CFD and model testing techniques // Applied Mechanics and Materials Vols. 592-594. 2014. Pp. 1210-1219.
11. Nakisa M. Hydrodynamic resistance analysis of new hull design for multipurpose amphibious vehicle applying with finite volume method / M. Nakisa, A. Maimin, A. Yasser, F. Behrouzi, A. Tarmizi // Journal Teknologi (Sciences & Engineering) 74:5. 2015. pp. 73-76.
12. Guo Z., Pan Y., Zhang H., Wang Y. Numerical simulation of an amphibious vehicle sailing resistance / Z. Guo, Y. Pan, H. Zhang, Y. Wang // Internal Journal of Computer Science Issues. 2013. Vol. 10, Issue 1, No 1. Pp. 33-36.
13. Стрелков А. Г. Конструкция быстроходных гусеничных машин: учеб. пособие. М.: МГТУ «МАМИ», 2005. 616 с. ил.
14. Мартиросов Г. Г. Проектирование водоходных движителей с гребными винтами для амфибийных машин. М.: МАДИ, 2006. 87 с.
15. Войсковая часть 12093. Патент на изобретение № 2037432 (RU) – Паромно-мостовая машина, 1995.
16. Центральный научно-исследовательский испытательный институт им. Д. М. Карбышева Министерства обороны РФ. Патент на изобретение № 2129072 (RU) Гусеничный плавающий транспортер, 1999.

References:

1. Stepanov A. P. Proektirovanie amfibijnyh mashin – М.: Megalion, 2007. – 420 s. [Stepanov A.P. Design of amphibious machines. М.: Megalion, 2007. 420 p. (In Russ.)]
2. Veretennikov A. I. Osobennosti rascheta soprotivleniya dvizheniyu boevoy kolesnoj mashiny na plavu / A. I. Veretennikov, YU. M. Mushchinskij, A. V. Nefyodov // Mekhanika ta mashinobuduvannya. – 2009. №2. S. 11-16. [Veretennikov A.I. Features of calculating the resistance to the movement of a combat wheeled vehicle afloat / A.I. Veretennikov, Yu. M. Mushchinsky, A.V. Nefyodov // Mechanics and machine-building. - 2009. No. 2. pp. 11-16. (In Russ.)]
3. Tolstoluckij V. A. Sravnenie vodohodnyh kachestv izdelij BTR-3E i BTR-4E / V. A. Tolstoluckij, A. A. Pavlyuchenko, I. I. Rasskazov, T. V. Tolstoluckaya // Mekhanika ta mashinobuduvannya. – 2014. №1. S. 128-135. [Tolstoluckij V. A. Comparison of the navigable qualities of products BTR-3E and BTR-4E/ V. A. Tolstoluckij, A. A. Pavlyuchenko, I. I. Rasskazov, T. V. Tolstoluckaya // Mechanics and machine-building. – 2014. No. 1. pp. 128-135. (In Russ.)]
4. Study on Force Characteristics and Resistance for Water by Amphibious Vehicle / Ling Duan et. al. // 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems (ICMEIS 2015)
5. Polungyan A. A. Proektirovanie polnoprivodnyh kolesnyh mashin: Uchebnyk dlya vuzov: P79 v 3t. T. 1 / B. A. Afanas'ev, B. N. Belousov, G. I. Gladov i dr.; pod red. A. A. Polungyana. М.: Izd-vo MGTU im. Baumana, 2008. 496 s.: il. [Polungyan A. A. Design of all-wheel drive vehicles: Textbook for universities: P79 in 3t. T. 1 / B. A. Afanas'ev, B. N. Belousov, G. I. Gladov i dr.; edited by A. A. Polungyana. М.: Publishing house of MSTU im. Bauman, 2008. 496 p.: il.]
6. Hrenov I. O. Metod rascheta sily soprotivleniya dvizheniyu na vode amfibijnyh kolesnyh i gusenichnyh mashin s ispol'zovaniem programmogo kompleksa ANSYS CFX // Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov. 2018. №1. S. 31-33. [Khrenov I.O. A method for calculating the resistance to water movement of amphibious wheeled and tracked vehicles using the ANSYS CFX software package // Journal of Automotive Engineers. 2018. No. 1. pp. 31-33. (In Russ.)]
7. Simulation of amphibious vehicle water resistance based on fluent / Zhangxia Guo, et. al. // International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications. 2015. Vol.10, No. 1. pp. 485-489.
8. Nakisa M. RANS simulation of viscous flow around hull of multipurpose amphibious vehicle / M. Nakisa, A. Maimin, A. Yasser, F. Behrouzi, A. Tarmizi // International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2014. Vol. 8, No. 2. pp. 298-302.

9. Filatov V. V. Hidrodinamicheskoe issledovanie perspektivnoj bystrohodnoj amfibijnoj mashiny malogo klassa // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2017. №2 (61). S. 219-223. [Filatov V.V. Hydrodynamic study of a promising high-speed amphibious small-class machine // Bulletin of Civil Engineers. 2017. No. 2 (61). pp. 219-223. (In Russ.)]
10. Piyush A. Stability and drag analysis of wheeled amphibious vehicle using CFD and model testing techniques // Applied Mechanics and Materials Vols. 592-594. 2014. pp. 1210-1219.
11. Nakisa M. Hydrodynamic resistance analysis of new hull design for multipurpose amphibious vehicle applying with finite volume method / M. Nakisa, A. Maimin, A. Yasser, F. Behrouzi, A. Tarmizi // Journal Teknologi (Sciences & Engineering) 74:5. 2015. pp. 73-76.
12. Guo Z., Pan Y., Zhang H., Wang Y. Numerical simulation of an amphibious vehicle sailing resistance / Z. Guo, Y. Pan, H. Zhang, Y. Wang // Internal Journal of Computer Science Issues. 2013. Vol. 10, Issue 1, No 1. pp. 33-36.
13. Strelkov A. G. Konstrukciya bystrohodnyh gusenichnyh mashin: ucheb. posobie. – M.: MGTU «MAMI», 2005. – 616 s. il. [Strelkov A. G. The design of high-speed tracked vehicles: textbook. allowance. – M.: MGTU «MAMI», 2005. 616 p. il. (In Russ.)]
14. Martirosov G. G. Proektirovanie vodohodnyh dvizhitelej s grebnymi vintami dlya amfibijnyh mashin. – M.: MADI, 2006. 87 s. [Martirosov G. G. Design of navigable propellers with propellers for amphibious machines. M.: MADI, 2006. 87 p. (In Russ.)]
15. Vojskovaya chast' 12093. Patent na izobrenenie № 2037432 (RU) – Paromno-mostovaya mashina, 1995. [Military unit 12093. Patent for invention No. 2037432 (RU) - Ferry bridge machine, 1995. (In Russ.)]
16. Central'nyj nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj institut im. D. M. Karbysheva Ministerstva oborony RF. Patent na izobrenenie № 2129072 (RU) – Gusenichnyj plavayushchij transporter, 1999. [Central Research and Testing Institute. D. M. Karbyshev of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Patent for invention No. 2129072 (RU) Tracked amphibious conveyor, 1999. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Месропян Арсен Владимирович, доктор технических наук, профессор, и. о. зав. кафедрой теоретической механики; e-mail: avm_74@mail.ru

Рахматуллин Радмир Рифович, аспирант, кафедра прикладной гидромеханики;
e-mail: radmir.molodets.93@mail.ru

Information about the authors:

Arsen V. Mesropyan, Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of Theoretical Mechanics;
e-mail: avm_74@mail.ru

Radmir R. Rakhmatullin, Postgrad. (PhD) Student, Department of Applied Hydromechanics;
e-mail: radmir.molodets.93@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.10.2020.

Принята в печать 06.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.10.2020.

Accepted for publication 06.11.2020.

Для цитирования А.Б. Сулин, Д.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, А.И.Семиляк. Модель системы охлаждения электронной аппаратуры на основе совместного использования сильноточных термоэлектрических полупроводниковых батарей и теплового термосифона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (4):81-91. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

For citation: A.B. Sulin, D.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, A.I. Semilyak. Model of an electronic equipment cooling system based on the joint use of high-current thermoelectric semiconductor batteries and a thermal thermosiphon. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(4):81-91.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 623.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-81-91

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАТАРЕЙ И ТЕПЛООВОГО ТЕРМОСИФОНА

¹А.Б. Сулин, ²Д.В. Евдулов, ²А.М. Ибрагимова, ²А.И.Семиляк

¹Национальный исследовательский университет ИТМО,

¹197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, д. 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка расчетной модели системы охлаждения электронной аппаратуры, основанной на комбинированном использовании сильноточных термоэлектрических полупроводниковых батарей (ТЭБ) слоистого исполнения и испарительно-конденсационного теплового термосифона, а также исследование теплофизических процессов происходящих при ее работе. **Метод.** Приведена математическая модель системы охлаждения электронной аппаратуры, основанная на комбинированном использовании сильноточных ТЭБ слоистого исполнения и испарительно-конденсационного теплового термосифона. Расчетная модель включает в себя описание процессов теплообмена в термоэлементе (ТЭ) слоистого исполнения при различных токах питания, определение количества теплоты переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени и значения температуры в каждой точке канала. **Результат.** Решена двумерная нестационарная задача теплопроводности для сложной системы с прямоугольной геометрией фрагментов и источников теплоты. Исследовано распределение температуры термоэлемента вдоль его продольной оси при различной величине тока питания, изменение теплового потока по длине теплового потока в тепловом испарительно-конденсационном термосифоне. **Вывод.** Результаты исследований показали эффективность комбинированного использования сильноточных ТЭБ слоистого исполнения и теплового термосифона в электронной аппаратуре с плотной упаковкой элементов. Показано, что увеличить эффективность работы электронной аппаратуры и уменьшить тепловые потери, возникающие в теплопроводе при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и термоэлектрических полупроводниковых батарей удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6 м), целесообразным является использование в качестве теплопровода, испарительно-конденсационного теплового термосифона.

Ключевые слова: элемент радиоэлектронной аппаратуры, термоэлектрическая полупроводниковая батарея, тепловой термосифон, модель, расчет, тепловой поток, электронная аппаратура

MODEL OF AN ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING SYSTEM BASED ON THE JOINT USE OF HIGH-CURRENT THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR BATTERIES AND A THERMAL THERMOSIPHON

¹A.B. Sulin, ²D.V. Evdulov, ²A.M. Ibragimova, ²A.I. Semilyak

¹ITMO National Research University,

¹49 Kronverksky Ave., bldg. A, Saint Petersburg 197101, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a design model of the electronic equipment cooling system based on the combined use of high-current thermoelectric semiconductor batteries of layered design and an evaporative-condensing thermal thermosiphon, as well as to study the thermophysical processes occurring during its operation. **Methods.** A mathematical model of the electronic equipment cooling system based on the combined use of high-current layered thermoelectric batteries and an evaporative-condensing thermal thermosiphon is presented. The design model includes a description of heat exchange processes in a layered thermoelectric element at various supply currents, determination of the amount of heat transferred through the cross-section of the channel of a thermal thermosiphon per unit of time, and the temperature values at each channel point. **Result.** A 2D dynamic heat conduction problem is solved for a complex system with rectangular geometry of fragments and heat sources. The temperature distribution of a thermoelement along its longitudinal axis at different values of the supply current and the change in the heat flow along its length in a thermal evaporation-condensation thermosiphon are studied. **Conclusion.** The results of the research have shown the effectiveness of combined use of high-current layered thermoelectric batteries and a thermal thermosiphon in electronic equipment with dense element packaging. It is shown that to increase the efficiency of electronic equipment and reduce the heat losses that occur in the heat line when the heat-generating element of radio-electronic equipment and thermoelectric semiconductor batteries are separated by a sufficiently large distance (over 0.6 m), it is advisable to use an evaporative-condensing thermal thermosiphon as a heat line.

Keywords: element of radio-electronic equipment, thermoelectric semiconductor battery, thermosiphon, model, calculation, heat flow, electronic equipment

Введение. При проектировании электронной аппаратуры очень часто возникает вопрос о создании эффективных систем охлаждения, позволяющих организовать отвод тепла от элементов радиоэлектронной аппаратуры [1-6]. Вместе с тем, стоит задача, как отделить источник холода от его потребителя. Особенно эта задача актуальна для электронной аппаратуры с плотной упаковкой элементов и расположенных в труднодоступных местах. В этом случае необходимо предусмотреть сопряжение термоэлектрической полупроводниковой батареи и элемента радиоэлектронной аппаратуры посредством специальных теплопроводов с минимальными потерями теплоты по их длине [7-11]. Использование теплопроводов изготовленных из материалов с большой теплопроводностью (например, медь или алюминий) и, соответственно, обладающих малым тепловым сопротивлением в направлении теплового потока, позволит решить поставленную задачу. Однако в этом случае возникают дополнительные теплопритоки к теплопроводу из окружающей среды и резко возрастают вес и габариты самого устройства.

Постановка задачи. Для устранения указанных недостатков авторами предлагается система охлаждения электронной аппаратуры, основанная на комбинированном использовании сильноточных ТЭБ с улучшенными термомеханическими характеристиками, и теплового термосифона, используемого в качестве теплопровода между удаленными источником холода и его потребителем – элементом радиоэлектронной аппаратуры [12-16]. При этом задача разбивается на две части решение тепловой задачи для слоистого термоэлемента и расчет температурного поля теплового термосифона. Расчётные схемы приведены на рис.1. и 3.

Методы исследования. Расчетная схема определения теплового поля в слоистом ТЭ приведена на рис.1. Области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины. 2 и 4 – термоэлектрический материал.

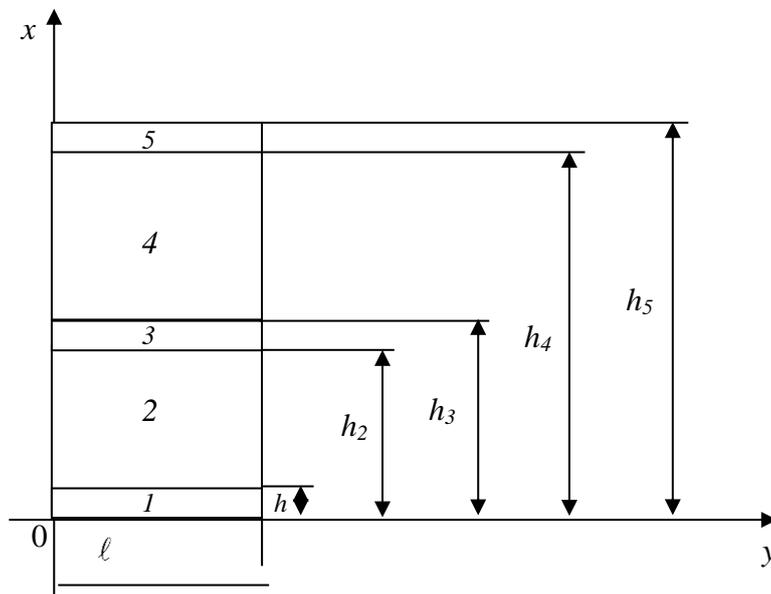


Рис.1. Расчетная схема слоистого термоэлемента
Fig. 1. Design scheme of a layered thermoelement

Система дифференциальных уравнений теплопереноса для этой схемы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + j^2 \Omega_1 &= C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}, \\
 \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + j^2 \Omega_2 &= C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \\
 \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + j^2 \Omega_3 &= C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t}, \\
 \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + j^2 \Omega_4 &= C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t}, \\
 \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} + j^2 \Omega_5 &= C_5 \frac{\partial T_5}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности, Ω_i – удельное электрическое сопротивление, j_i – плотность электрического тока, C_i – объемная теплоемкость, T_i – температура, t – время, $i=1, \dots, 5$.

Начальные, граничные условия и условия сопряжения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 T_{1, 2, 3, 4, 5} &= T_{\text{ср}} \text{ при } t=0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_1 - T_{mc}) \text{ при } x=0, 0 < y < l, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x=h_1, 0 < y < l, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x=h_2, 0 < y < l,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_5 - T_{mc}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_2 < x \leq h_3, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \beta (T_4 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_3 < x \leq h_4, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \beta (T_5 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_4 < x \leq h_5,
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решение системы уравнений (1) с соответствующими граничными и начальными условиями выполнено с использованием метода конечных элементов. Общее решение данной задачи методом конечных элементов осуществляется в следующей последовательности. Введем конечно-элементное представление:

$$\tilde{\varphi}(x, y, t) = \tilde{\varphi}_0(x, y, t) + \sum_{k=1}^K N_k(x, y) \varphi_k(t), \tag{3}$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

где чертой сверху обозначено приближенное решение; K – суммарное число узловых точек; $\tilde{\varphi}_0(x, y, t)$ выбирается так, чтобы точно удовлетворялись начальные и граничные условия; функция $N_k(x, y)$ – пробная функция; коэффициенты $\varphi_k(t)$ – неизвестны и определяются из системы уравнений, получаемых из исходного уравнения.

Каждое из исходных уравнений можно записать в символьном виде

$$L(T) = 0, \tag{4}$$

Если подставить уравнение (4) в (3), то оно не будет тождественно удовлетворяться. Следовательно, можно записать $L(T) = R$, где величина R называется невязкой уравнения.

Для определения коэффициентов используется система уравнений Галеркина:

$$\int_D N_m(x, y) R(x, y, t) dx dy = 0, \quad m = 1, \dots, K$$

Для поиска решения стационарной задачи использованы изопараметрические элементы треугольной формы. Приближенное решение в этом случае может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\varphi}(x, y) &= \varphi_a N_a(\zeta, \eta) + \varphi_b N_b(\zeta, \eta) + \varphi_c N_c(\zeta, \eta), & \text{если } x, y \in e_{abc}, \\
 \tilde{\varphi}(x, y) &= \varphi_d N_d(\zeta, \eta) + \varphi_e N_e(\zeta, \eta) + \varphi_f N_f(\zeta, \eta), & \text{если } x, y \in e_{def},
 \end{aligned}$$

где базисные функции $N_j(\zeta, \eta)$ определяются как:

$$\begin{aligned}
 N_a(\zeta, \eta) &= 1 - \zeta, & N_b(\zeta, \eta) &= \zeta - \eta, & N_c(\zeta, \eta) &= \eta, \\
 N_d(\zeta, \eta) &= 1 - \eta, & N_f(\zeta, \eta) &= \eta - \zeta, & N_e(\zeta, \eta) &= \zeta.
 \end{aligned}$$

Выбирая для уменьшения невязки функцию $R(x, y)$ ортогональной ко всем базисным функциям $N_k(x, y)$, и учитывая, что они обладают локальным носителем только на элементах, расположенных вокруг точки сетки k , имеем:

где $(R, N_k) = K_A + K_B + K_C + K_D + K_E + K_F,$

$$K_p = \iint_{e_p} \left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x} \frac{\partial N_k}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial y} \frac{\partial N_k}{\partial y} + 2N_k \right) dx dy, \quad p = A, B, C, D, E, F.$$

По данной методике осуществлен расчет температурного поля слоистого термоэлемента.

Обсуждение результатов. На рис.2. показано распределение температуры ТЭ вдоль его продольной оси при различной величине тока питания.

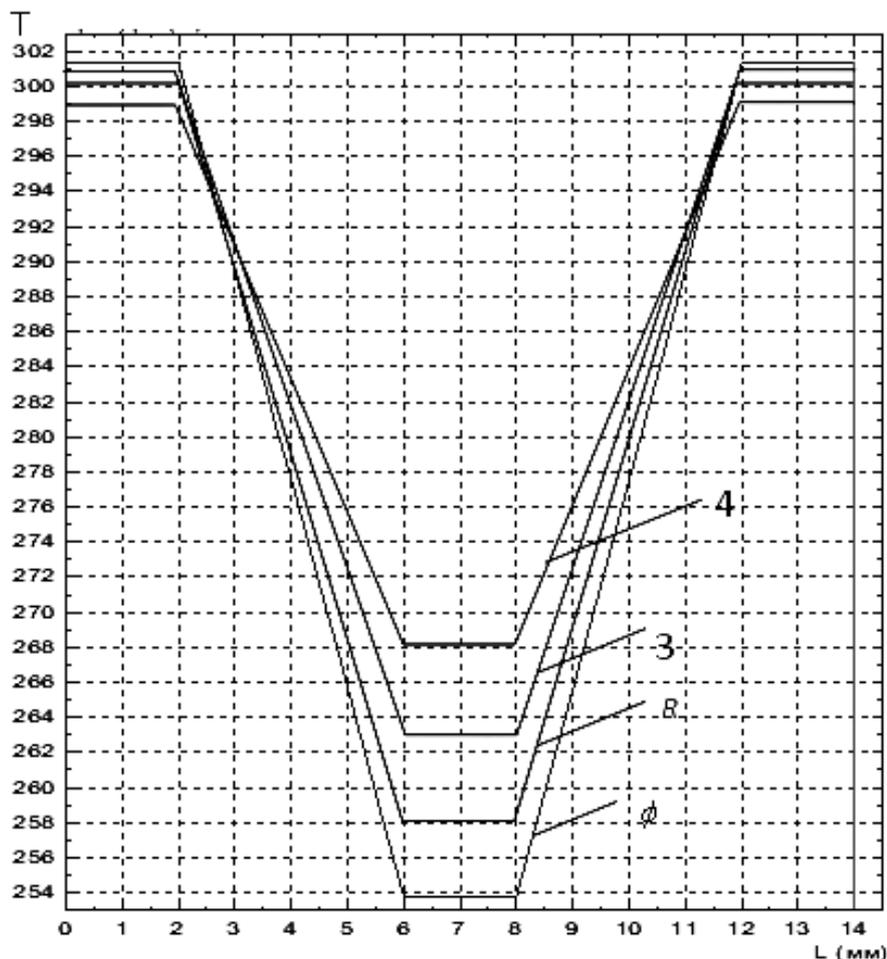


Рис.2. Распределение температуры термоэлемента вдоль его продольной оси при различной величине тока питания: 1-140 А, 2-120 А, 3-100 А, 4-80 А

Fig.2. Temperature distribution of the thermoelement along its longitudinal axis at various supply currents: 1-140 А, 2-120 А, 3-100 А, 4-80 А

Как видно из полученных данных, при использовании ТЭ в слоистом исполнении можно получить значительный перепад температур между холодной и горячей коммутационной пластиной, чем в случае использования классической П-образной конструкции. Второй частью расчетной модели является определение теплового поля теплового термосифона. В этом случае задача разбивается на три части с соответствующими условиями сопряжения на границах зон (испарения, конденсации и транспортная зоны) [17-20].

Расчетная модель различных зон испарительного теплового термосифона при условии соприкосновения зоны испарения с элементом электронной аппаратуры и зоны конденсации с холодными спаями ТЭ имеет следующий вид (рис.3.). При этом предполагается, что тепловой сифон имеет цилиндрическую форму и решается осесимметричная задача.

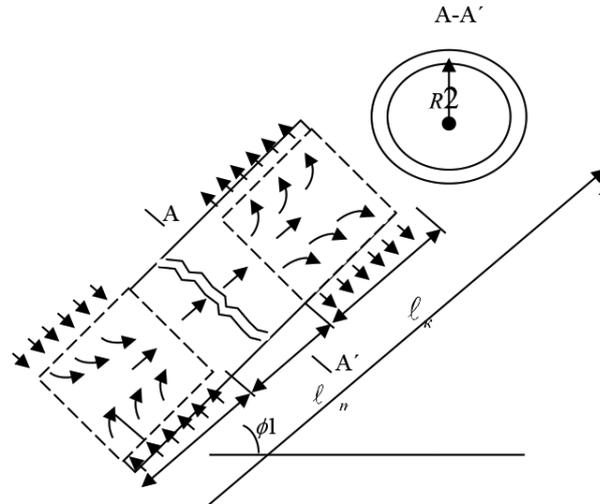


Рис.3. Расчетная схема теплового термосифона
 Fig.3. Calculation diagram of a thermal thermosiphon

Зона испарения. Уравнение движения жидкой фазы теплоносителя имеет вид:

$$\frac{1}{2\rho} \frac{d}{dz} [G(z)]^2 + \frac{\varepsilon_\kappa \ell \mu}{K\rho} G(z) + \frac{d\rho'}{dz} + \frac{2}{(R_n^2 - R_k^2)} \frac{d}{dz} \left[\sigma_n R_n \left(We - \frac{1}{\varepsilon_\kappa} \right) \right] - \rho g \cos \phi - \rho \frac{d\vartheta}{dt} = 0. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{d}{dz} [G(z)] + \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_k^2)} G'(z) = 0. \quad (6)$$

Уравнение баланса энергии:

$$i \frac{d}{dz} [G(z)] - \frac{q}{\varepsilon_\kappa \pi (R_n^2 - R_k^2) z_n} + \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_k^2)} i' G'(z) = 0. \quad (7)$$

Здесь $G'(z) = \rho' \bar{g}(z)$; $i = \int_0^T C_p dT$; $i' = \int_0^T C_p' dT$ $G(z) = \rho \bar{g}(z)$,

$$K = \frac{4R_{\text{нмткн}}^2 (1 - \varepsilon_\kappa)^2}{66,6 \varepsilon_\kappa^2} \quad We = \frac{\rho' g'^2 R_\kappa}{2\pi \sigma_n} \leq 1,$$

$$0,02 \cdot 10^{-3} \leq R_\kappa \leq 0,15 \cdot 10^{-3} [\text{м}]; \quad 0,1 \leq \varepsilon_\kappa \leq 0,5; \quad 0,01 \cdot 10^{-3} \leq R_{\text{нмткн}} \leq 0,09 \cdot 10^{-3} [\text{м}];$$

$$0,05 \cdot 10^{-3} \leq R_n - R_k \leq 3 \cdot 10^{-3} [\text{м}].$$

q определяется из соотношения: $G_0(z) \cdot r$, где r – скрытая теплота парообразования. Здесь $G_0(z)$ – массовый расход паровой или жидкой фазы теплоносителя.

Граничные условия при $z=0$; $\vartheta = \vartheta' = 0, G(0) = G'(0) = 0$ при $z = z_u$ $\vartheta' \ll \sqrt{\frac{2\pi\sigma_n}{\rho'R_\kappa}}$.

Транспортная зона. Пренебрегаем теплообменом с окружающей средой:

$$\left(\frac{\partial q}{\partial R_{R=R_n}} = 0 \right).$$

Для первого случая, когда жидкая фаза движется по внутреннему каналу, а паровая фаза перемещается по межтрубному пространству система уравнений записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(z) = \frac{\rho^2}{8\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} + g \cos \phi \right) + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] R_n^2 \\ g(z) = \frac{\rho}{4\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} \right) + g \cos \phi + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] (R_n^2 - R^2) \\ G'(z) = \frac{\rho'^2}{8\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] \left[R_n'^2 + R_6'^2 + \frac{R_n'^2 + R_6'^2}{\ln(R_n' / R_6')} \right] \\ g'(z) = \frac{\rho'}{4\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] \left[R_n'^2 - R'^2 + \frac{R_n'^2 - R_6'^2}{\ln(R_n' / R_6')} \cdot \ln \frac{R'}{R_n'} \right] \end{array} \right. \quad (8)$$

Во втором случае, когда жидкая фаза перемещается по межтрубному пространству, а паровая фаза по внутреннему каналу транспортной зоны, система уравнений записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(z) = \frac{\rho^2}{8\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} + g \cos \phi \right) + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] \left[R_n^2 + R_6^2 + \frac{R_n^2 + R_6^2}{\ln(R_n / R_6)} \right] \\ g(z) = \frac{\rho}{4\mu} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}^2}{2} \right) + g \cos \phi + \frac{d\bar{g}}{dt} \right] \left[R_n^2 - R + \frac{R_n^2 - R_6^2}{\ln(R_n / R_6)} \ln \frac{R}{R_n} \right] \\ G'(z) = \frac{\rho'^2}{8\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] R_n'^2 \\ g'(z) = \frac{\rho'}{4\mu'} \left[\frac{1}{\rho'} \frac{d\rho'}{dz} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\bar{g}'^2}{2} \right) - g \cos \phi - \frac{d\bar{g}'}{dt} \right] (R_n'^2 - R'^2) \end{array} \right. \quad (9)$$

Уравнение неразрывности записываем в виде:

$$\frac{d[G(z)]}{dz} = \frac{d[G'(z)]}{dz} = 0. \quad (10)$$

В случае наличия теплообмена с окружающей средой эта система уравнений видоизменяется. Уравнение баланса энергии в адиабатном случае исключается.

Условия сопряжения зон на границах транспортной зоны имеют вид:

$$\begin{aligned} G(z) = G'(z) &= 0 \\ g(z) = g'(z) &= 0 \text{ при } R = R_n, R = R_6, R = R_n' \text{ и } R = R_6'; \\ G(z_{z_m=0}) &= G(z_u) = G(z_u); \text{ при } z = z_u + z_{m_{z_m=0}}. \end{aligned}$$

При этом на скорость движения паровой фазы накладываются следующие ограничения:

$$\bar{g}' \leq M \sqrt{\Theta K T};$$

$$\text{тоже } \bar{g}' = \frac{2(a_0^2 - a_{kp}^2)}{\Theta - 1}; \frac{\rho'_{kp}}{\rho'_0} = \left[\frac{2}{\Theta + 1} \right]^{\frac{\Theta}{\Theta - 1}}; \frac{T'_{kp}}{T_0} = \frac{2}{\Theta + 1}; \bar{g}' = \bar{g}'_{\max} \text{ при } M = 1;$$

$$\text{при } M < 1 \bar{g}' - \text{растет на испарителе } \frac{\rho'_{kp}}{\rho'_0} = \left(\frac{2}{\Theta + 1} \right).$$

Зона конденсации. Уравнение движения жидкой фазы имеет вид:

$$\frac{1}{2\rho} \frac{d}{dz} [G(z)]^2 + \frac{\varepsilon_\kappa \mu}{\rho K} G(z) + \frac{d\rho'}{dz} + \frac{2}{(R_n^2 - R_n^2)} \frac{d}{dz} \left[\sigma_n R_\kappa \left(We - \frac{1}{\varepsilon_\kappa} \right) \right] - \rho g \cos \phi - \rho \frac{dv}{dt} = 0. \quad (11)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{d}{dt} [G(z)] - \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_n^2)} [G'(z)] = 0. \quad (12)$$

Уравнение баланса энергии:

$$i \frac{d}{dt} [G(z)] + \frac{q}{\varepsilon_\kappa \pi (R_n^2 - R_n^2) z_\kappa} - \frac{2R_n}{\varepsilon_\kappa (R_n^2 - R_n^2)} i' G'(z) = 0. \quad (13)$$

Граничные условия при этом записываются:

$$G(z) = G'(z) = 0 \text{ при } z = z_u + z_m + z_\kappa$$

$$G'(z) = 0; \text{ при } R = R_n;$$

$$G(z) = G(z = z_u + z_m) = G(z_\kappa = 0);$$

$$G'(z) = G'(z = z_u + z_m) = G'(z_\kappa = 0).$$

В описанной модели приняты следующие обозначения:

$G(z)$, $G'(z)$ – соответственно массовый расход жидкой и паровой фазы теплоносителя по сечению;

C_p , C'_p – соответственно теплоемкость жидкой и паровой фазы теплоносителя при постоянном давлении;

K – проницаемость капиллярной структуры зоны;

M – число Маха;

R_g – радиус внутреннего канала транспортной зоны;

R_n – наружный радиус зоны;

R – текущий радиус канала;

k – отношение универсальной газовой постоянной к молярной массе пара теплоносителя;

i – энтальпия жидкой фазы теплоносителя;

i' – энтальпия паровой фазы теплоносителя;

ρ и ρ' – соответственно плотность жидкой и паровой фазы;

R_n – радиус канала паровой фазы;

R_κ – радиус канала зоны конденсации;

g – ускорение свободного падения;

ϕ – угол наклона теплового термосифона к горизонту;

\bar{v} и \bar{v}' – средние значения скорости движения жидкой и паровой фазы;

ε_κ – пористость капиллярной структуры;

μ – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы теплоносителя;

ℓ – длина испарительно-конденсационного теплового термосифона;

σ_n – коэффициент поверхностного натяжения теплоносителя;

$R_{нити}$ – радиус нитки капиллярной структуры;

z_u – координата зоны испарения;

z_m – координата транспортной зоны;

z_κ – координата зоны конденсации;

q – количество теплоты, переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени;

Θ – показатель адиабаты, величина которого равна 1,67; 1,4; 1,33 соответственно для одноатомного, двухатомного и многоатомного теплоносителя;
 a_0 – скорость звука в паровой фазе теплоносителя;
 $a_{кр}$ – скорость звука в паровой фазе теплоносителя в критическом состоянии;
 $\rho'_{кр}$ – плотность теплоносителя в критическом состоянии;
 $T_{кр}$ – критическая температура теплоносителя.

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

На рис.4. приведена двумерная картина распределения теплового потока по теплопроводу, выполненному в виде теплового термосифона, а на рис.5. рассмотрено изменение теплового потока вдоль продольной оси теплопровода.

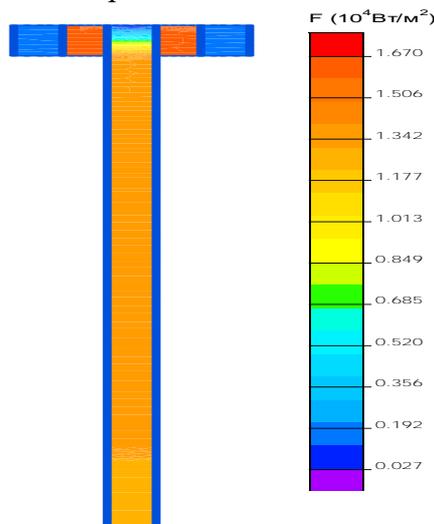


Рис.4. Картина распределения тепловых потоков в слоистом термоэлементе с тепловым термосифоном

Fig. 4. Distribution pattern of heat fluxes in a layered thermoelement with a thermal thermosiphon

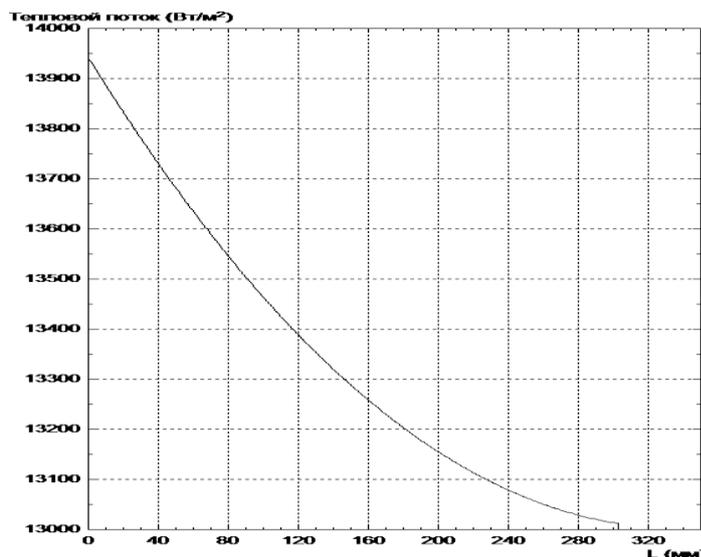


Рис.5. Изменение теплового потока по длине теплового термосифона
 Fig. 5. Change in heat flux along the length of the thermal thermosiphon

В качестве теплоносителя использовался хладагент R 124 b ($C_2H_3ClF_2$) с температурой кипения 263,2 К. Как следует из полученных данных, поле распределения теплового потока в тепловом сифоне практически равномерное. При этом максимальное отличие в величине теплового потока между его концами равно 900 Вт/м². Для сравнения это значение в случае ис-

пользования медного теплопровода составляло 5800 кВт/м². Таким образом, следует, что при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры и ТЭБ, удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6 м), целесообразным является применение не цельнометаллического теплопровода, а теплопровода, изготовленного в виде теплового термосифона.

Вывод. Результаты исследований показали эффективность комбинированного использования сильноточных ТЭБ и теплового термосифона в электронной аппаратуре с плотной упаковкой элементов. Для увеличения эффективности работы электронной аппаратуры и уменьшения тепловых потерь, возникающих в теплопроводе при сопряжении тепловыделяющего элемента радиоэлектронной аппаратуры и ТЭБ, удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,6м), целесообразным является использование в качестве теплопровода тепловой термосифон.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
2. Анатычук Л.И. Элементная база термоэлектричества // Доклады IX Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». Санкт-Петербург, 2004.
3. Анатычук Л.И. О физических моделях термоэлементов // Термоэлектричество. 2003, №1.
4. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника, 2009. № 7.
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews, 2016. No. 65.
6. Патент РФ № 2380787. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
7. Патент РФ № 2379790. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
8. Патент РФ № 2417484. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2011.
9. Патент РФ № 2338298. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., 2007.
10. Патент РФ № 2236098 Устройство для термостабилизации элементов РЭА с высоким уровнем тепловыделений / Исмаилов Т.А., Аминов Г.И., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. // Б.И. № 25, 2004.
11. Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Теоретические исследования термоэлектрического элемента слоистой конструкции // Термоэлектричество. 2015. № 2.
12. Патент РФ № 2314663. Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Менафов А.М., 2005.
13. Патент РФ № 2180161. Устройство для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры с высокими тепловыделениями/ Евдулов О.В., Исмаилов Т.А., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И., 2000.
14. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nichezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicascade thermoelectric modules // JEMS. 2011. Vol. 40, №5.
15. Yagov V.V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials IX International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». Minsk. 2015.
16. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. СПб.: СПбНИУИТМО. 2012.
17. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Математическая модель холодильной установки на базе слоистых ТЭБ с тепловыми термосифонами. // Ползуновский вестник. №2, 2010.
18. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И., Термостабилизирующие устройства для радиоэлектронной аппаратуры // Вестник Международной академии холода, № 3, 2002.
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Евдулов Д.В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2008. №5.

References:

1. Anatyshuk L. I. Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of thermoelectricity, 2003.
2. Anatyshuk L.I. The element base of thermoelectricity // Reports of the IX Interstate Seminar "Thermoelectrics and Their Application". St. Petersburg, 2004. [Anatyshuk L. I. Element base of thermoelectricity // Reports of the IX Interstate seminar "Thermoelectrics and their application". Saint Petersburg, 2004. (In Russ)]
3. Anatyshuk L. I. on physical models of thermoelements // Thermoelectricity. 2003, No. 1.
4. Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration technology, 2009. No. 7. [Bulat L. P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia/Refrigerating equipment, 2009. № 7. (In Russ)]
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews, 2016. - №65.

6. RF Patent No. 2380787. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2010. [Russian Patent No. 2380787. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2010. (In Russ)]
7. RF patent No. 2379790. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2010. [Russian Patent no. 2379790. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2010. (In Russ)]
8. RF patent No. 2417484. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., 2011. [Russian Patent No. 2417484. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., 2011. (In Russ)]
9. RF patent No. 2338298. Thermoelectric battery / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Verdiev M.G., 2007. [Russian Patent no. 2338298. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Verdiev M. G., 2007. (In Russ)]
10. RF patent No. 2236098 Device for thermal stabilization of electronic equipment elements with a high level of heat release / Ismailov TA, Aminov GI, Evdulov OV, Yusufov Sh.A. // B.I. No. 25, 2004. [Russian Patent no. 2236098 Device for thermal stabilization of REA elements with a high level of heat release / Ismailov T. A., Aminov G. I., Evdulov O. V., Yusufov sh. a. / B. I. no. 25, 2004. (In Russ)]
11. Evdulov OV, Evdulov D.V. Theoretical studies of a thermoelectric element of a layered structure // Thermoelectricity. 2015. No. 2. [Evdulov O. V., Evdulov D. V. Theoretical studies of the thermoelectric element of a layered structure // thermoelectricity. 2015. № 2. (In Russ)]
12. RF patent No. 2314663. A device for cooling elements of radio electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Verdiev M.G., Menafov A.M., 2005 [Russian Patent no. 2314663. Device for cooling elements of radio-electronic equipment operating in the mode of repeated short-term heat release / Ismailov T. A., Evdulov O. V., Verdiev M. G., Menafov a.m., 2005. (In Russ)]
13. RF patent No. 2180161. A device for thermal stabilization of elements of radio electronic equipment with high heat release / Evdulov O.V., Ismailov T.A., Yusufov Sh.A., Aminov G.I., 2000. [Russian Patent No. 2180161. Device for thermal stabilization of radio electronic equipment elements with high heat emissions/ Evdulov O. V., Ismailov T. A., Yusufov Sh. A., Aminov G. I., 2000. (In Russ)]
14. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nichezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicasade thermoelectric modules // JEMS. 2011. V. 40, No. 5.
15. Yagov V.V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials IX International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». Minsk. 2015.
16. Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. SPb.: SpbNIUITMO. 2012. [Dulnev G. N. Theory of heat and mass transfer. Saint Petersburg: Spbniuitmo, 2012. (In Russ)]
17. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. Mathematical model of a refrigeration unit based on laminated thermopile with thermal thermosyphons. // Polzunovsky Bulletin. No. 2, 2010. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V. Mathematical model of a refrigeration unit based on layered TEB with thermal thermosiphons. // Polzunovskii journal No. 2, 2010. (In Russ)]
18. Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint Petersburg: Polytechnic, 2005. [Ismailov T. A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint Petersburg: Politechnika, 2005. (In Russ)]
19. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A., Aminov G.I., Thermal stabilizing devices for electronic equipment // Bulletin of the International Academy of Cold, No. 3, 2002. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Yusufov S. A., Aminov, I., Thermostabilizers devices for electronic equipment // Vestnik of International Academy of refrigeration, No. 3, 2002. (In Russ)]
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Makhmudova M.M., Evdulov D.V. Investigation of the cooling system of the elements of radio-electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release. Izvestiya of higher educational institutions of Russia. Radio electronics. 2008. No. 5. [Ismailov T. A., Evdulov O. V., Makhmudov M. M., Evdulov D. V. system Study of cooling elements of electronic equipment working in a mode of intermittent heat//News of higher educational institutions of Russia. Radionics. 2008. №5. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Сулин Александр Борисович, доктор технических наук, профессор факультета низкотемпературной энергетики, e-mail: miconta@rambler.ru

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: +79634051239@yandex.ru

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: ibrasya@mail.ru

Семиляк Александр Иванович, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: asemilyak@mail.ru

Information about the authors:

Alexander B. Sulin, Dr. Sci.(Technical), Prof., Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: miconta@rambler.ru

Denis V. Evdulov, Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: +79634051239@yandex.ru

Asiyat M. Ibragimova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering E-mail: ibrasya@mail.ru

Alexander I. Semilyak, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: asemilyak@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.10.2020.

Принята в печать 19.11.2020.

Conflict of interests.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.10.2020.

Accepted for publication 19.11.2020.

Для цитирования: И.В. Куликова. Применение оператора вариации в генетическом алгоритме для синтеза нечетких регуляторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 92-100. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

For citation: I.V. Kulikova. Application of the variation operator in a genetic algorithm for the synthesis of fuzzy controllers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 92-100. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.896

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-92-100

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРА ВАРИАЦИИ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

И.В. Куликова

Уральский государственный университет путей сообщения,
620034, Россия, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Резюме. Цель. В данной статье рассмотрена проблема повышения эффективности синтеза нечеткого регулятора в системе управления с помощью генетического алгоритма. Подбор наилучших параметров нечеткого регулятора осуществляется с помощью операторов кроссинговера и мутации в генетическом алгоритме. Работа оператора мутации может привести к формированию некорректного набора параметров, что усложняет процедуру синтеза нечеткого регулятора. **Метод.** Методом математического моделирования составляются массивы наборов параметров функций принадлежности, заключений и весов правил, которые входят в нечеткий регулятор. Методом имитационного моделирования описывается механизм работы операторов одноточечной и двухточечной вариации в генетическом алгоритме. **Результат.** Предложены математические модели одноточечного и двухточечного оператора вариации для генетического алгоритма. Представлен механизм изменения значений элементов в массиве набора параметров нечеткого регулятора с одной входной и выходной переменной. **Вывод.** Замена оператора мутации на оператор вариации исключает формирование некорректных наборов параметров нечеткого регулятора в системе управления.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, оператор вариации, генетический алгоритм, функции принадлежности, база правил

APPLICATION OF THE VARIATION OPERATOR IN A GENETIC ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF FUZZY CONTROLLERS

I.V. Kulikova

Ural State Transport University,
66 Kolmogorova St., Yekaterinburg 620034, Russia

Abstract. Objective. This article studies the problem of increasing the efficiency of fuzzy controller synthesis in a control system using a genetic algorithm. The best parameters of the fuzzy controller are selected using the crossing-over and mutation operators in the genetic algorithm. The operation of the mutation operator can lead to the formation of an incorrect set of parameters, which complicates the procedure for synthesizing a fuzzy controller. **Methods.** Arrays of parameter sets of membership functions, conclusions, and rule weights that are included in the fuzzy controller are compiled using mathematical simulation. The mechanism of operation of single-point and two-point variation operators in the genetic algorithm is described by the simulation modeling. **Results.** Mathematical models of single-point and two-point variation operators for the genetic algorithm are proposed. The mechanism for changing the values of elements in the array of a set of parameters of a fuzzy controller with one input and output variable is presented. **Conclusion.** Replacing the mutation

operator with the variation operator eliminates the formation of incorrect sets of parameters of the fuzzy controller in the control system.

Key words: *fuzzy controller, variation operator, genetic algorithm, membership functions, rule base*

Введение. Современные системы управления характеризуются наличием большого числа управляемых величин и управляющих воздействий, которые связаны между собой сложными взаимосвязями. Для успешной работы таких систем управления целесообразно использовать нечеткие регуляторы. Нечеткий регулятор представляет собой систему нечеткого вывода, которая преобразует значения выходных переменных на основе входных переменных с помощью законов нечеткой логики [1,13,15].

Нечеткие регуляторы успешно применяются в системах адаптивного управления автоматической настройкой различных режимов работы синхронных генераторов [2,4,5]. Они используются в системах адаптивного нечеткого управления насосными станциями в нефтегазовой промышленности [3,9,12,16]. Нечеткие регуляторы входят в систему управления частотой вращения газотурбинных установок на тепловых электростанциях [2,6]. В сельском хозяйстве для управления линейным электроприводом зерноочистительной машины и комбайнов применяются нечеткие регуляторы [4, 1, 14].

При проектировании систем управления для достижения заданного критерия оптимизации необходимо определить метод синтеза параметров нечеткого регулятора для функций принадлежности и базы правил. Если требуется подобрать только значения параметров функций принадлежности, то можно применить аналитические методы [3]. При одновременном подборе параметров переменных нечеткого регулятора и базы правил можно использовать генетические алгоритмы. Примерами выступают нечеткие регуляторы систем управления движением на перекрестке [8,20] и перевернутым маятником [17, 19]. Искомый набор параметров нечеткого регулятора в этом случае будет являться решением задачи оптимизации.

Постановка задачи. Генетические алгоритмы представляют собой метод поиска решения задачи оптимизации на основе моделирования эволюционных процессов живой природы [7]. Идея их использования заключается в рассмотрении множества возможных решений задачи оптимизации как поколение особей в естественной среде обитания. Экстремальное значение целевой функции возможного решения соответствует наилучшей приспособленности особи в поколении. Работа генетического алгоритма состоит из нескольких циклов, которому соответствует множество возможных решений задачи оптимизации, определяющих одно поколение особей.

Описание генетического алгоритма определяется операторами селекции, кроссинговера и мутации. Оператор селекции позволяет выбрать наилучшие решения задачи оптимизации на основе значений целевой функции. Операторы кроссинговера и мутации используют полученные с помощью оператора селекции наилучшие решения задачи оптимизации. Работа оператора кроссинговера заключается в обмене параметров двух наилучших решений задачи оптимизации. Оператор мутации позволяет получить новое решение путем замены значений параметров в одном из наилучших решений.

Использование оператора мутации предполагает перестановку элементов внутри набора параметров, что может привести к формированию некорректных значений. Устранение недопустимых значений параметров становится возможным при замене оператора мутации оператором вариации, работа которого не предполагает перестановку элементов внутри массива. [10, 15].

Методы исследования. Математическое и имитационное моделирование позволяют проанализировать работу оператора вариации генетического алгоритма. Он позволяет получить новый набор параметров путем изменения случайно выбранного одного или нескольких элементов на определенную величину [10]. Если изменению подвергается только один элемент, то это будет одноточечный оператор вариации. Если изменению подвергаются два элемента, то

это будет двухточечный оператор вариации. Если изменению подвергаются несколько элементов, то это будет многоточечный оператор вариации.

Представим параметры нечеткого регулятора в виде одномерного массива W с элементами w_i . Длина массива W определяется количеством входных переменных нечеткого регулятора и размером базы правил. На первом цикле генетического алгоритма формируется определенное количество массивов наборов параметров W с помощью генераторов случайных чисел. Из полученных массивов выбираются те, которые обладают экстремальным значением целевой функции и близким к нему.

Обозначим эти массивы W^* и W^{**} . На втором цикле к выбранным массивам W^* и W^{**} применяются генетические операторы: оператор кроссинговера и мутации или вариации. Работа этих операторов направлена на изменение значений некоторых параметров для проверки экстремального значения целевой функции. Если экстремальное значение целевой функции улучшается, то работа генетического алгоритма продолжается. Если экстремальное значение целевой функции не улучшается, то работа генетического алгоритма заканчивается.

Элементы массива набора параметров нечеткого регулятора, полученного с помощью односточечного оператора вариации, определяются по формуле:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_v^* \pm \Delta, w_{v+1}^*, \dots, w_n^*\}, \quad (1)$$

где $w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$ – элементы исходного массива набора параметров; v – точка вариации; n – длина массива набора параметров; Δ – величина изменения v -ого элемента массива набора параметров.

Точка вариации вычисляется по формуле:

$$v = F(\gamma) \cdot n, \quad (2)$$

где $F(\gamma)$ – функция распределения дискретной случайной величины γ .

Элементы массива набора параметров нечеткого регулятора, полученного с помощью двухточечного оператора вариации, определяются по формуле:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_{v_1}^* \pm \Delta_1, w_{v_1+1}^*, \dots, w_{v_2}^* \pm \Delta_2, \dots, w_n^*\}, \quad (3)$$

где v_1 и v_2 – точки оператора вариации; Δ_1 и Δ_2 – величины изменений v_1 -ого и v_2 -ого элементов массива набора параметров.

Точки оператора вариации в этом случае будут вычисляться по формуле (2).

Построение односточечного и двухточечного операторов вариации генетического алгоритма опирается на использование функции распределения дискретной случайной величины (2). Обобщение представленного подхода к построению работы оператора вариации генетического алгоритма позволяет конструировать математические модели многоточечного оператора вариации с заданным количеством изменяемых элементов.

Обсуждение результатов. Рассмотрим нечеткий регулятор, который преобразует значения переменной x в значения переменной y . Переменная x в этом случае будет являться входной переменной нечеткого регулятора, а переменная y – выходной. Каждая переменная нечеткого регулятора описывается терм-множеством, содержащим, например, по пять термов. Названия термов следующие: NB – большое отрицательное, NS – маленькое отрицательное, Z – нейтральное, PS – маленькое положительное и PB – большое положительное [13]. Каждый терм описывается своей функцией принадлежности. Они могут иметь разный вид [15]. Пусть терм NB описывается линейной z -функцией (2 параметра), термы NS , Z и PS – треугольной функцией (3 параметра в каждой функции), терм PB – линейной s -функцией (2 параметра). Переменные x и y нечеткого регулятора определяются терм-множествами, содержащими одинаковые виды

функций принадлежности. Поэтому целесообразно рассмотреть графическую модель терм-множества переменной x (рис. 1).

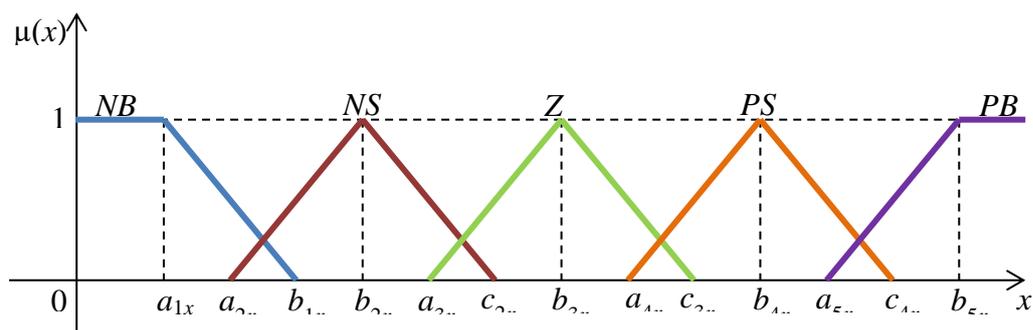


Рис. 1. Терм-множество переменной x
Fig. 1. Term-set of variable x

Представленное терм-множество содержит 13 параметров функций принадлежности: $a_{1x}, b_{1x}, a_{2x}, b_{2x}, c_{2x}, a_{3x}, b_{3x}, c_{3x}, a_{4x}, b_{4x}, c_{4x}, a_{5x}$. Терм-множество переменной y выглядит аналогично рис.1. Параметры функций принадлежности в этом случае будут следующие: $a_{1y}, b_{1y}, a_{2y}, b_{2y}, c_{2y}, a_{3y}, b_{3y}, c_{3y}, a_{4y}, b_{4y}, c_{4y}, a_{5y}, b_{5y}$.

Для корректной работы нечеткого регулятора необходимо, чтобы значения параметров одной функции принадлежности строго возрастали и лежали внутри диапазона возможных значений (рис. 1). Значения параметров определяются в процессе имитационного моделирования конкретного нечеткого регулятора. Для моделирования взаимосвязи переменных x и y можно рассмотреть значения x на отрезке $[0;5]$, а y на отрезке $[0;8]$, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров функций принадлежности
Table 1. Values of membership functions parameters

Переменная Variable x				Переменная Variable y			
Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value	Параметр Parameter	Значение Value
a_{1x}	1	c_{3x}	3	a_{1y}	1,5	c_{3y}	4
b_{1x}	2	a_{4x}	2,25	b_{1y}	2,5	a_{4y}	3
a_{2x}	1	b_{4x}	3	a_{2y}	1,2	b_{4y}	4
b_{2x}	1,75	c_{4x}	4	b_{2y}	2,5	c_{4y}	6
c_{2x}	2,75	a_{5x}	2,5	c_{2y}	3,5	a_{5y}	3,5
a_{3x}	1,5	b_{5x}	3,5	a_{3y}	2	b_{5y}	5
b_{3x}	2,5			b_{3y}	3		

Переменные нечеткого регулятора связываются базой правил, размер которой определяется количеством термов. Рассмотренное терм-множество содержит пять термов, следовательно, размер базы правил равен пяти. Каждое правило представляет собой логическое выражение вида [15]:

$$\text{если } x = X_i \text{ ТО } y = Y_j, (\omega), \quad (5)$$

где $x = X_i$ – условие правила; $y = Y_j$ – заключение правила; X_i – один из термов переменной x ($i = 1, 2, \dots, 5$); Y_j – один из термов переменной y ($j = 1, 2, \dots, 5$); ω – вес правила.

Переменные x и y связываются базой правил, представленной в табл. 2. Параметры предложенного нечеткого регулятора можно представить в виде массива W^* , содержащего 36 элементов. Элементы с номерами 1 – 13 отражают значения параметров функций принадлежности переменной x ; элементы с номерами 14 – 26 – значения параметров функций принадлежности переменной y ; элементы с номерами 27 – 31 – параметры заключений правил; элементы с номерами 32 – 36 – веса правил. Параметры заключений правил представлены в виде номеров термов выходной переменной y и весов. Терму NB в этом случае будет соответствовать номер 1, терму NS – 2, терму Z – 3, терму PS – 4, терму PB – 5.

Таблица 2. База правил нечеткого регулятора
Table 2. Fuzzy regulator rule base

Номер правила Rule number	1	2	3	4	5
Condition Условие (x)	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
Conclusion Заключение (y)	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>Z</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>
Weight Вес (ω)	0,3	0,8	0,7	0,5	0,9

Значения параметров, описывающих заключения правил, должны быть положительными целыми не больше 5, а значения весов – лежать в интервале от 0 до 1. В массив W^* входят значения параметров функций принадлежности (табл.1) и базы правил (табл.2). Значения элементов массива W^* представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения элементов массива W^*
Table 3. Values of massive W^* elements

i	w_i^*										
1	1	7	2,5	13	3,5	19	2	25	3,5	31	4
2	2	8	3	14	1,5	20	3	26	5	32	0,3
3	1	9	2,25	15	2,5	21	4	27	2	33	0,8
4	1,75	10	3	16	1,2	22	3	28	1	34	0,7
5	2,75	11	4	17	2,5	23	4	29	3	35	0,5
6	1,5	12	2,5	18	3,5	24	6	30	5	36	0,9

Изменение случайных элементов выбранного массива W^* осуществляется с помощью оператора вариации генетического алгоритма на величину Δ (1). Пусть значение Δ для параметров функций принадлежности равно 0,1; для заключений правил – 1; для весов правил – 0,1. Значения Δ подбираются таким образом, чтобы элементы массива набора параметров W^* оставались в их диапазоне возможных значений после применения оператора вариации.

Рассмотрим работу односточечного оператора вариации генетического алгоритма на примере предложенного нечеткого регулятора. Его параметры можно распределить на три группы: параметры функций принадлежности (26 параметров), параметры заключений правил (5 параметров) и веса правил (5 параметров). В процессе исследования работы нечеткого регулятора генератором случайных чисел были выбраны номера элементов в каждой группе параметров. Выбранные параметры были изменены на величину Δ остались в своих диапазонах возможных значений. Номера элементов, которые использовались в работе оператора вариации, представлены в табл.4.

Таблица 4. Применение односточечного оператора вариации
Table 4. Using a single-point variation operator

Группа параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter group	i	w_i^*	Δ	w_i	Границы Borders
Функции принадлежности Membership functions	20	3	0,1	2,9	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
Заключения правил Conclusions of the rules	30	5	1	4	[1; 5]
Веса правил Weights of the rules	32	0,3	0,1	0,4	[0; 1]

При вариации параметров функций принадлежности сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{20} , отражающий параметр b_{3y} , лежит в диапазоне возможных значений переменной y и удовлетворяет неравенству $a_{3y} < b_{3y} < c_{3y}$ ($2 < 2,9 < 4$). При вариации параметров заключений правил сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{30} является целым положительным числом, не большим 5 ($4 \leq 5$). При вариации весов правил также сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{32} лежит в интервале [0; 1]. Рассмотрим работу оператора мутации для массива W^* . Внутри массива W^* необходимо выбрать случайным образом элементы с индексами k и l ($k < l$), а затем поменять их местами. Элементы нового массива W в этом случае будут определяться по формуле [7]:

$$W = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_l^*, w_{k+1}^*, \dots, w_k^*, w_{l+1}^*, \dots, w_n^*\}, \quad (6)$$

где k и l – номера элементов, к которым применяется оператор мутации, n – длина массива набора параметров нечеткого регулятора.

Продemonстрируем работу оператора мутации на представленном наборе параметров нечеткого регулятора, записанном в массиве W^* . Введем следующие обозначения: ФП – функции принадлежности; ЗП – заключения правил; ВП – веса правил. Значения элементов, полученных с помощью оператора мутации, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Применение оператора мутации
Table 5. Using a mutation operator

Группы параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter groups	k	l	w_k^*	w_l^*	w_k	Borders Границы w_k	w_l	Borders Границы w_l
ФП + ФП	3	26	1	5	5	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	1	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
ФП + ЗП	4	29	1,75	3	3	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	1,75	[1; 5]
ФП + ВП	7	35	2,5	0,5	0,5	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	2,5	[0; 1]
ЗП + ЗП	28	31	1	4	4	[1; 5]	1	[1; 5]
ЗП + ВП	27	36	2	0,9	0,9	[1; 5]	2	[0; 1]
ВП + ВП	33	35	0,8	0,5	0,5	[0; 1]	0,8	[0; 1]

При мутации параметров функций принадлежности не выполняется условие возрастания параметров, так как значение элемент w_{26} , отражающего значение параметра b_{5y} не удовлетворяет неравенству $a_{5y} < b_{5y}$ ($3,5 > 1$) (табл. 1), поэтому полученный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным.

При мутации параметра функций принадлежности и заключения правила полученный элемент w_{29} , отражающий параметр заключения правила, не является целым числом, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации параметра функций принадлежности и веса правила полученный элемент w_{35} , отражающий вес правила, не лежит в интервале $[0; 1]$, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации параметров заключений правил полученные элементы w_{28} и w_{31} являются целыми числами, поэтому сформированный набор – корректен. При мутации параметров заключений и весов правил полученный элемент w_{36} , отражающий вес правила, не лежит в интервале $[0; 1]$, а элемент w_{36} не является целым числом, поэтому сформированный набор параметров нечеткого регулятора является некорректным. При мутации весов правил полученные элементы w_{33} и w_{35} лежат в интервале $[0; 1]$, поэтому сформированный набор – корректен.

Использование оператора мутации генетического алгоритма в синтезе нечеткого регулятора позволило получить только два корректных набора параметров из шести. Применение одноточечного оператора вариации генетического алгоритма позволило получить все три корректных набора параметров. Включение одноточечного оператора вариации генетического алгоритма в процедуру синтеза нечеткого регулятора более предпочтительно, чем включение оператора мутации.

Рассмотрим применение двухточечного оператора вариации. Параметры нечеткого регулятора делятся на три группы, поэтому можно выделить шесть вариантов сочетания этих групп. Представим параметры нечетких регуляторов, полученных с помощью двухточечного оператора вариации. Номера элементов, которые использовались в работе оператора вариации и значения ошибок представлены в табл. 6.

При вариации двух параметров функций принадлежности сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_3 и w_{25} , отражающие параметры a_{2x} и a_{5y} соответственно, лежат в диапазоне возможных значений переменных x и y и удовлетворяют неравенствам $a_{2x} < b_{2x} < c_{2x}$ ($0,9 < 1,75 < 2,75$) (табл. 1) и $a_{5y} < b_{5y}$ ($3,4 < 5$) (табл. 1).

Таблица 6. Применение двухточечного оператора вариации
Table 6. Using a two-point variation operator

Группы параметров нечеткого регулятора Fuzzy controller parameter groups	i_1	$w_{i_1}^*$	Δ_1	w_{i_1}	Borders Границы w_{i_1}	i_2	$w_{i_2}^*$	Δ_2	w_{i_2}	Borders Границы w_{i_2}
ФП + ФП	3	1	0,1	0,9	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	25	3,5	0,1	3,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$
ФП + ЗП	12	2,5	0,1	2,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	28	1	1	2	[1; 5]
ФП + ВП	14	1,5	0,1	1,4	$x \in [0; 5], y \in [0; 8]$	36	0,9	0,1	1	[0; 1]
ЗП + ЗП	27	2	1	1	[1; 5]	31	4	1	5	[0; 1]
ЗП + ВП	27	2	1	1	[1; 5]	35	0,5	0,1	0,6	[0; 1]
ВП + ВП	34	0,5	0,1	0,6	[0; 1]	35	0,9	0,1	0,4	[0; 1]

При вариации параметров функций принадлежности и заключений сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{12} , отражающий параметр a_{5x} , лежит в диапазоне возможных значений переменной x и удовлетворяет неравенству $a_{5x} < b_{5x}$ ($2,4 < 3,5$) (табл.1), а элемент w_{28} , характеризующий заключение правила является целым положительным числом, не большим 5 ($2 < 5$). При вариации параметров функций принадлежности и веса правила сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{14} , отражающий параметр a_{1y} , лежит в диапазоне возможных значений переменной y и удовлетворяет неравенству $a_{1y} < b_{1y}$ ($1,4 < 2,5$) (табл.1), а элемент w_{36} , характеризующий вес правила лежит в интервале $[0; 1]$.

При вариации параметров заключений правил сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_{27} и w_{31} являются целыми положительными числами, не большими 5 ($1 \leq 5$ и $5 \leq 5$). При вариации параметров заключений и весов правил сформирован корректный набор параметров, так как элемент w_{27} , отражающий заключение правила, является целым положительным числом, не большим 5 ($1 \leq 5$), а элемент w_{35} , характеризующий вес, лежит в интервале $[0; 1]$. При вариации двух весов правил также сформирован корректный набор параметров, так как элементы w_{34} и w_{35} лежат в интервале $[0; 1]$. Двухточечный оператор вариации генетического алгоритма для синтеза нечеткого регулятора позволяет получить корректные наборы параметров при изменении любых сочетаний их групп.

Вывод. Включение одноточечного и двухточечного операторов вариации генетического алгоритма в процедуру синтеза нечеткого регулятора позволяет исключить формирование некорректных наборов его параметров. Работа двухточечного оператора вариации является более сложной по сравнению с работой одноточечного оператора. Одноточечный оператор вариации генетического алгоритма был успешно применен для синтеза нечеткого регулятора системы стабилизации неустойчивого положения равновесия перевернутого маятника. Алгоритм генетического алгоритма с одноточечным оператором вариации реализован в авторских компьютерных программах [11, 18].

Библиографический список:

1. Бабокин Г.И., Гнатюк Т.А. Оценка робастности системы управления электроприводом комбайна для различных регуляторов нагрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 10-15.
2. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Исследование варианта структуры нечеткого пид-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. № 1 (9). С. 16-24.
3. Бизянов Е.Е., Гутник Е.Е. Метод получения параметров функций принадлежности нечетких множеств на основе реальных данных для систем автоматизированной обработки информации // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(3):79-86. /doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86
4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 3 (7). С. 122-135.
5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан З.Х. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 83-95.
6. Вильданов Р.Г., Крышко К.А., Сидоров Д.А., Климович А.С. Моделирование регулятора на базе нечеткой логики для применения на тепловой электростанции // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 2-2. С. 19-21.
7. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. и др. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография. М: Физматлит, 2009. 384 с. ISBN 978-5-9221-1101-0.
8. Грязнов А.О., Тарасян В.С. Нечеткие регуляторы для управления движением на перекрестке // Молодежь в науке: Новые аргументы. Сборник научных работ X Международного молодежного конкурса. Ответственный редактор А.В. Горбенко. 2019. С. 29-33.

9. Каяшев А.И., Емекеев А.А., Сагдатуллин А.М. Автоматизация электропривода насосной станции на основе многомерного нечеткого логического регулятора // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 4. С. 30-33.
10. Куликова И.В. Построение генетического алгоритма для решения задач оптимизации с различными ограничениями для параметров // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 40-44.
11. Куликова И.В. Процедура автоматического синтеза нечетких регуляторов типа Такаги-Сугено-Канга. Свидетельство о государственной регистрации № 2020613003. – Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06 марта 2020.
12. Леготкина Т.С., Хижняков Ю.Н. Адаптивное нечеткое управление нефтегазового сепаратора дожимной насосной станции // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 8. С. 54-59.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 736 с.: ил
14. Линенко А.В., Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г. Нечеткая система управления линейным электроприводом зерноочистительной машины//Достижения науки - агропромышленному производству материалы LV международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет». 2016. С. 205-210.
15. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егулова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 744 с., ил.
16. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Султанов Р.Г., Соловьева О.И. Синтез нечеткого регулятора с заданной многомерной статической характеристикой // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2015. № 1. С. 245-260.
17. Первушина Н.А., Доновский Д.Е., Хакимова А.Н. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". 2018. № 4 (27). С. 82-90.
18. Тарасян В.С., Куликова И.В. Автоматическое обучение нечетких регуляторов MISO-типа. Свидетельство о государственной регистрации № 2014614584. – Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014г.
19. Тарасян В.С., Куликова И.В. Разработка процедуры построения нечеткого регулятора и ее применение для управления движением перевернутого маятника // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1 (17). С. 34-42.
20. Тарасян В.С., Тен Д.О. Оптимизация транспортной инфраструктуры при помощи генетических алгоритмов // Инновационный транспорт. 2013. № 3 (9). С. 29-32.

References:

1. Babokin G.I., Gnatyuk T.A. Ocenka robnosti sistemy upravleniya elektroprivodom kombajna dlya raz-lichnyh regulyatorov nagruzki // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 2. S. 10-15.[Babokin G.I., Gnatyuk T.A. Evaluation of the robustness of the combine electric drive control system for various load regulators // Bulletin of the Tula State University. Technical science. 2013. No. 2. pp. 10-15. (In Russ)]
2. Bahirev I.V., Kavalerov B.V. Issledovanie varianta struktury nechetkogo pid-regulyatora chastoty vra-shcheniya elektroenergeticheskoy gazoturbinoj ustanovki//Vestnik Permskogo nacional'nogo issledova-tel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2014. № 1 (9). S. 16-24.[Bakhirev I.V., Kavalerov B.V. Investigation of a variant of the structure of a fuzzy pid-regulator of the rotational speed of an electric power gas turbine installation // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. 2014. No. 1 (9). pp. 16-24. (In Russ)]
3. Bizyanov E.E., Gutnik E.E. Metod polucheniya parametrov funkciy prinadlezhnosti nechetkih mnozhestv na osnove real'nyh dannyh dlya sistem avtomatizirovannoj obrabotki informacii // Vestnik Dagestansko-go gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2019;46(3):79-86. [Bizyanov EE, Gutnik EE Method of obtaining parameters of membership functions of fuzzy sets based on real data for systems of automated information processing // Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (3): 79-86. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-3-79-86>(In Russ)]
4. Bulatov YU.N., Kryukov A.V. Intellektual'naya nastrojka regulyatorov ustanovok raspredelennoj generacii // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2017. № 3 (7). S. 122-135.[Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Intellectual tuning of regulators of distributed generation plants // Information and mathematical technologies in science and management. 2017. No. 3 (7). pp. 122-135. (In Russ)]
5. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHan Z.H. Intellektual'nye regulyatory dlya ustanovok raspredelennoj generacii // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2015. № 2 (46). S. 83-95.[Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Z.Kh. Intelligent controllers for distributed generation plants // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 2 (46). S. 83-95. (In Russ)]
6. Vil'danov R.G., Kryshko K.A., Sidorov D.A., Klimkovich A.S. Modelirovanie regulyatora na baze nechetkoj logiki dlya primeneniya na teplovoj elektrostancii // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii. 2017. № 2-2. S. 19-21.[Vil'danov R.G., Kryshko K.A., Sidorov D.A., Klimkovich A.S. Modeling a controller based on fuzzy logic for use at a thermal power plant // Modern trends in the development of science and technology. 2017. No. 2-2. pp. 19-21. (In Russ)]
7. Gladkov L. A., Kurejchik V. V, Kurejchik V. M. i dr. Bioinspirirovannye metody v optimizacii: mono-grafiya. — M: Fizmatlit, 2009. 384 s. ISBN 978-5-9221-1101-0.[Gladkov L. A., Kureichik V. V, Kureichik V. M. et al. Bioinspired methods in optimization: monograph. Moscow: Fizmatlit, 2009.384 p. ISBN 978-5-9221-1101-0. (In Russ)]
8. Gryaznov A.O., Tarasyan V.S. Nchetkie regulyatory dlya upravleniya dvizheniem na perekrestke // Molodezh' v nauke: Nove argumenty. Sbornik nauchnyh rabot X Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa. Otvet-stvennyj redaktor A.V. Gorbenko. 2019. S. 29-33.[Gryaznov A.O., Tarasyan V.S. Fuzzy controllers for traffic control at an intersection // Youth in Science: New arguments. Collection of scientific works of the X International Youth Competition. Executive editor A.V. Gorbenko. 2019.pp. 29-33. (In Russ)]
9. Kayashev A.I., Emekeev A.A., Sagdatullin A.M. Avtomatizaciya elektroprivoda nasosnoj stancii na osno-ve mnogomernogo nechetkogo logicheskogo regulyatora // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti. 2014. № 4. S. 30-33.[Kayashev A.I., Emekeev A.A., Sagdatullin A.M. Automation of an electric drive of a pumping station based on a multidimensional fuzzy logical controller // Automation, telemechanization and communication in the oil industry. 2014. No.4. pp. 30-33. (In Russ)]

10. Kulikova I.V. Postroenie geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadach optimizacii s razlichnymi ogra-nicheniyami dlya parametrov // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2020. № 2. pp. 40-44.[Kulikova I.V. Construction of a genetic algorithm for solving optimization problems with various constraints for the parameters // *Modern science-intensive technologies*. 2020. No. 2. pp. 40-44. (In Russ)]
11. Kulikova I.V. Procedura avtomaticheskogo sinteza nechetkih regulyatorov tipa Takagi-Sugeno-Kanga. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2020613003. – Zaregistrirvano v reestre programm dlya EVM 06 marta 2020.[Kulikova I.V. The procedure for automatic synthesis of fuzzy controllers of the Takagi-Sugeno-Kanga type. Certificate of state registration No. 2020613003. - Registered in the register of computer programs on March 06, 2020. (In Russ)]
12. Legotkina T.S., Hizhnyakov YU.N. Adaptivnoe nechetkoe upravlenie neftegazovogo separatora dozhimnoj nasosnoj stancii // *Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie*. 2016. № 8. S. 54-59.[Legotkina TS, Khizhnyakov Yu.N. Adaptive fuzzy control of the oil and gas separator of the booster pump station // *Neurocomputers: development, application*. 2016. No. 8. pp. 54-59. (In Russ)]
13. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. SPb. : BHV-Peterburg, 2005. 736 s.[Leonenkov A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. SPb. : BHV-Petersburg, 2005.736 p . (In Russ)]
14. Linenko A.V., Tuktarov M.F., Bajnazarov V.G. Nechetkaya sistema upravleniya linejnym elektroprivodom zernoochistitel'noj mashiny // *Dostizheniya nauki - agropromyshlennomu proizvodstvu materialy LV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferencii*. FGBOU VO «YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj ag-rarnyj universitet». 2016. S. 205-210.[Linenko A.V., Tuktarov M.F., Bajnazarov V.G. Fuzzy control system of the linear electric drive of the grain cleaning machine // *Achievements of science - for agro-industrial production materials of the LV international scientific and technical conference*. FSBEI HE "South Ural State Agrarian University". 2016.pp. 205-210 (In Russ)]
15. *Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya: Uchebnik / Pod red. N.D. Egupova. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2001. 744 s. [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: Textbook / Ed. N. D. Egupova. M. : Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2001.744 p., (In Russ)]*
16. Murav'eva E.A., Solov'ev K.A., Sultanov R.G., Solov'eva O.I. Sintez nechetkogo regulyatora s zadannoj mnogomernoj staticheskoj harakteristikoj // *Elektronnyj nauchnyj zhurnal Neftegazovoe delo*. 2015. № 1. S. 245-260.[Muravyova E.A., Soloviev K.A., Sultanov R.G., Solovyova O.I. Synthesis of a fuzzy controller with a given multidimensional static characteristic // *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2015. No. 1. pp. 245-260. (In Russ)]
17. Pervushina N.A., Donovskij D.E., Hakimova A.N. Razrabotka metodiki sinteza nejro-nechetkogo regulyato-ra s nastrojkoj geneticheskim algoritmom // *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antej"*. 2018. № 4 (27). S. 82-90.[Pervushina N.A., Donovsky D.E., Khakimova A.N. Development of a synthesis technique for a neuro-fuzzy controller with tuning by a genetic algorithm // *Bulletin of the Concern VKO "Almaz - Antey"*. 2018. No. 4 (27). pp. 82-90. (In Russ)]
18. Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Avtomaticheskoe obuchenie nechetkih regulyatorov MISO-tipa. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2014614584. Zaregistrirvano v reestre programm dlya EVM 06 marta 2014g.[Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Automatic learning of MISO-type fuzzy controls. State Registration Certificate No. 2014614584. - Registered in the register of computer programs on March 06, 2014. (In Russ)]
19. Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Razrabotka procedury postroeniya nechetkogo regulyatora i ee primenenie dlya upravleniya dvizheniem perevernutogo mayatnika // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2013. № 1 (17). S. 34-42.[Tarasyan V.S., Kulikova I.V. Development of a procedure for constructing a fuzzy controller and its application to control the motion of an inverted pendulum // *Bulletin of the Ural State University of Railways*. 2013. No. 1 (17). pp. 34-42(In Russ)]
20. Tarasyan V.S., Ten D.O. Optimizaciya transportnoj infrastruktury pri pomoshchi geneticheskikh algoritmov // *Innovacionnyj transport*. 2013. № 3 (9). S. 29-32.[Tarasyan V.S., Ten D.O. Optimization of transport infrastructure using genetic algorithms // *Innovative transport*. 2013. No. 3 (9). pp. 29-32. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Куликова Ирина Валерьевна, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины»,
e-mail: ivkulikova@inbox.ru

Information about the author:

Irina V. Kulikova, Senior lecturer, Department of Natural Science, e-mail: ivkulikova@inbox.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.11.2020.

Принята в печать 30.11.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 15.11.2020.

Accepted for publication 30.11.2020.

Для цитирования: Б.И. Шахтарин, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов, Х.Ю. Тагиров. Определение структуры земной коры по изменению скоростей сейсмических волн по данным произошедших землетрясений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 101-111. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111

For citation: B.I. Shakhhtarin, T.G. Aslanov, H.D. Magomedov, H.Yu. Tagirov. Determination of the structure of the earth's crust by changing the velocity of seismic waves from the earthquake data. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (4): 101-111. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-101-111

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ ПРОИЗОШЕДШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

¹Б.И. Шахтарин, ²Т.Г. Асланов, ³Х.Д. Магомедов, ⁴Х.Ю. Тагиров

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

¹105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

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

³Дагестанский филиал геофизической службы РАН,

³367008, г. Махачкала, ул. Белинского, 16, Россия,

⁴ООО «Дагсейсмо»,

⁴367030, г. Махачкала, ул. Ирчи-Казака, 11 а, Россия.

Резюме. Цель. Исследование структуры земной коры через определение скоростей сейсмических волн по предварительно разбитым участкам земной коры. **Метод.** Для определения скоростей сейсмических волн предлагается два математических метода. В основе первого лежит метод средневзвешенного, а второго - решение систем линейных алгебраических уравнений матричным методом. В качестве исходных параметров при расчетах используются данные произошедших землетрясений - координаты гипоцентров землетрясений и сейсмодатчиков, а также времена пробега сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков. **Результат.** Решена задача определения скоростей распространения сейсмических волн на различных участках земной коры двумя различными методами. Получены плотности распределения ошибок в определении скоростей сейсмических волн для метода средневзвешенного, в шести различных ситуациях распределения скоростей сейсмических волн на местности, и для матричного метода, в случае распределения скоростей сейсмических волн на местности в шахматном порядке. **Вывод.** Предложенные методы позволяют уточнять координаты очагов произошедших землетрясений; использование метода итераций позволяет значительно улучшить точности определения координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн на различных участках. Наличие, при расчетах, значений скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры позволяет определять координаты очага землетрясения по новым методам, основанным на использовании фигуры второго порядка – гиперболоида, которые ранее сейсмологами не применялись.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмология, сейсмодатчик, сейсмическая волна, скорости сейсмических волн, распределение, структура

DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST BY CHANGING THE VELOCITY OF SEISMIC WAVES FROM THE EARTHQUAKE DATA

¹B.I. Shakhhtarin, ²T.G. Aslanov, ³H.D. Magomedov, ⁴H.Yu. Tagirov

¹Bauman Moscow State Technical University,

¹5, 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

³ Dagestan branch of the Geophysical Service of the Russian Federation Academy of Sciences,
³ 16 Belinsky St., Makhachkala 367008, Russia,
⁴ LLC «Dagseismo»,
⁴ 11 a Irchi-Kazaka St., Makhachkala 367030, Russia

Abstract. Objective. A study of the structure of the earth's crust by determining the velocities of seismic waves from previously broken sections of the earth's crust. **Methods.** Two mathematical methods are proposed for determining the seismic wave velocities. The first is based on the weighted average method, and the second is based on the matrix method for solving systems of linear algebraic equations. The initial parameters used in the calculations are data from earthquakes that occurred – the coordinates of earthquake centers of origin and seismic sensors, as well as the travel times of seismic waves from the earthquake center of origin to the seismic sensors. **Results.** The problem of determining the propagation velocity of seismic waves in different parts of the earth's crust is solved by two different methods. The distribution densities of errors in determining the seismic wave velocities are obtained for the weighted average method, in six different situations, for the distribution of seismic wave velocities on the ground, and the matrix method, in the case of distribution of seismic wave velocities on the ground in staggered order. **Conclusion.** The proposed methods allow refining the coordinates of the centers of the occurred earthquakes while using the iteration method can significantly improve the accuracy of determining the coordinates of the earthquake center of origin and the speeds of seismic waves in various areas. The presence of seismic wave velocities in various parts of the earth's crust during calculations allows determining the coordinates of the earthquake source using new methods based on the use of second-order hyperboloid figures, which were not previously used by seismologists.

Keywords: seismic survey, seismology, seismic sensor, seismic wave, seismic wave velocities, distribution, structure

Введение. В настоящее время расчет координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн [1]. Причем, эти значения считаются постоянными для больших участков земной коры [2].

В связи с этим, были разработаны методы, позволяющие вычислять средние скорости волн по отдельным направлениям земной коры [3]. В тоже время, по пути своего распространения сейсмические волны проходят через различные породы, при этом скорости и направления распространения волн в различных средах могут различаться друг от друга. Игнорирование этих обстоятельств приводит к значительным ошибкам в определении координат очага землетрясения.

Известны множество методов, которые позволяют определить координаты гипоцентров землетрясения. Одним из наиболее точных является метод сфер, который позволяет одновременно с определением координат гипоцентра также определять и скорости сейсмических волн по направлению от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков [3]. Применение иных методов ограничено тем, что для их использования необходима информация о структуре земной коры, к таким методам можно отнести все методы, использующие в своей основе фигуру второго порядка – гиперboloид [4-8].

В работе [9] предложен метод по определению структуры земли, однако по ней в расчетах использовалась информация о координатах эпицентра, а не гипоцентра землетрясения, а в работе [10] была предложена общая концепция матричного метода.

В рамках настоящей работы разработаны математических методы для определения структуры земной коры по изменению скоростей сейсмических волн по произошедшим землетрясениям.

Постановка задачи. Для нахождения скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры используются данные произошедших землетрясений. В качестве таких данных рассматриваются: координаты гипоцентров землетрясений [11-18], сейсмодатчиков и

времена пробега сейсмических волн от очагов землетрясений до сейсмодатчиков. По найденным скоростям, по методикам сейсморазведки может быть определена структура исследуемого участка земли

Методы исследования. Для исследования структуры земли была задана область с размерами 160 на 160 квадратных километров ($160 \times 160 \text{ км}^2$) (рис.1), которая разбита на девять равных участков. Считается, что скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков не одинаковые.

На рис. 1, точками S_1, S_2, S_3 , обозначены сейсмодатчики, точками O_1, O_2, O_3 – гипоцентры землетрясений, точками T_{56} и T_{69} – пересечение трассы, по которым распространяется сейсмическая волна от очага землетрясения O_3 к сейсмодатчику S_3 с границами участков соответственно V_5 - V_6 и V_6 - V_9 .

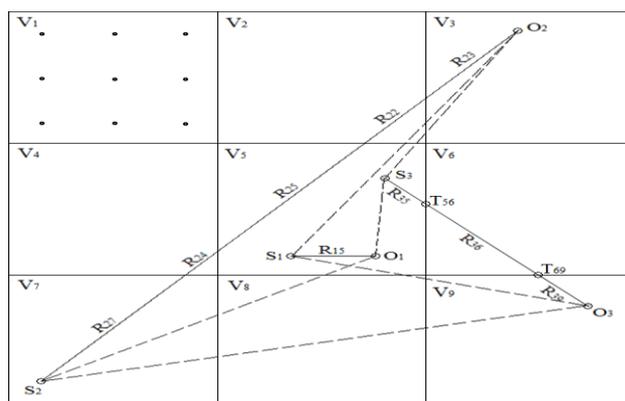


Рис.1. Пояснение к методу определения скоростей сейсмических волн
Fig.1. Explanation of the method for determining the velocities of seismic waves

При этом предполагается, что очаги землетрясения и сейсмодатчики могут располагаться в девяти позициях на каждом из участков определяемые формулами (участок V_1 на рис.1):

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; X_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; \\ Y_o &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; Y_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}, \end{aligned} \quad (1),$$

где: X_o, Y_o, X_s, Y_s – координаты по оси абсцисс и ординат очага землетрясения и сейсмодатчиков соответственно;

R – длина ребра исследуемой области;

M – число участков (квадратов) на которую разбита исследуемая область;

S – число точек внутри участка с одинаковой скоростью в которых могут располагаться сейсмодатчики или гипоцентры землетрясений;

n – переменная изменяющаяся в интервале от 0 до 9.

На рис.1, в верхнем левом квадрате, графически показаны возможные точки расположения очагов землетрясений или сейсмодатчиков.

Найдем координаты точек пересечения трасс, по которым распространяется сейсмическая волна с границами каждого из 9 участков определяемые формулами:

– по оси абсцисс:

$$Y_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_1 \right) \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} + Y_1; \quad X_i = \frac{Rk}{M}, \quad (2),$$

– по оси ординат:

$$Y_i = \frac{Rk}{M}; \quad X_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_1 \right) \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} + X_1, \quad (3),$$

где: $X_1 = X_o, Y_1 = Y_o, X_N = X_s, Y_N = Y_s$;

k – номер границы пересечений;

i – переменная изменяющаяся в интервале от 2 до $N-1$.

Время распространения сейсмической волны на каждом из участков может быть найдено по выражению:

$$t_j = \frac{\sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2}}{V_j} + \sqrt{\frac{(Z_o - Z_s)^2((X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2)}{((X_o - X_s)^2 + (Y_o - Y_s)^2)V_j^2}} \quad (4),$$

где: i – переменная, изменяющаяся в интервале от 1 до $N-1$;

j – переменная, изменяющаяся в интервале от 1 до 9 обозначающая номер участка;

V_j – скорость сейсмической волны в соответствующей ячейке.

Суммарное время прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика может быть определено как сумма времен пробега сейсмической волны через участки, на которые разбита исследуемая область.

Определение структуры земной поверхности методом средневзвешенного

На рис.1 отрезки, образующиеся пересечением заданных участков на пути распространения сейсмической волны от очага землетрясения к сейсмодатчику, обозначены через R_{ij} , где i – номер, обозначающий один из путей распространения сейсмической волны, а j – номер участка, через который данная волна проходит.

Условно, все трассы распространения сейсмических волн, кроме одного от гипоцентра землетрясения до сейсмического датчика, показаны пунктирными и в расчетах не участвуют. Это вызвано тем, что для каждого конкретного землетрясения вычисляется усредненная скорость сейсмических волн от очага землетрясения до сейсмодатчиков, а использование данных по остальным трассам приведет к увеличению расхода машинного времени.

Необходимо отметить, что:

– чем больше длина пути, по которому сейсмическая волна проходит через тот или иной участок земной коры, тем большее влияние она оказывает на среднюю скорость сейсмической волны. Например, влияние на среднюю скорость отрезка пути R_{27} больше, чем отрезка R_{22} ;

– чем дальше располагается сейсмический датчик от гипоцентра землетрясения, тем меньше точность вычисления скорости сейсмической волны для конкретного участка.

На основании изложенного можно составить уравнение средней взвешенной скорости для определения скоростей сейсмической волны, к примеру, для пятого участка:

$$V_{u5} = \frac{V_1 \sqrt{R_{15} + Z_{15}}/R_1 + V_2 \sqrt{R_{25} + Z_{25}}/R_2 + V_3 \sqrt{R_{35} + Z_{35}}/R_3}{\sqrt{R_{15} + Z_{15}}/R_1 + \sqrt{R_{25} + Z_{25}}/R_2 + \sqrt{R_{35} + Z_{35}}/R_3} \quad (5),$$

где V_i – средняя скорость сейсмической волны от сейсмодатчика S_i до гипоцентра землетрясения O_i ;

V_{u5} – скорость сейсмической волны на пятом участке;

Z_{i5} – изменение глубины трассы распространения сейсмической волны от i -ого сейсмодатчика до i -ого очага землетрясения на пятом участке;

R_i – расстояние от i -ого сейсмодатчика до i -ого очага землетрясения.

Для расчета средневзвешенной скорости были рассмотрены 6 различных случаев распределения скоростей сейсмических волн на местности:

– изменение скоростей сейсмических волн происходит дискретно в шахматном порядке (2.4 и 4.4 км/с). При этом были внесены случайные изменения скорости для каждой ячейки в пределах от -1 до 1 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2а.

– скорости сейсмических волн убывают от центра к краям дискретно со скоростями 4.4, 3.4 и 2.4 км/с. Для каждой ячейки вводятся случайные изменения скоростей в пределах от -0.5 до 0.5 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2б.

– скорости сейсмических волн возрастают слева направо с дискретно 2.4, 2.9, 3.4, 3.9 и 4.4 км/с. В каждой ячейке к скоростям добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 до 0.25 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2в.

– скорости сейсмических волн чередуются по горизонтали дискретно 2.4 и 4.4 км/с, к которым в каждой ячейке добавляются случайные изменения в пределах от -1 до 1 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис.2г.

– скорости сейсмических волн распределены по диагонали с возрастанием с дискретным изменением скоростей 2.4, 2.65, 2.9, 3.15, 3.4, 3.65, 3.9, 4.15 и 4.4 км/с. к которым в каждой ячейке, добавляются случайные изменения в пределах -0.125 до 0.125 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2д.

– скорости сейсмических волн распределены случайным образом для всех участков земной коры. При этом скорости для каждой ячейки изменялись в пределах от 2.4 до 4.4 км/с. Нормированное распределение ошибок приведено на рис. 2е.

Для построения графиков было проведено 500 машинных экспериментов.

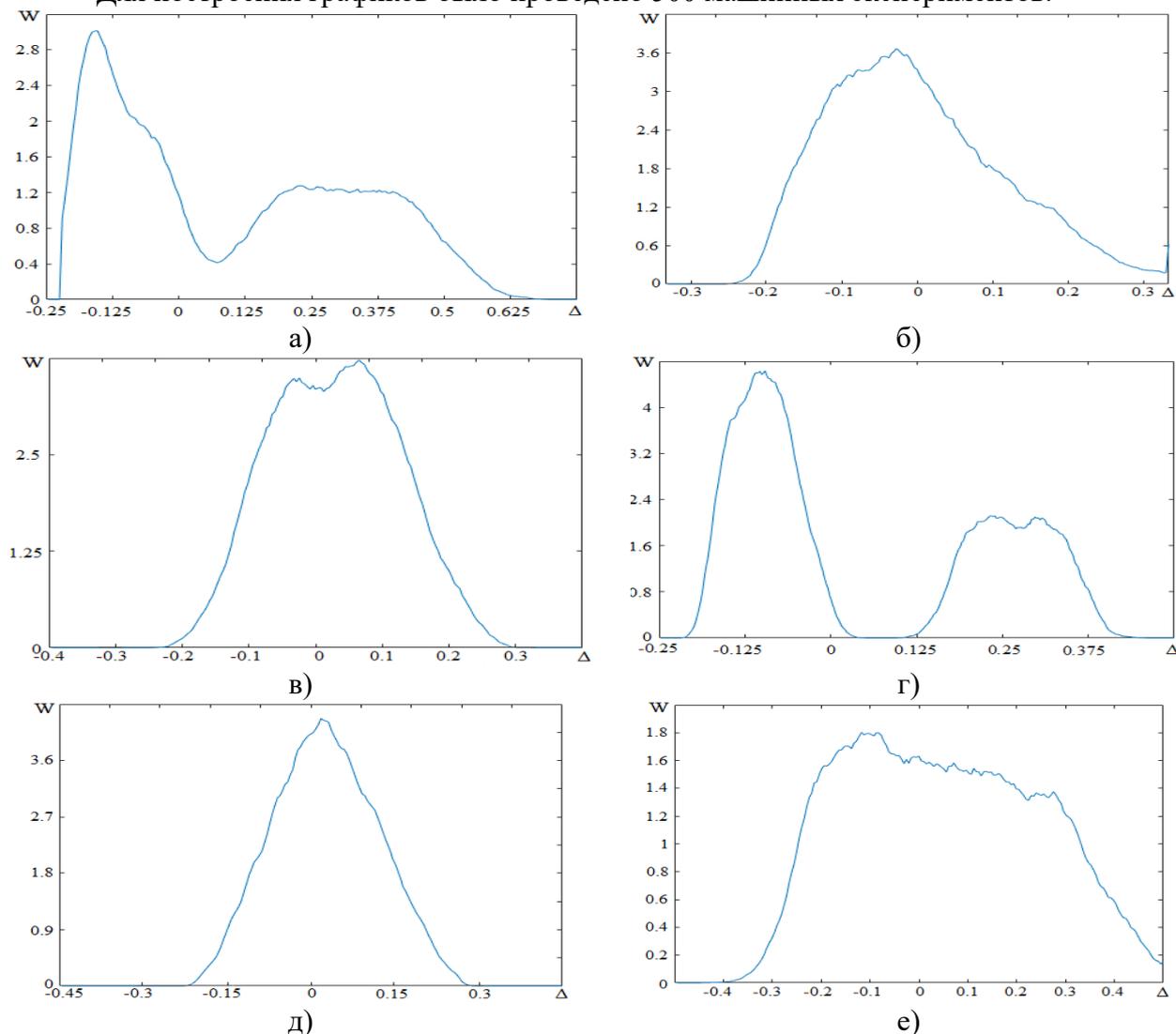


Рис. 2. Плотность распределения ошибок при различных способах изменения скоростей сейсмических волн

Fig.2. Density of distribution of errors for different ways of changing the velocities of seismic waves

На рис.2, по оси абсцисс приведены проценты в форме десятичных дробей.

Определение структуры земли матричным методом

Для решения задачи матричным методом необходимо в уравнении (1) во все комбинации размещения сейсмодатчиков и очагов землетрясений ввести случайные изменения их координат. Это вызвано необходимостью избежать вырождение матрицы при ее решении. После внесения изменений уравнения (1) примут вид:

$$\begin{aligned} X_o &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Xr_n; X_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Xr_n; \\ Y_o &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Yr_n; Y_s = \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS} + Yr_n, \end{aligned} \quad (6),$$

где Xr_n и Yr_n – случайные смещения по оси абсцисс и ординат от заданного положения.

Определим отрезки и время пробега сейсмической волны от сейсмодатчика до очага землетрясения для каждого участка земной коры.

Структуру земной коры по [10] предлагалось определить следующим образом (рис.3).

Здесь S_1 и S_2 – сейсмодатчики, O_1 и O_2 – очаги двух произошедших землетрясений, пунктирной линией представлено разделение среды на 4 части для которых и будут определены скорости сейсмических волн.

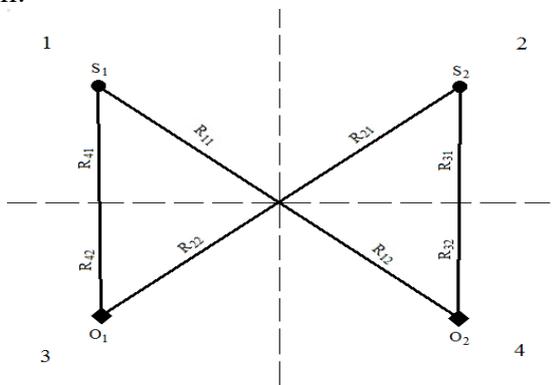


Рис.3. Схематичное представление распространение волн в среде
Fig. 3. Schematic representation of wave propagation in a medium

Пунктирные линии делят каждое направление пробега сейсмической волны на две части. В соответствии с известными расстояниями пробега сейсмических волн, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} t_1 = t_{11} + t_{12} \\ t_2 = t_{21} + t_{22} \\ t_3 = t_{31} + t_{32} \\ t_4 = t_{41} + t_{42} \end{cases} \quad (7),$$

где $t_{ij} = R_{ij}/V_k$, t_i – время пробега сейсмической волны по i -му направлению, V_k – скорость сейсмической волны для данного участка.

Заменим в системе уравнений (7) t_{ij} на R_{ij}/V_k

$$\begin{cases} t_1 = R_{11}/V_1 + R_{12}/V_4 \\ t_2 = R_{21}/V_2 + R_{22}/V_3 \\ t_3 = R_{31}/V_2 + R_{32}/V_4 \\ t_4 = R_{41}/V_1 + R_{42}/V_3 \end{cases} \quad (8),$$

В результате получим систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными, решив которую, можно определить скорости сейсмических волн для четырех сред.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = R_{11}/(t_1 - R_{12}/V_4) \\ V_2 = R_{21}/(t_2 - R_{22}/V_3) \\ V_4 = \frac{R_{21}R_{32}}{R_{21}t_3 - R_{31}t_2 - R_{22}R_{31}/V_3} \\ V_3 = \frac{R_{12}R_{41}R_{22}R_{31} + R_{42}R_{21}R_{32}R_{11}}{t_4R_{21}R_{32}R_{11} - t_1R_{21}R_{32}R_{11} + t_3R_{41}R_{12}R_{21} - t_2R_{31}R_{41}R_{12}} \end{array} \right. \quad (9),$$

Этим же способом можно решить задачу и для большего числа произошедших землетрясений, и сейсмодатчиков. Но определение структуры земли по двум сейсмодатчикам и двум очагам землетрясений достаточно простая задача. Если число сейсмодатчиков и/или гипоцентров землетрясений увеличить, то не понятно каким образом нужно делить земную кору на участки с одинаковой структурой. Решение такой задачи возможно методом проб и ошибок, что, на практике, не приемлемо для ее решения в автоматическом режиме.

На рис. 4 приведено схематичное представление распространение сейсмических волн для трех сейсмодатчиков и трех гипоцентров землетрясений.

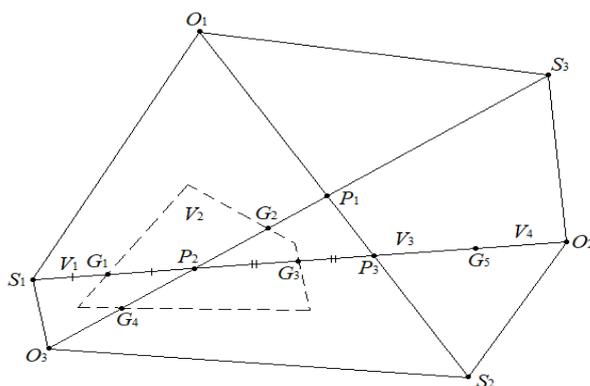


Рис.4. Схематичное представление распространение волн в среде с тремя сейсмодатчиками и тремя гипоцентрами землетрясений

Fig.4. Schematic representation of wave propagation in a medium with three seismic sensors and three earthquake hypocenters

Здесь требуется иной подход к определению структуры земной коры, основанный на том, что в точках (узлах) пересечения различных трасс пробега сейсмических волн к сейсмодатчикам (точки $S_1, S_2, S_3, O_1, O_2, O_3, P_1, P_2, P_3$) скорости одинаковые.

При этом, область с одинаковой скоростью, например, для точки P_2 можно получить, разделив на две равные части отрезки S_1P_2, O_3P_2, P_2P_1 и P_2P_3 .

С учетом сказанного можно составить систему уравнений по аналогии с системой уравнений (8). Так для отрезка S_1O_2 уравнение будет иметь вид:

$$t_1 = \frac{S_1G_1}{V_1} + \frac{G_1G_3}{V_2} + \frac{G_3G_5}{V_3} + \frac{G_5O_2}{V_4} \quad (10),$$

В приведенном примере в системе 9 уравнений, и 9 неизвестных переменных, но если добавить хотя бы еще один сейсмодатчик, либо очаг землетрясения, то получим 12 уравнений для 15 неизвестных.

На рис. 5 приведено схематичное представление распространения волн в среде с тремя сейсмодатчиками и тремя гипоцентрами землетрясений. Для сокращения числа неизвестных упростим систему уравнений исходя из допущения, что при малых расстояниях между узлами скорости на этих узлах одинаковы. Так для приведенного примера узлами с одинаковыми скоростями будут точки P_7 и P_8, P_2 и P_7, P_4 и P_6, P_8 и P_3 .

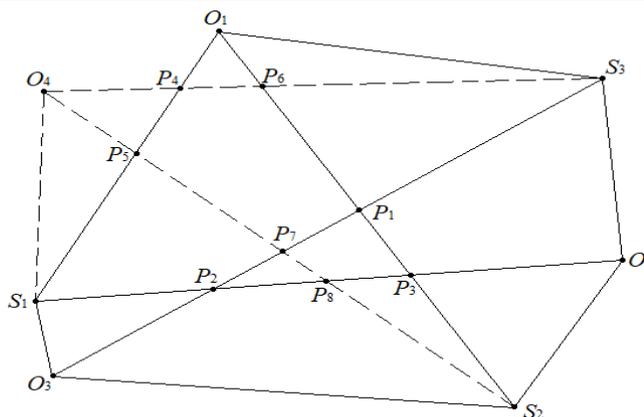


Рис. 5. Схематичное представление распространения волн в среде с тремя сейсмодатчиками и четырьмя гипоцентрами землетрясений

Fig.5. Schematic representation of wave propagation in a medium with three seismic sensors and four earthquake hypocenters

По полученной системе уравнений матричным методом была рассчитана плотность распределения ошибок при изменении скоростей сейсмических волн в шахматном порядке (рис. 6). Выбор такого порядка изменения скоростей при расчете обусловлен тем, что по методу средневзвешенного для такого чередования скоростей получаются наилучшие результаты.

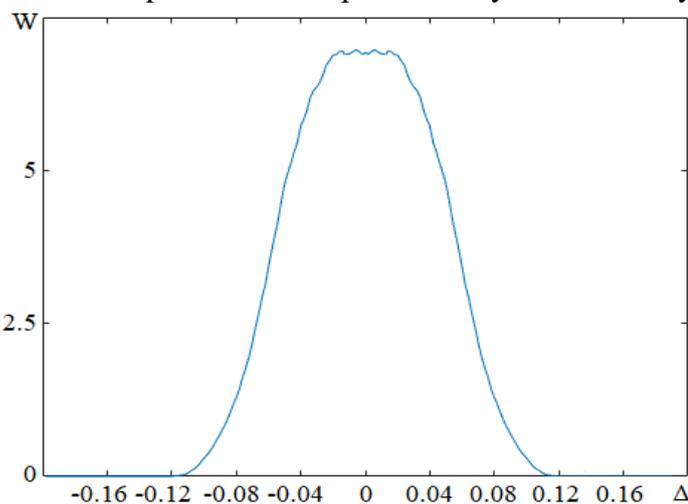


Рис.6. Плотность распределения ошибок при использовании матричного метода

Fig.6. Density of distribution of errors when using the matrix method

Можно заметить, что точность определения скоростей сейсмических волн по матричному методу даже при шахматном распределении скоростей дает лучшие результаты, чем метод средневзвешенного.

Так как в реальных условиях координаты гипоцентра землетрясения и скорости сейсмических волн вычисляются с погрешностями, то решать данную систему уравнений необходимо в следующей последовательности:

1. Путем упрощения сократить число неизвестных, с тем, чтобы их число было меньше числа уравнений в системе.
2. Путем исключения неизвестных подстановки одного уравнения в другое, сократить число неизвестных до 3;
3. Найти наименьшее расхождение по равенствам в уравнениях методом перебора трех значений неизвестных.

Обсуждение результатов. По произведенным расчетам структуры земной коры, для случая, когда скорости сейсмических волн чередовались в шахматном порядке (наихудший вариант для выполнения расчетов), максимальная ошибка измерения скоростей сейсмических волн по всем участкам составила 0,45 км/с.

При этом отклонения скоростей сейсмических волн для каждого участка по сравнению с другими отличались до второго знака после запятой.

Ошибка в 0,45 км/с обусловлена тем, что при расчете число неизвестных в системе линейных алгебраических уравнений было больше, чем самих уравнений. Для их уменьшения ближайшие точки пересечения трасс сейсмических волн по скоростям приравнивались друг другу. Это приводило к тому, что одна точка пересечения трасс могла находиться на одном участке, а другая точка на другом участке, что в конечном участке и привело как к ошибке вычислений, так и их симметричности.

Применение метода итераций для определения координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн, позволит значительно улучшить точность определения обоих показателей. Наличие расчетных скоростей сейсмических волн для различных участков земной коры позволяют использовать для определения координат очага землетрясения фигуру второго порядка – гиперболоид.

Вывод. Метод средневзвешенного следует применять, когда на местности скорости сейсмических волн распределены с убыванием от центра по краям (к примеру, одинокая гора), либо имеется равномерное увеличение плотности пород и т.д. (рис. 2б, 2в, 2д).

Использование матричного метода ограничено тем, что определитель матрицы в некоторых случаях может быть равным нулю, в таких случаях задачу нужно решать численными методами.

Среднее время решения задачи методом средневзвешенного, когда исследуемая область разбита на 25 участков и в каждом из участков гипоцентр землетрясения и сейсмодатчика могут находиться в одной из 9 позиций, составляет около 10 секунд, а для матричного метода около 19 часов.

Библиографический список:

1. Бляс Э. А., Середа А.-В. И. Определение коэффициентов отражения продольных и поперечных волн по сейсмограммам продольных волн // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 3. С. 389-402.
2. Етирмишли Г. Д., Казымова С. Э., Казымов И. Э. Изучение изменения скоростей продольных волн с глубиной по цифровым сейсмологическим данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы III Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 54-57.
3. Асланов Г. К., Даниялов М. Г., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2010. № 56. С. 54-59.
4. Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>
5. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):118-125. doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125
6. Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(2):61-70. doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболоидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
8. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Асланов Г.К. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. 2018; №11 (72) – С. 503-509
9. Тагиров Х. Ю., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Определение средневзвешенной скорости сейсмической волны на участках Земли по пути ее распространения // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2017. Т. 11. № 3. С. 108-114.
10. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Тагиров Х. Ю. Определение структуры земли по сейсмограммам произошедших землетрясений // Информационные технологии в экономике и управлении: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 19-20 ноября 2014 г. Махачкала: ДГТУ, 2014. С. 242-246
11. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning/ S. D'Amico – InTech. JanezaTrdine, 2012. 460 p.
12. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3
13. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. 154 p.
14. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. 272 p.

15. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. 298 p.
16. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие / Т.Б. Яновская. Санкт-Петербург, 2008. 222 с
17. 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.
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
19. Конев В.В. Линейная алгебра. Учебное пособие. Томск. Изд. ТПУ. 2008. 65 стр.
20. Аналитическая геометрия и линейная алгебра: учеб. пособие / А. Е. Умнов. 3-е изд., испр. и доп. М. : МФТИ, 2011. 544 с. ISBN 978-5-7417-0378

References:

1. Blyas E. A., Sereda A.-V. I. Opredeleniye koeffitsiyentov otrazheniya prodol'nykh i poperechnykh voln po seysmogrammam prodol'nykh voln // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 9. № 3. С. 389-402. [Blyas E. A., Sereda A. V. I. Determination of P- and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2006. T. 9.No. 3. pp. 389-402. (In Russ)]
2. Yetirmishli G. D., Kazymova S. E., Kazymov I. E. Izucheniye izmeneniya skorostey prodol'nykh voln s glubinoi po tsifrovym seysmologicheskim dannym // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy III Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. Obninsk: GS RAN, 2008. С. 54-57. [Yetirmishli GD, Kazymova SE, Kazymov IE Study of changes in the velocities of longitudinal waves with depth from digital seismological data // Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the III International Seismological School. Obninsk: GS RAN, 2008. pp. 54-57. (In Russ)]
3. Aslanov G. K., Daniyalov M. G., Aslanov T. G., Magomedov KH. D. Ob odnom metode opredeleniya ochaga zemletryaseniya s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln // Trudy Instituta geologii DNTS RAN. 2010. № 56. С. 54-59. [Aslanov GK, Daniyalov MG, Aslanov TG, Magomedov Kh.D. On one method for determining the source of an earthquake with simultaneous determination of the velocities of seismic waves // Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010. No. 56. pp. 54-59. (In Russ)]
4. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur chetvertogo i vtorogo poryadka – ovala Kassini i giperboly. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142> [Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (4): 134-142. doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142(In Russ)]
5. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(2):118-125. doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125 [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>(In Russ)]
6. Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analiz plotnosti raspredeleniya oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya po metodam sfer i ellipsoidov. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2019;46(2):61-70. doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70 [Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the distribution density of errors in determining the coordinates of the earthquake source by the methods of spheres and ellipsoids. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (2): 61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>(In Russ)]
7. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Issledovaniye zavisimosti oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98> [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Study of the dependence of errors in determining the coordinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (4): 87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>(In Russ)]
8. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur vtorogo poryadka - ellipsa i giperboly // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2018; №11 (72) – S. 503-509 [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - ellipse and hyperbola // Automation. Modern technologies. 2018; No. 11 (72) - P. 503-509(In Russ)]
9. Tagirov KH. YU., Aslanov T. G., Magomedov KH. D. Opredeleniye srednevzveshennoy skorosti seysmicheskoy volny na uchastkakh Zemli po puti yeye rasprostraneniya // Izvestiya DGPU. Yestestvennyye i tochnyye nauki. 2017. T. 11. № 3. S. 108-114. [Tagirov Kh. Yu., Aslanov TG, Magomedov Kh. D. Determination of the weighted average velocity of a seismic wave in the areas of the Earth along the path of its propagation. Izvestiya DGPU. Natural and exact sciences. 2017.Vol. 11.No. 3.P. 108-114. (In Russ)]
10. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Tagirov KH. YU. Opredeleniye strukturyzemli po seysmogrammam proizoshedshikh zemletryaseniy // Informatsionnyye tekhnologii v ekonomike i upravlenii: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 19-20 noyabrya 2014 g. Makhachkala: DGTU, 2014. S. 242-246 [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Tagirov Kh. Yu. Determination of the structure of the earth from seismograms of the occurred earthquakes // Information technologies in economics and management: materials of the All-Russian scientific-practical conference, 19-20 November 2014 Makhachkala: DSTU, 2014. pp. 242-246 (In Russ)]
11. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning / S. D'Amico - InTech. JanezaTrdine, 2012. 460 p.
12. Robert Garotta. Shear waves: from registration to interpretation. Short course of lectures for higher educational institutions, 2000 Series No. 3
13. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster - University of Utah, 2007. 154 p.

14. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara - Cambridge University Press, 1981. 272 p.
15. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett - Australian National University Press, 2009 . 298 p.
16. Yanovskaya T.B. Osnovy seismologii: uchebnoye posobiye / T.B. Yanovskaya. Sankt-Peterburg, 2008. 222 s [Yanovskaya T.B. Fundamentals of seismology: textbook / T.B. Yanovskaya. St. Petersburg, 2008 . 222 p.
17. Shakhriyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Matematicheskoye modelirovaniye kak sposob podderzhki prinyatiya resheniy v sluchaye vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy // Katalog «Pozharnaya bezopasnost» 2003. S. 240-241. [Shakhriyan M.A., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in the event of emergencies // Catalog "Fire safety" 2003. pp. 240-241. (In Russ)]
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013.300 p.
19. Konev V.V. Lineynaya algebra. Uchebnoye posobiye. Tomsk. Izd. TPU. 2008. 65 str. [Konev V.V. Linear algebra. Tutorial. Tomsk. Ed. TPU. 2008. 65 p. (In Russ)]
20. Analiticheskaya geometriya i lineynaya algebra: ucheb.posobiye / A. E. Umnov. 3-ye izd., ispr. i dop. M. : MFTI, 2011. – 544 s. ISBN 978-5-7417-0378 [Analytical geometry and linear algebra: textbook / A. E. Umnov. 3rd ed., Rev. and add. M.: MFTI, 2011. 544 p. ISBN 978-5-7417-0378(In Russ)]

Сведения об авторах:

Шахтарин Борис Ильич, доктор технических наук, профессор, кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» e-mail: shakhtarin@mail.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах и вычислительной техники, e-mail: Tabasik@gmail.com

Магомедов Хаскил Джарулаевич, директор, e-mail: info@dbgsras.ru

Тагиров Халипа Юсупович, генеральный директор, e-mail: halipa92@yandex.ru

Information about authors:

Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci., (Technical), Prof., Department of "Autonomous Information and Control Systems" e-mail: shakhtarin@mail.ru

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering, e-mail: Tabasik@gmail.com

Khaskil D. Magomedov, Director, e-mail: info@dbgsras.ru

Halipa Yu. Tagirov, General Director, e-mail: halipa92@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.11.2020.

Принята в печать 28.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.11.2020.

Accepted for publication 28.11.2020.

Для цитирования: К.Р. Айдемиров, В.П. Агапов, Г.М. Муртазалиев. Применение многослойных конечных элементов переменной толщины при расчете железобетонных плит в вычислительном комплексе «Принс». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4):112-121. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-112-121

For citation: K.R. Aidemirov, V.P. Agapov, G.M. Murtazaliev. Application of multilayer finite elements of variable thickness in the calculation of reinforced concrete slabs in the "Prince" computer complex. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):112-121. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-112-121

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.74:624.075

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-112-121

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ «ПРИНС»

¹К.Р. Айдемиров, ²В.П. Агапов, ¹Г.М. Муртазалиев

^{1,3}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,3}367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия,

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

²1129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Россия

Резюме. Цель. Описывается семейство многослойных конечных элементов, предназначенных для расчета железобетонных плит и оболочек переменной толщины. Рассматриваются особенности формирования матриц жесткости, связанные с переменностью сечения элементов. **Метод.** В основе семейства лежит простейший плоский треугольный элемент, построенный с использованием гипотезы Кирхгофа. Поперечные перемещения в этом элементе аппроксимируются неполным кубическим полиномом. Такой элемент непригоден для практического применения, но на его основе построены усовершенствованные элементы трех- и четырехугольной формы в плане. Особое внимание уделено учету переменности поперечного сечения. **Результат.** Приводятся результаты тестирования разработанных элементов и показываются преимущества их использования в практике проектирования и расчета конструкций. **Вывод.** Разработанный программный комплекс ПРИНС может оказаться полезным при проектировании и расчете конструкций, содержащих плиты переменной толщины.

Ключевые слова: строительные конструкции, железобетонные плиты постоянного и переменного сечения, метод конечных элементов

APPLICATION OF MULTILAYER FINITE ELEMENTS OF VARIABLE THICKNESS IN THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE SLABS IN THE "PRINCE" COMPUTER COMPLEX

¹K.R. Aidemirov, ²V.P. Agapov, ¹G.M. Murtazaliev

¹Daghestan State Technical University,

¹70 Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²National Research Moscow State University of Civil Engineering,

²26 Yaroslavl Highway, Moscow 129337, Russia

Abstract. Objective. A family of multilayer finite elements designed for calculating reinforced concrete slabs and shells of variable thickness is described. The features of the formation of stiffness matrices associated with the variability of the cross-section of elements are considered. **Methods.** The family is based on the simplest planar triangular element constructed using the Kirchhoff hypothesis. The transverse displacements in this element are approximated by an incomplete cubic polynomial. This element is not suitable for practical use, but it is based on improved elements of three- and four-sided shape in the plan. Special attention is paid to the consideration of cross-section variability. **Re-**

sults. *The results of testing the developed elements are presented and the advantages of their use in the practice of design and calculation of structures are shown. Conclusion.* *The developed PRINCE software package can be useful in the design and calculation of structures containing plates of variable thicknesses.*

Keywords: *building structures, reinforced concrete slabs of constant and variable cross-section, finite element method*

Введение. Плиты и оболочки переменной толщины применяются в различных областях техники, как в виде самостоятельных элементов, так и в составе комбинированных систем. В авиации, например, к подобным конструкциям относятся лопасти воздушных винтов самолетов, имеющие сложную пространственную конфигурацию, и некоторые элементы конструкции крыла [1,2]. В строительстве плиты и оболочки переменного сечения используются, главным образом, в железобетонных конструкциях. Классическим примером оболочки переменной толщины является, например, оболочка градирни [3]. Панели переменного сечения используются в пролетных строениях мостов, подпорных стенах, путепроводах, сборных крупноразмерных плитах покрытий промышленных и гражданских зданий типов «Т», «2Т», «П», «ПСП», монолитных и сборных перекрытиях и покрытиях многоэтажных зданий, стенах бункеров и других сооружениях [4,5].

Железобетонные конструкции, работающие как консольные элементы, в своем оптимальном варианте могут иметь переменные поперечные сечения, как по длине, так и по высоте.

Не во всех вычислительных комплексах включен конечный элемент переменной толщины и поэтому проектировщики вынуждены упрощать расчетные схемы плит и представлять их как плиты ступенчато-переменного сечения [6,7]. В таком случае, в узлах излома происходит концентрация напряжений, которая неблагоприятно влияет на результаты расчета конструкций.

Следует отметить, что в работах, посвященных расчету железобетонных плит с учетом нелинейности деформирования, также рассматриваются плиты, в основном, постоянного сечения [8,9]).

Постановка задачи. Постепенные утолщения к линии контура плиты и переменности сечения изменяют условия работы плиты и при искривлении ее срединной поверхности начинает работать как пологая оболочка. При этом в расчетах конструкций необходимо использовать оболочечные конечные элементы, как постоянной, так и переменной толщины.

Отсутствие общедоступных и апробированных методик расчета плит переменной толщины создает проблемы при проектировании и расчете конструкций, содержащих подобные элементы.

Упомянутые выше проблемы решены в вычислительном комплексе ПРИНС, в составе которого имеются разработанные конечные элементы плит и оболочек переменной толщины трех- и четырехугольной формы в плане, предназначенные как для линейных, так и для нелинейных расчетов.

Методы исследования. Ниже описывается семейство многослойных конечных элементов, реализованное в вычислительном комплексе ПРИНС, общее описание которого можно найти в работах [10,11]. В данной статье рассматриваются особенности формирования матриц жесткости, связанные с переменностью сечения элементов.

В основе разработанного семейства лежит простейший многослойный элемент треугольной формы в плане, показанный на рис.1. Предполагается, что толщина элемента изменяется по линейному закону. Принятая при построении алгоритма формирования матричных характеристик конечного элемента разбивка на слои показана на рис.1.

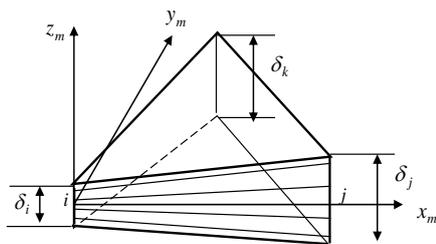


Рис.1. Многослойный треугольный конечный элемент
 Fig.1. Multilayer triangular finite element

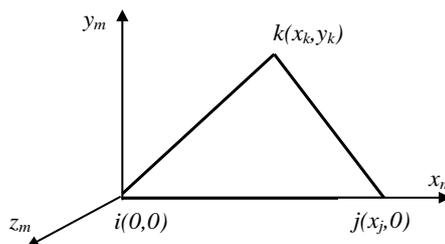


Рис. 2. Местные оси треугольного элемента
 Fig.2. Local axes of a triangular element

В качестве узловых неизвестных принимаются линейные перемещения вдоль осей x_m , y_m , z_m и углы поворота вокруг осей x_m и y_m (рис.2).

Элемент строится на основе гипотезы Кирхгофа, при этом в качестве аппроксимирующих функций перемещений внутренних точек принимаются полиномы первой степени для перемещений в плоскости и неполный кубический полином третьей степени для поперечных перемещений.

Матрица жесткости элемента вычисляется по формуле (например, [10]):

$$\mathbf{K}_{эл} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dv \quad (1)$$

где: \mathbf{B} – геометрическая матрица, связывающая компоненты деформаций и перемещений, и \mathbf{C} – физическая матрица, связывающая компоненты напряжений с компонентами деформаций. При использовании гипотезы Кирхгофа матрица \mathbf{B} приводится к виду:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_p \mathbf{A}_p^{-1} \mathbf{M}; -z \mathbf{B}_b \mathbf{A}_b^{-1}] \quad (2)$$

где: при принятых аппроксимирующих функциях перемещений \mathbf{B}_p , \mathbf{A}_p^{-1} и \mathbf{A}_b^{-1} – некоторые числовые матрицы, \mathbf{B}_b – матрица, элементы которой зависят от координат x и y внутренних точек конечного элемента (способы вычисления этих матриц хорошо известны; см., например [10]).

Подставляя (2) в (1), получаем

$$\mathbf{K}_{эл} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_p & \mathbf{K}_{pb} \\ \mathbf{K}_{pb}^T & \mathbf{K}_b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_p &= \int_V [\mathbf{A}_p^{-1}]^T \mathbf{B}_p^T \mathbf{C} \mathbf{B}_p \mathbf{A}_p^{-1} dv; \\ \mathbf{K}_b &= \int_V z^2 [\mathbf{A}_b^{-1}]^T \mathbf{B}_b^T \mathbf{C} \mathbf{B}_b \mathbf{A}_b^{-1} dv; \\ \mathbf{K}_{pb} &= \int_V -z [\mathbf{A}_p^{-1}]^T \mathbf{B}_p^T \mathbf{C} \mathbf{B}_b \mathbf{A}_b^{-1} dv. \end{aligned} \quad (4)$$

Учтем теперь переменность толщины элемента. Ход вычислений рассмотрим на примере матрицы \mathbf{K}_b .

Интегрирование по координате z во второй строке формулы (4) выполним по слоям, предполагая, что в пределах каждого слоя свойства материала по толщине слоя не меняются. Получим:

$$\mathbf{K}_b = [\mathbf{A}_b^{-1}]^T \int_F \mathbf{B}_b^T \sum \left(\mathbf{C}_{cl} \frac{z_{cl,6}^3 - z_{cl,n}^3}{3} \right) \mathbf{B}_b d\mathbf{A}_b^{-1} \quad (5)$$

где: z_{cl}^6 и z_{cl}^n - координаты нижней и верхней границы слоя по оси z .

Интегрирование в формуле (5) выполняется по площади треугольника F . Величины z_{cl}^6 и z_{cl}^n зависят от координат x и y .

Будем считать, что толщина плиты изменяется по линейному закону. Тогда для любого слоя плиты можно записать, что

$$z_{cl} = a_1 + a_2x + a_3y \quad (6)$$

Коэффициенты $a_1 \div a_3$, входящие в формулу (6), можно найти из условия, что координаты z слоя в узловых точках известны. Получаем:

- при $x = 0$ и $y = 0$ $z_{cl} = z_{i,cl} = a_1$;
- при $x = x_j$ и $y = 0$ $z_{cl} = z_{j,cl} = a_1 + a_2x_j$;
- при $x = x_k$ и $y = y_k$ $z_{cl} = z_{k,cl} = a_1 + a_2x_k + a_3y_k$;

Из приведенных выше условий находим:

$$a_1 = z_{i,cl}; \quad a_2 = \frac{z_{j,cl} - a_1}{x_j} = \frac{z_{j,cl} - z_{i,cl}}{x_j}; \quad (7)$$

$$a_3 = \frac{z_{k,cl} - a_1 - a_2x_k}{y_k} = \frac{z_{k,cl} - z_{i,cl} - \frac{z_{j,cl} - z_{i,cl}}{x_j} x_k}{y_k}.$$

С учетом соотношений (7) формула (6) принимает вид:

$$z_{cl} = z_{i,cl} + \frac{z_{j,cl} - z_{i,cl}}{x_j} x + \frac{z_{k,cl} - z_{i,cl} - \frac{z_{j,cl} - z_{i,cl}}{x_j} x_k}{y_k} y. \quad (8)$$

В соответствии с формулой (8) координаты z точек верхней и нижней поверхностей слоя будут определяться формулами:

$$z_{cl}^6 = z_{i,cl}^6 + \frac{z_{j,cl}^6 - z_{i,cl}^6}{x_j} x + \frac{z_{k,cl}^6 - z_{i,cl}^6 - \frac{z_{j,cl}^6 - z_{i,cl}^6}{x_j} x_k}{y_k} y. \quad (9)$$

$$z_{cl}^n = z_{i,cl}^n + \frac{z_{j,cl}^n - z_{i,cl}^n}{x_j} x + \frac{z_{k,cl}^n - z_{i,cl}^n - \frac{z_{j,cl}^n - z_{i,cl}^n}{x_j} x_k}{y_k} y \quad (10)$$

Запишем формулы (9) и (10) в виде:

$$z_{cl}^6 = a_{0,6} + a_{1,6}x + a_{2,6}y; \quad (11)$$

$$z_{cl}^n = a_{0,n} + a_{1,n}x + a_{2,n}y,$$

$$\text{где: } a_{0,6} = z_{i,cl}^6; a_{1,6} = \frac{z_{j,cl}^6 - z_{i,cl}^6}{x_j}; a_{2,6} = \frac{z_{k,cl}^6 - z_{i,cl}^6 - \frac{z_{j,cl}^6 - z_{i,cl}^6}{x_j} x_k}{y_k}.$$

$$a_{0,n} = z_{i,cl}^n; a_{1,n} = \frac{z_{j,cl}^n - z_{i,cl}^n}{x_j}; a_{2,n} = \frac{z_{k,cl}^n - z_{i,cl}^n - \frac{z_{j,cl}^n - z_{i,cl}^n}{x_j} x_k}{y_k}.$$

Выражение, стоящее под знаком интеграла в формуле (5) и представляющее собой матрицу порядка 9×9 , обозначим следующим образом:

$$\mathbf{R} = \mathbf{B}_b^T \sum \left(\mathbf{C}_{cl} \frac{z_{cl,6}^3 - z_{cl,n}^3}{3} \right) \mathbf{B}_b.$$

Выражение для матрицы \mathbf{K}_b принимает следующий вид:

$$\mathbf{K}_b = [\mathbf{A}_b^{-1}]^T \int_F \mathbf{R} d\mathbf{f} \mathbf{A}_b^{-1} \quad (12)$$

Вычисление матрицы \mathbf{K}_b в общем виде затруднительно, поэтому интеграл $\int_F \mathbf{R} d\mathbf{f}$ находится численными методами.

Рассмотренный выше треугольный элемент обладает хорошо известными недостатками (например, [10]). Но, на его основе получены усовершенствованные элементы как треугольной, так и четырехугольной формы.

Усовершенствованный треугольный элемент образуется усреднением характеристик трех субтреугольников, описанных выше.

Для каждого из субтреугольников вводится своя местная система координат, как показано на рис.3, и в этой системе вычисляются первоначально все основные характеристики – матрицы жесткости и матрицы перехода от деформаций к напряжениям. В качестве местной системы координат составного треугольника принимается система координат $\mathcal{X}\mathcal{U}$ первого субтреугольника.

Затем все характеристики субтреугольников стандартными преобразованиями переводятся к осям первого из них.

Например, матрица жесткости составного треугольника находится по формуле

$$\mathbf{K} = (\mathbf{K}_1 + \mathbf{L}_2^T \mathbf{K}_2 \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3^T \mathbf{K}_3 \mathbf{L}_3) / 3$$

где: $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ и \mathbf{K}_3 - матрицы жесткости субтреугольников 1, 2 и 3 в их местных осях; \mathbf{L}_2 и \mathbf{L}_3 - матрицы направляющих косинусов осей x_2, y_2 и x_3, y_3 в осях $\mathcal{X}\mathcal{U}$, соответственно.

Аналогичным образом находятся и усредняются остальные характеристики.

Для получения матрицы жесткости четырехугольного КЭ используем методику работы [2].

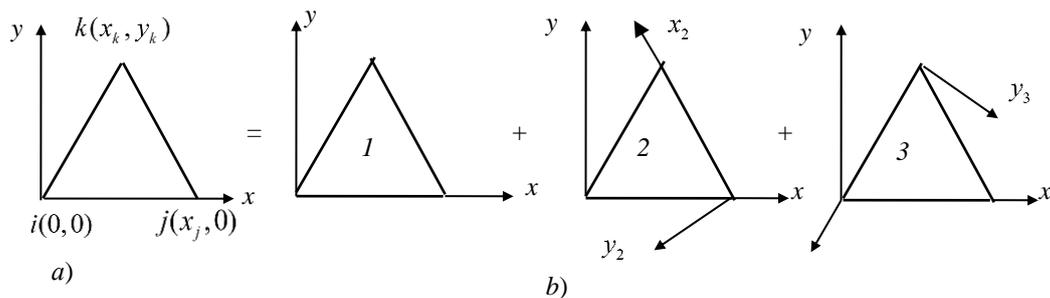


Рис. 3. Усовершенствованный треугольный элемент:
 а) заданный треугольник, б) субтреугольники
Fig. 3. Improved triangular element:
 a) a given triangle, b) subtriangles

Разобьем четырехугольный (не обязательно прямоугольный) конечный элемент на треугольники, как показано на рис.4.

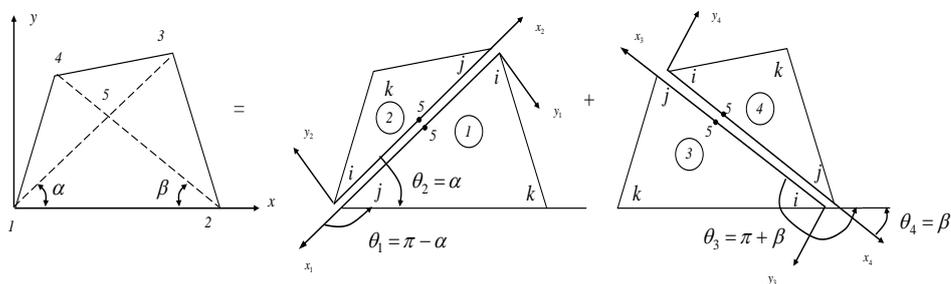


Рис. 4. Четырехугольный конечный элемент
Fig. 4. Quadrangular finite element

Матрица жесткости четырехугольного элемента в его местных осях x_u находится усреднением матриц жесткости треугольников $1 \div 4$, приведенных к этим осям, по формуле:

$$\mathbf{K}_{x-y} = (\mathbf{K}_{1x-y} + \mathbf{K}_{2x-y} + \mathbf{K}_{3x-y} + \mathbf{K}_{4x-y}) / 4$$

Матрицы жесткости треугольников в их местных осях находятся по формуле (1), а переход к местным осям четырехугольника осуществляется стандартным преобразованием:

$$\mathbf{K}_{m_{xy}} = \mathbf{L}_m^T \mathbf{K}_m \mathbf{L}_m, \quad m = 1, 2, 3, 4,$$

где $\mathbf{K}_{m_{xy}}$ – матрица жесткости m -го треугольника в местных осях четырехугольника, \mathbf{K}_m – матрица жесткости m -го треугольника в его местных осях, \mathbf{L}_m – матрица направляющих косинусов местных осей m -го треугольника в местных осях четырехугольника.

Обсуждение результатов. Для проверки точности разработанного семейства элементов решен ряд тестовых задач. Две из них приводятся ниже.

Задача 1. Рассчитывалась консольная пластинка переменной толщины, вытянутая в одном направлении. Размеры пластинки приведены на рис.5.

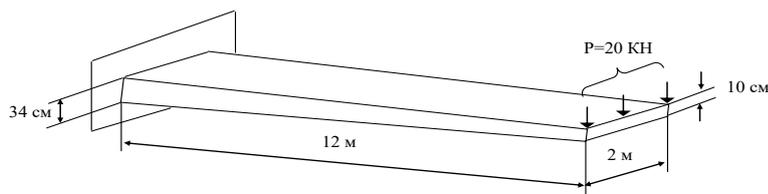


Рис. 5. Консольная плита
Fig. 5. Cantilever plate

Использовались два варианта расчетных схем при сетке узлов 4×4 и 4×12 . На рис.6 показаны напряжения в конечных элементах на верхней поверхности пластины для второго варианта. Результаты расчета сведены в табл.1 (напряжения на поверхности плиты усреднялись по

ряду элементов с одинаковой координатой «у»). Аналитическое решение получено методами сопротивления материалов при модуле упругости $E = 3,2 \times 10^7$ кПа.

Погрешность определения перемещений при сетке узлов 4×4 составила 2,38% при сетке 4×12 - 0,79%. Максимальная погрешность определения напряжений при сетке узлов 4×4 равна 9,8% , при сетке 4×12 - 0,85%. Полученная погрешность вполне допустима для инженерных расчетов.

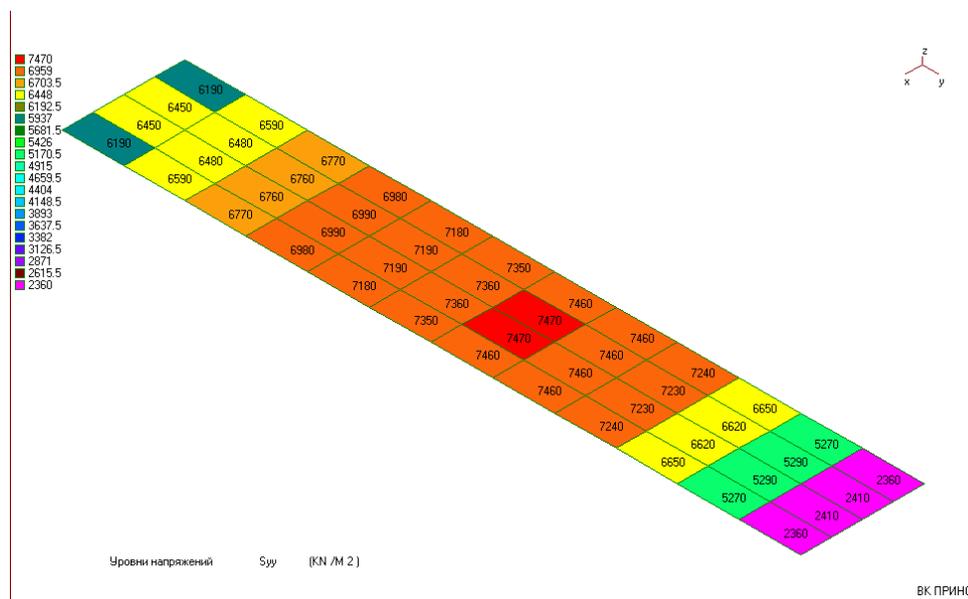


Рис. 6. Напряжения на верхней поверхности при сетке 4×12
 Fig. 6. Stresses on the upper surface of the grid

Таблица 1. Сопоставительный анализ результатов
 Table 1. Comparative analysis of results

Y (м)	Grid Сетка 4×4			Grid Сетка 4×12			Аналитическое решение Analytical solution		
	M_y (Нм)	σ_y (кПа)	w (см)	M_y (Нм)	σ_y (кПа)	w (см)	M_y (Нм)	σ_y (кПа)	w (см)
1,5	207	6460		210	6535		210	6556	
4,5	147,7	7090		148,8	7185		150	7200	
7,5	88,2	7325		89,8	7460		90	7479	
10,5	27,0	4800		29,8	5280		30	5325	
12,0			0,123			0,125	0		0,126

Задача 2. В качестве тестовой задачи рассчитана плита треугольной формы в плане, имеющая размеры и нагруженная, как показано на рис.7. В качестве материала использовался бетон со следующими характеристиками: $E = 3,2 \times 10^7$ кПа; $\nu = 0,2$. Плита защемлялась по левому краю. Расчетная схема плиты представлена на рис.8.

Напряжения выводились в центре тяжести каждого треугольного элемента и для верхней поверхности плиты показаны на рис.9.

Для оценки точности разработанного элемента был выполнен аналитический расчет по балочной теории. Плита рассматривалась как балка переменной жесткости. Прогобы определялись из дифференциального уравнения, которое составлялось в осях $x_1 y_1$ (см. рис.7).

$$EI(x_1)y_1'' = Px_1,$$

a)

Момент инерции сечения определялся по формуле

$$I(x_1)_1 = \frac{b(x_1)h^3(x_1)}{12}. \quad \text{б)}$$

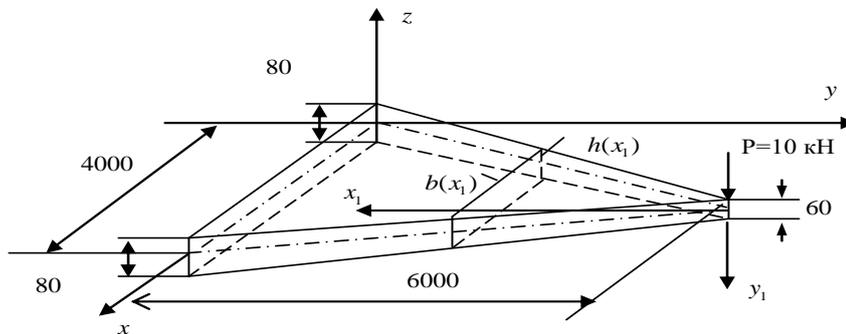


Рис. 7. Консольная плита
 Fig. 7. Cantilever plate

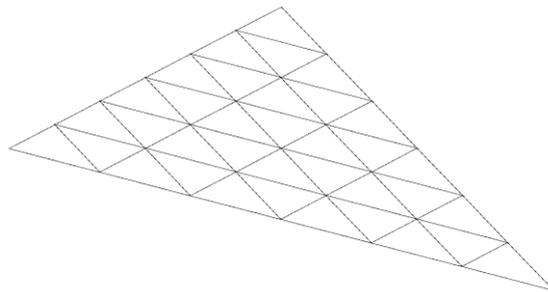


Рис. 8. Расчетная схема плиты
 Fig.8. Design scheme of the slab

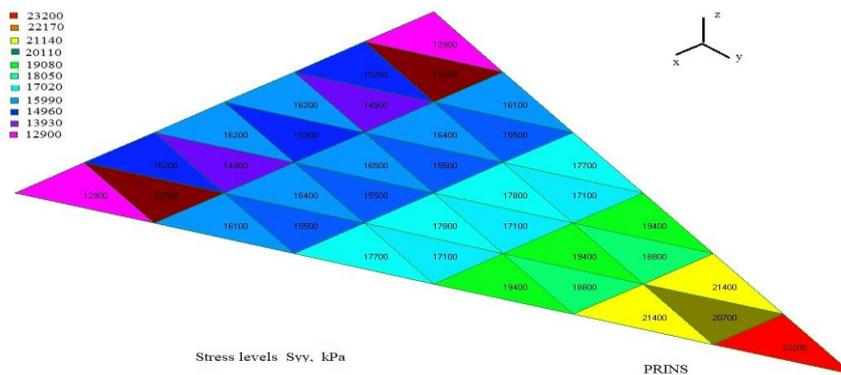


Рис. 9. Напряжения на верхней поверхности плиты, кПа
 Fig. 9. Stresses on the upper surface of the slab, kPa

При принятых размерах плиты максимальное значение прогиба, найденное из уравнения (а), составило 0,2637 м. Максимальное значение прогиба при расчете плиты методом конечных элементов равно 0,267 м. Расхождение по максимальному значению прогиба составило 1,25%.

Аналитические значения напряжений находились в предположении их равномерного распределения по ширине сечения по формуле

$$\sigma_{y,\max} = \frac{M(x_1)}{W(x_1)} = \frac{6M(x_1)}{b(x_1)h^2(x_1)} \quad \text{в)}$$

Среднее значение напряжений σ_y в центрах тяжести ряда элементов, прилегающего к заделке, полученное расчетом методом конечных элементов, составило 14766 КПа.

По формуле (6) найдено значение σ_y равное 14461 КПа. Расхождение составило 2.1%. Напряжение в центре тяжести элемента, прилегающего к вершине клина, из расчета МКЭ равно 23200 КПа.

По формуле (6) в этом сечении найдено $\sigma_{y,max} = 22987$ кПа. Расхождение напряжений в этом сечении равно 0,93%.

Вывод. Таким образом, разработанный элемент обеспечивает приемлемую точность результатов, как по перемещениям, так и по напряжениям.

Также представляет интерес задача расчета железобетонной консольной прямоугольной плиты с размерами 3x1 (в метрах) постоянного и переменного сечения по толщине на действие равномерно распределенной нагрузки и собственный вес, где получены результаты и дана их сравнительная оценка [11].

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что программный комплекс ПРИНС, на основе разработанного конечного элемента переменного сечения, может оказаться полезным при проектировании и расчете конструкций, содержащих плиты переменной толщины.

Библиографический список:

1. J.K.Lee, A.W.Leissa, A.J.Wang. J. of Engineering for Gas Turbines and Power, 106, Jan(1084).
2. V.P.Agapov. The analysis of the Turbo-Propeller Aviation Engines Blades by Finite Element Method. NWC 2013 (2013)
3. Конструкции железобетонные и бетонные градирен. Правила проектирования. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства, Свод правил (Москва, 2016).
4. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник / Ю. А. Дыховичный, Э.З. Жуковский, В. В. Ермолов и др.; Под ред. Ю. А. Дыховичного, Э.З. Жуковского.М.: Высш. shk., 1991.543 с.
5. SP 52-117-2008. Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Часть II. Методы расчета и конструирование (Москва. 2008).
6. К.А.Басов. ANSYS: Справочник пользователя (Москва: ДМК Пресс, 2005). 640с.
7. С. Городецкий, И.Д. Евзеров. Компьютерные модели конструкций (Киев: Факт, 2007).
8. Карпенко С.Н.. Модели деформирования бетона в приращениях и методы расчета конструкций (Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва, 2010).
9. H.G.Kwak, F.C.Filippou. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Under Monotonic Loads (Department of Civil Engineering University of California Berkeley, California, Report NO.UCB/SEMM-90/14, 2004).
10. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций (Изд-во АСВ, Москва, 2005).
11. Агапов В.П., Айдемиров К.Р. О расчете железобетонных плит переменной толщины в вычислительном комплексе "ПРИНС".

References:

1. J.K. Lee, A. W. Leissa, A. J. Wang. J. of Engineering for Gas Turbines and Power, 106, Jan (1084).
2. V.P. Agapov. The analysis of the Turbo-Propeller Aviation Engines Blades by Finite Element Method. NWC 2013. 2013.
3. Konstruktsii zhelezobetonnyye i betonnyye gradiren. Pravila proyektirovaniya. Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva, Svod pravil (Moskva, 2016). [Reinforced concrete and concrete cooling tower structures. Design rules. Ministry of Construction and Housing and Communal Services, Code of Rules (Moscow, 2016) (In Russ)]
4. Sovremennyye prostranstvennyye konstruktsii (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy): Spravochnik / YU. A. Dykhovichnyy, E.Z. Zhukovskiy, V. V. Yermolov i dr.; Pod red. YU. A. Dykhovichnogo, E.Z. Zhukovskogo.M.: Vyssh. shk., 1991.543 s. [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): Handbook / Yu. A. Dykhovichny, E.Z. Zhukovsky, V.V. Ermolov and others; Ed. A. Dykhovichny, E.Z. Zhukovsky), Moscow: Vyssh. shk., 1991.543 p. (In Russ)]

5. SP 52-117-2008. Zhelezobetonnyye prostranstvennyye konstruksii pokrytiy i perekrytiy. Chast' I. Metody rascheta i konstruirovaniye (Moskva. 2008). [SP 52-117-2008. Reinforced concrete spatial structures of roofs and floors. Part I. Calculation methods and design (Moscow. 2008). (In Russ)]
6. K.A.Basov ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya (Moskva: DMK Press, 2005 [K.A.Basov ANSYS: User's Guide (Moscow: DMK Press, 2005. 640p.). (In Russ)]
7. S. Gorodetskiy, I.D. Yevzerov. Komp'yuternyye modeli konstruksiy (Kiyev: Fakt, 2007). [S. Gorodetskiy, I.D. Yevzerov. Computer models of structures (Kiev: Fact, 2007). (In Russ)]
8. Karpenko S.N.. Modeli deformirovaniya betona v prirashcheniyakh i metody rascheta konstruksiy (Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk, Moskva, 2010). [Karpenko S.N. Models of concrete deformation in increments and methods of calculating structures (Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2010). (In Russ)]
9. H.G. Kwak, F.C. Filippou. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Under Monotonic Loads (Department of Civil Engineering University of California Berceley, California, Report NO.UCB / SEMM-90/14, 2004).
10. Agapov V.P. Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti konstruksiy (Izd-vo ASV, Moskva, 2005 [Agapov V.P. Finite Element Method in Statics, Dynamics and Stability of Structures (ASV Publishing House, Moscow, 2005). (In Russ)]
11. Agapov V.P., Aydemirov K.R. O raschete zhelezobetonnykh plit peremennoy tolshchiny v vychislitel'nom komplekse "PRINS". [Agapov V.P., Aydemirov K.R. On the calculation of reinforced concrete slabs of variable thickness in the "PRINS" computer complex. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Айдемиров Курбан Рабаданович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: kyrayd@mail.ru

Агапов Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и математики; e-mail: agapovpb@mail.ru

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; e-mail: smdstu@mail.ru

Information about the authors:

Kurban R. Aidemirov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Resistance of Materials, Theoretical and Structural Mechanics; e-mail: kyrayd@mail.ru

Vladimir P. Agapov, Dr. Sci., (Technical), Prof., Department of Applied Mechanics and Mathematics; e-mail: agapovpb@mail.ru

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; e-mail: smdstu@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.10.2019.

Принята в печать 21.11.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.10.2019.

Accepted for publication 21.11.2019.

Для цитирования: Т.Г. Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов, М.Н. Нажмудинова. Определение динамических свойств гусеничного движителя гидромелиоративных машин и способа шарнирной навески рабочего органа бестраншейного дреноукладчика. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4):122-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-122-131

For citation: T.G. Gasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Guseynov, M.N. Nazhmudinova. Determination of dynamic properties of the caterpillar drive of hydraulic reclamation machines and the method of articulated attachment of the working body of the trenchless pipelayer. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):122-131. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-122-131

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 626.862.7

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-122-131

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫХ МАШИН И СПОСОБА ШАРНИРНОЙ НАВЕСКИ РАБОЧЕГО ОРГАНА БЕСТРАНШЕЙНОГО ДРЕНОУКЛАДЧИКА

Т.Г.Гасанов, Э.З. Батманов, М.Р. Гусейнов, М.Н. Нажмудинова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является определение требований, предъявляемым к различным устройствам гидромелиоративных машин, получивших широкое распространение при строительстве каналов и дренажей, для поддержания заданного уклона, а также расчет исполнительного механизма, служащего для устранения колебательных перемещений рабочего органа относительно линии заданного уклона. **Метод.** Приведено математическое описание колебаний рабочего органа для гусеничных гидромелиоративных машин с навесными рабочими органами. **Результат.** В статье приведены результаты исследований по выявлению основных факторов, влияющих на колебания рабочего органа гусеничных мелиоративных машин. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что при переезде гусеничной машиной с жестким ходовым оборудованием единичных и многочисленных неровностей, перемещения режущей кромки жестко навешенного рабочего органа графически изображаются синусоидальными кривыми. Полученные зависимости дают возможность провести расчеты автоматической системы выдерживания заданного уклона, и установить область устойчивых режимов работы системы. Приведен геометрический способ оптимизации шарнирной навески рабочего органа бестраншейных дреноукладчиков. **Вывод.** Предложенные методы повышения эксплуатационных показателей гусеничных гидромелиоративных машин с навесными рабочими органами при движении по неровностям грунтовой поверхности могут быть применены при создании широкого класса навесных землеройных машин, как с пассивными, так и с активными рабочими органами

Ключевые слова: неровности, колебания, уравнения, гусеница, рабочий орган, навеска, скорость, шарнир, дреноукладчик, расчетная схема

DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE CATERPILLAR DRIVE OF HYDRAULIC RECLAMATION MACHINES AND THE METHOD OF ARTICULATED ATTACHMENT OF THE WORKING BODY OF THE TRENCHLESS PIPELAYER

T.G. Gasanov, E.Z. Batmanov, M.R. Guseynov, M.N. Nazhmudinova

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

Abstract. Objective. The objective of the study is to determine the requirements for various devices of hydraulic reclamation machines, which are widely used in the construction of canals and drains, to maintain a given slope, as well as the calculation of the executive mechanism that serves to

*eliminate the oscillating movement of the working body relative to the line of the specified slope. **Methods.** A mathematical description of the vibrations of the working body for caterpillar hydraulic reclamation machines with mounted working bodies is given. **Results.** The article presents the results of research to identify the main factors affecting the oscillations of the working body of caterpillar reclamation machines. As a result of theoretical and experimental studies, it was found that when a caterpillar machine with a rigid undercarriage crosses single and multiple irregularities, the movement of the cutting edge of the rigidly mounted working body is graphically depicted by sinusoidal curves. The obtained dependencies allow conducting calculations of the automatic system of maintaining the specified slope and establish the area of stable modes of system operation. A geometric method for optimizing the hinge linkage of the working body of trenchless pipelayer is presented. **Conclusion.** The proposed methods of improving the performance of caterpillar hydraulic reclamation machines with mounted working bodies when moving on uneven ground surfaces can be used to create a wide class of mounted earthmoving machines, both with passive and active working bodies*

Keywords: *unevenness, vibrations, equations, caterpillar, working body, sample, speed, hinge, pipelayer, design scheme*

Введение. Одной из основных задач механизированного строительства каналов и дренажей является выполнение продольного заданного уклона. Неровности грунта, по которым передвигается мелиоративная машина в процессе работы, - причина значительных колебаний всей машины и ее рабочего органа, в частности. Размер и характер этих колебаний определяются многими факторами, среди которых существенное значение имеют конструкция и основные параметры гусеничного движителя. При этом гусеничный движитель следует рассматривать как динамическое звено, преобразующее неровности грунта в колебания машин. Для машин, от которых требуется точное поддержание заданных координат рабочего органа, динамические свойства гусеничного движителя приобретают большое практическое значение. К числу таких машин относятся, в частности, дреноукладчики, экскаваторы-каналокапатели, траншейные экскаваторы и др. [1-10].

В процессе перемещения гусеничный движитель деформируется сам, деформирует неровности грунта и преобразует возмущения от деформированных неровностей грунта в линейные и угловые перемещения рамы машины.

Постановка задачи. Известно, что при движении гидромелиоративной машины по неровностям трассы прокладываемого канала или дренажа она испытывает продольные угловые колебания, приводящие к отклонениям рабочего органа от линии заданного уклона, вследствие чего дно канала или дренажа получается неровными.

Выявление и изучение основных факторов, влияющих на колебания рабочего органа, и математическое описание этих колебаний является важной задачей, решение которой позволяет определить степень влияния основных факторов на колебания рабочего органа, и наметить различные способы для устранения или снижения возникающих отклонений рабочего органа от линии заданного уклона. Вычисление колебаний гидромелиоративных машин даст возможность, кроме того, устанавливать требования, предъявляемые к различным устройствам для поддержания заданного уклона, и производить расчет исполнительного механизма, служащего для устранения колебательных перемещений рабочего органа относительно линии заданного уклона [1, 11, 13].

Методы исследования. Определение колебаний производилось для гусеничных мелиоративных машин с навесными рабочими органами, получившими широкое распространение при строительстве каналов и дренажей. Оценка колебаний производилась по следующим основным показателям: угловым перемещениям, скоростям и ускорениям системы гусеничная машина – рабочий орган и линейным вертикальным перемещениям, скоростям и ускорениям в зоне расположения режущей кромки навесного рабочего органа.

Для определения перечисленных оценочных показателей колебаний рассмотрим движение гусеничной машины с жестким ходовым оборудованием и с жестко навешенным рабочим

органом. На рис. 1 представлена схема сил, действующих на гусеничную машину с общим рабочим органом весом P . На опорную поверхность гусеничного движителя действуют нормальные $q(x^1)$ и касательные τ_i реакции грунта, на передний каток – лобовое сопротивление W . Реакцию грунта, на какой – либо жестко навешенный рабочий орган можно выразить через одну равнодействующую силу R или через две ее составляющие Rx^1 и Ry^1 в точке приложения D .

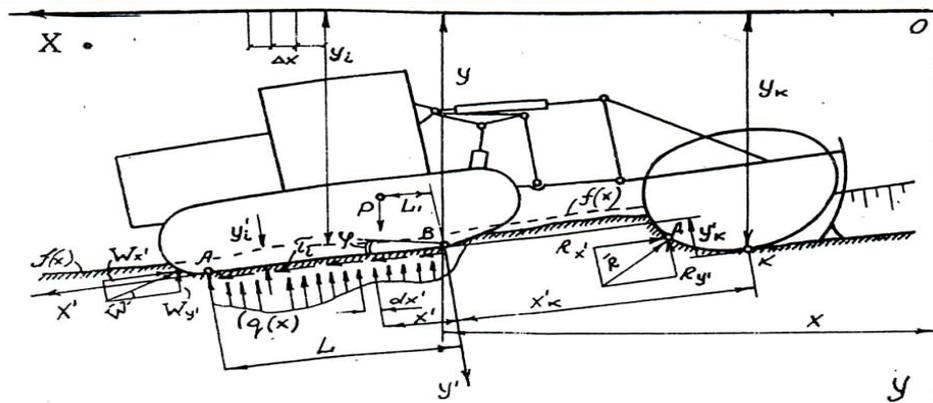


Рис. 1. Схема действия сил на гусеничную машину
 Fig.1. Scheme of the action of forces on a tracked vehicle

Главной отличительной особенностью движения гусеничной машины на грунтах со слабой несущей способностью является проседание гусеничного движителя на некоторую глубину от поверхности земли. Просадку опорной базы гусеничной машины принято выражать по формулам, аналогичным зависимостям погружения плоских штампов в грунт [14-17]. Для расчета была принята показательная зависимость

$$q = c \cdot h^\mu \quad (1)$$

где q – удельное давление; h – осадка; c, μ – коэффициенты деформируемости грунта.

Пользуясь этой зависимостью и выражая величину деформации грунта через разность отметок поверхности земли и опорной базы, составим два уравнения движения. Допуская, что действием сил инерции можно пренебречь, т.к. изменения углов наклона гусеничной машины находится в пределах $\pm 6^\circ$ ($\cos \varphi \approx 1$), а величины ускорений центра масс системы достаточно малы, получим:

$$2\epsilon c \int_0^L [f(x_1 x') - y - x' \cdot \operatorname{tg} \varphi]^\mu dx' - P + 2\epsilon c \left(1 - \frac{\mu}{3}\right) \cdot D^{\frac{1}{2}} [f(x_A) - y - L \cdot \operatorname{tg} \varphi]^{\mu+0.5} + R_y^1(x_1 y_1 \varphi) = 0 \quad (2)$$

$$2\epsilon c \int_0^L x' [f(x_1 x') - y - x' \cdot \operatorname{tg} \varphi]^\mu dx' - PL_1 + \frac{\epsilon c}{\mu + 1} [f(x_A) - y - L \cdot \operatorname{tg} \varphi]^{\mu+2} + 2\epsilon c \cdot L \left(1 - \frac{\mu}{3}\right) \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot [f(x_A) - y - L \cdot \operatorname{tg} \varphi]^{\mu+0.5} - M_R(x_1 y_1 \varphi) = 0 \quad (3)$$

где x, y – координаты точки В; φ – угловые перемещения системы; ϵ – ширина гусениц; x^1 – координата элементарного участка dx^1 ; $f(x_1 x^1)$ – уравнение поверхности земли относительно координат ХОУ на длине контакта с гусеничным движителем; D – диаметр переднего катка трактора; L_1 – координата центра тяжести; $f(x_A)$ – ордината рельефа в месте прохождения точки А гусеничного движителя; L – длина активно-опорного участка гусеничного движителя; $M_R(x_1 y_1 \varphi)$ – момент равнодействующей R относительно точки опорной поверхности над задним катком В.

Третий член уравнения (2), а также третий и четвертый члены уравнения (3) определялись по известным выражениям лобового сопротивления катящегося по деформируемому грунту колеса.

Ординату точки К режущей кромки рабочего органа выразим формулой

$$y_k = y - x_k^1 \cdot \sin \varphi + y_k^1 \quad (4)$$

где: x_k^1 , y_k^1 - координаты точки К режущей кромки рабочего органа.

Для решения системы интегральных уравнений и определения неизвестных y , y_k и φ был использован метод последовательных приближений Ньютона. Вычислить значение y и φ можно по составленному алгоритму с использованием ЭВМ.

Движение машины можно моделировать смещением опорной базы через равные интервалы и для дискретных значений x_i , вычислить y_i и φ_i . Неровности поверхности земли задаются таблично через средние значения ординат под левой и правой гусеницами. Значения угловых и линейных скоростей и ускорений устанавливаются по формулам численного дифференцирования в зависимости от полученных величин φ_i и y_{ki} и поступательной скорости движения машины [14,16].

Обсуждение результатов. Составленный алгоритм решения позволяет исследовать и определять перемещения, скорости и ускорения любой точки жесткой системы гусеничной машины и ее рабочего органа в зависимости от параметров, входящих в уравнение (2) и (3). При этом вычисление колебаний можно производить, как на единичных или многочисленных неровностях, так и на неровностях случайного характера, задаваемых таблично.

Экспериментальные исследования проводились на специальной гусеничной установке и на фрезерном каналокопателе КФН-1000. На испытательном полигоне неровности создавались искусственно (бульдозером с последующей ручной доделкой до заданного профиля). Продольные колебания экспериментальных машин при переезде неровностей фиксировались измерительным устройством, поперечные колебания остова замерялись маятниковым угломером.

Для записи перемещений ползунков реостатов измерительного устройства, регистрации углов поворота маятникового датчика и фиксирования снимаемых характеристик была использована тензометрическая лаборатория на базе автомобиля ГАЗ-63. Для изучения влияния типов ходового оборудования экспериментальные гусеничные машины оборудовались жесткой ходовой подвеской в виде тележек на семи опорных катках и обычной балансирной подвеской трактора Д-54. Исследования проводились как с жесткой навеской рабочего органа, так и с плавающей, где рабочий орган опирался на лыжу, соединенную с отвальным корпусом при помощи дополнительного цилиндра; основные гидроцилиндры переводились в плавающее положение.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что при переезде гусеничной машиной с жестким ходовым оборудованием единичных и многочисленных неровностей, перемещения режущей кромки жестко навешенного рабочего органа графически изображаются синусоидальными кривыми.

Зависимости перемещений скоростей и ускорений являются исходными данными для обоснования выбора параметров исполнительного механизма. Так при выборе длины штока исполнительного гидроцилиндра и его расположения на машине необходимо учитывать максимально возможные перемещения рабочего органа (А), которые необходимо компенсировать ходом штока исполнительного гидроцилиндра. Скорость движения штока и соответственно расход масла в гидросистеме должны выбираться, исходя из максимально возникающих скоростей подъема рабочего органа (V).

При расчете возникающих усилий в исполнительном цилиндре, рабочем органе и т.д. необходимо учитывать дополнительные усилия, обусловленные инерцией рабочего органа в зависимости от значений возникающих ускорений (W). Указанные зависимости могут быть использованы и для выбора необходимого быстродействия, чувствительности датчика и т.д.

Полученные результаты дают возможность также провести расчеты автоматической системы выдерживания заданного уклона и установить ориентировочно динамические характеристики, области устойчивых режимов работы системы и области автоколебаний, время срабатывания исполнительного звена, величины динамической ошибки слежения и др.

Исследования по выявлению влияния параметров неровностей показали, что с увеличением высоты неровностей h (при сохранении постоянной длины l) пропорционально возрастают экстремальные значения перемещений, скоростей и ускорений гусеничной машины. Их наибольшие значения соответствуют максимальным выбранным значениям высот неровностей ($l=8\text{ м}$ и $h=8\text{ см}$).

С увеличением длины единичных неровностей l (при постоянной их высоте h) наблюдается сначала резкое увеличение экспериментальных значений перемещений, скоростей и ускорений жесткой системы гусеничной машины, а затем плавное их уменьшение. Наибольшие перемещения, скорости и ускорения возникают при переезде неровностей, длина которых находится в пределах $l=1,0-2,0\text{ м}$.

Полученные величины длин неровностей характеризуют наиболее неблагоприятные условия работы гусеничных машин с опорной базой равной 2,0. При изменении длины базы характер зависимостей остается прежним, и максимальные значения амплитуд соответствуют отношению длины опорной базы длине неровностей равному 1:2.

Оценочные параметры в значительной степени зависят от физико-механических свойств грунта, характеризующихся коэффициентами деформируемости.

Экспериментальные исследования показали, что перемещения, скорости и ускорения жесткой системы гусеничной машины на суглинистых грунтах в 1,5–2 раза больше, чем на торфяных грунтах со слабой несущей способностью при эквивалентных значениях параметров неровностей.

Как было установлено, отклонения жестко навешенного рабочего органа от средней линии уклона могут меняться в широких пределах (6–40 см) при скоростях и ускорениях в диапазонах 0,4–1,3 см/с и 0,03–0,09 см/с² (первые пределы соответствуют характерным, а вторые – наиболее неблагоприятным условиям работы машины). Указанные величины были определены при скорости движения каналокопателя равной 1 см/с. При увеличении скорости движения пропорционально растут значения скоростей и ускорений режущей кромки жестко навешенного рабочего органа.

Большое разнообразие встречаемых неровностей поверхности земли в значительной степени осложняют задачу автоматизации строительства каналов и дрен по заданному уклону. Автоматическое регулирование в различных условиях работы приводит или к невыполнению требуемой точности выдерживания заданного уклона при настройке на какую-либо определенную скорость движения исполнительного механизма, или к тому, что выполнение требуемой точности регулирования может быть достигнуто за счет значительного усложнения автоматической системы, чувствительной к различным скоростям перемещений рабочего органа. Для обеспечения выполнения заданного уклона с помощью простых автоматических устройств необходимо снижать возникающие максимальные перемещения, скорости, ускорения рабочего органа.

Эффективное снижение значений показателей колебаний рабочего органа может быть достигнуто с помощью плавающей навески. При переезде каналокопателя с плавающей навеской через единичные неровности амплитуда колебаний рабочего органа по сравнению с жесткой навеской уменьшается в 3–4 раза.

Степень сглаживания неровности зависит от конструктивного исполнения навески, типа рабочего органа и режимов его работы. Наименьшие отклонения рабочего органа наблюдаются при устойчивой его работе, когда обеспечивается равновесие действия сил противления движению и общего веса рабочего органа с находящимся на нем грунтом. Нарушение равнодействия приложенных сил приводит к самозаглублению или самовыглублению рабочего органа.

Как показали исследования, по сравнению с жестким ходовым оборудованием балансирная подвеска позволяет в 1,1 – 1,3 раза уменьшить колебания рабочего органа, жестко навешиваемого на базовую машину, за счет сжатия и растяжения пружин подвески эффективность уменьшения колебаний определяется жесткостью пружин, их запасом хода, конструк-

тивным выполнением и величиной возникающих реактивных сил сопротивления движению рабочего органа.

При реальных условиях работы на различных объектах требуемая точность выполнения заданного уклона не всегда может быть достигнута. Поэтому испытания этих устройств и механизмов уклона целесообразнее проводить на искусственных неровностях, охватывающих как характерные, так и наиболее неблагоприятные условия работ. Это будет гарантировать устойчивое выполнение требуемой точности при работе на различных объектах.

Одним из важнейших этапов проектирования бестраншейных дреноукладчиков – выбор типа и определение размеров элементов навески рабочего оборудования на тягач. При решении этой задачи для машин, имеющих навеску «Мелиомат», снабженных системами автоматической стабилизации пространственного положения рабочего оборудования, приходится сталкиваться с необходимостью одновременного удовлетворения двух условий: с целью компенсации кинематических возмущений, поступающих на рабочее оборудование от тягача при его движении по неровностям трассы, шарнир крепления рабочего оборудования должен перемещаться по вертикали относительно тягача; эпюра давлений под опорной поверхностью тягача должна изменяться наименьшим образом при работе машин в различных условиях.

Для того чтобы одновременно выполнить эти требования, приходится анализировать большое число вариантов. Известные аналитические способы в этом случае трудоемки и лишены наглядности, что затрудняет поиск оптимального решения.

Можно предложить геометрический способ оптимизации шарнирной навески, который отличается большой наглядностью и меньшей трудоемкостью. Погрешность расчета таким способом вполне приемлема, так как исходные данные, особенно по внешним нагрузкам, нельзя определить достаточно точно.

Рассмотрим порядок расчета на примере анализа шарнирной навески рабочего оборудования бестраншейного дреноукладчика. Упрощенная расчетная схема показана на рис.2. Рабочий орган А с леежкой В крепится в шарнире 1 к тягачу С, имеющему жесткий гусеничный ход [12-14].

Совокупность сил, действующих на тягач, сводится к одной равнодействующей S, вертикальная составляющая V которой, определяет среднее значение давлений, а момент M относительно центра опорной поверхности гусеницы D определяет разность между максимальным и минимальными значениями давлений.

Любое изменение условий работы рабочего органа отражается на значении давлений, эпюра которых может меняться от треугольной формы на части опорной поверхности до прямоугольной на всей поверхности. Последнюю форму эпюры нельзя сохранить при всех условиях работы. Поэтому оптимальным представляется такой вариант навески рабочего органа, при котором в наиболее вероятной области изменения рабочих условий соблюдается равенство

$$|M_{\min}| = M_{\max}$$

где M_{\min} и M_{\max} – минимальный и максимальный момент равнодействующей S относительно опорной поверхности.

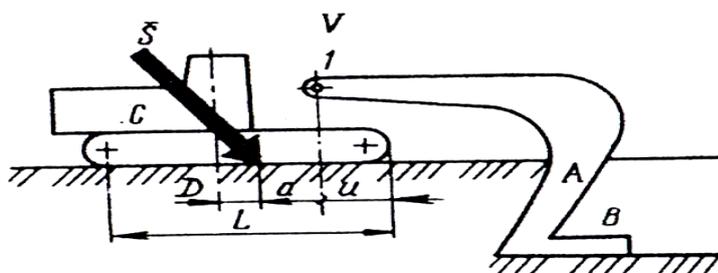


Рис.2. Расчетная схема дреноукладчика
Fig.2. Design scheme of the drainage machine

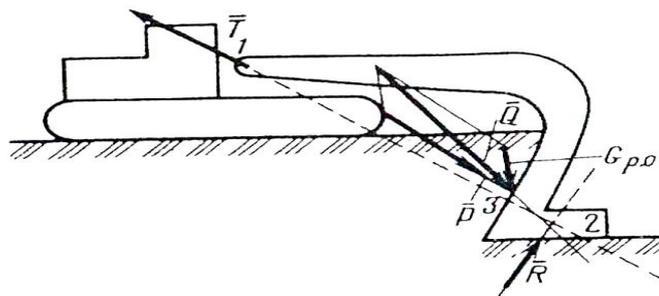


Рис.3. Геометрический способ определения положения шарнирного крепления рабочего органа на тягаче

Fig.3. Geometric method for determining the position of the pivot attachment of the working body on the tractor

При этом желательно выполнять условие (рис.2)

$$a < L/6$$

Задача выбора наилучшей навески сводится к определению благоприятной области расположения шарнира 1 по высоте на вертикали U-V. При выполнении расчета положение вертикали U-V выбирается по конструктивным соображениям.

Для построения геометрического метода поиска оптимального варианта навески рассмотрим силовое воздействие между рабочим органом, тягачом и грунтовым массивом в предположении постоянства значений массы и резания грунта [18- 20].

На рабочий орган (рис.3) в общем случае действует его масса \bar{G}_{po} и равнодействующая рабочих сил резания грунта, трения его о бункер и т.д. Опорами рабочего органа служит шарнир на тягаче и лыжа. Соответственно на них возникают опорные реакции – на шарнире \bar{T} и \bar{R} и на шарнире R. Для определения реакций \bar{T} и \bar{R} найдем сумму $\bar{Q} = \bar{G}_{po} + \bar{P}$. При известном коэффициенте трения f лыжи по грунту линия действия реакции \bar{R} наклонена к вертикали под углом $\mu = \arctg f$ и проходит ориентировочно через центр опорной поверхности лыжи. Продолжим линии действия сил \bar{Q} и \bar{R} до пересечения в точке 2 и соединим ее с предполагаемым шарниром 1.

Разложим силу Q по направлениям реакции \bar{R} и прямой 1...2, в результате чего получим значение реакции грунта на лыжу \bar{R} и тяги в шарнире \bar{T} . При изменении положения шарнира 1 по высоте соответственно получаются различные значения опорных реакций \bar{R} и \bar{T} . Дреноукладчик находится в равновесии под действием сил $G = \bar{G}_m + \bar{G}_{po}, \bar{P}, \bar{R}$ и реакции $\bar{S} = -\bar{S}^1$ опорной поверхности гусеницы так, что $\bar{G} + \bar{P} + \bar{R} + \bar{S}^1 = 0$ откуда $\bar{S} = \bar{G} + \bar{P} + \bar{R}$. Следовательно, линия действия силы \bar{S} при любом положении шарнира 1 по высоте проходит через точку 3 пересечения равнодействующей постоянных в данном случае сил \bar{G} и \bar{P} и известной по направлению реакции \bar{R} .

Из рассмотренного равновесия тягача следует: $\bar{S} = \bar{G}_T - \bar{T}$, что при известном положении шарнира 1 позволяет определить как значение \bar{S} , так и точку 3. Изложенное позволяет дать простой способ определения положения шарнира 1 по высоте, соответствующего заданному положению центра давления гусеницы и известным рабочим нагрузкам. Он сводится к следующей последовательности операций.

Задаемся произвольным положением шарнира 1 по высоте. Находим сумму $\bar{Q} = \bar{G}_{po} + \bar{P}$ и раскладываем на направления 1...2 и реакции \bar{R} , находя таким образом значе-

ния \bar{T} и \bar{R} . Определяем сумму $\bar{S} = \bar{G}_T - \bar{T}$ и продолжаем линию действия суммарного вектора \bar{S} до пересечения с линией действия реакции \bar{R} в точке 3.

Из найденной точки 3 через заданный центр давления 4 проводим прямую до пересечения с линией действия массы \bar{G}_T в точке 5. Последнюю соединяем прямой с точкой 2. На ее пересечении с вертикалью U-V находится искомое положение шарнира 1.

Задаваясь набором положений центра давления и проделав описанные достаточно простые геометрические построения, можно получить соответствующий набор положения шарнира по высоте, а также соответствующие значения равнодействующих $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_n$. Выполнение этих построений для предельных рабочих условий позволяет так выбрать положение шарнира 1 по высоте, что условие оптимальности $|M_{\min}| = M_{\max}$ оказывается выполненным.

Вывод. Изложенный метод расчета применяется без изменения и при анализе эпюры давлений под тягачом в случае перемещающегося по высоте в процессе работы шарнира 1. Для этого достаточно рассмотреть два случая, соответствующих максимальной и минимальной глубине копания рабочего органа.

Метод без изменений может быть применен при создании широкого класса навесных землеройных машин, как с пассивными, так и с активными рабочими органами.

Библиографический список:

1. Батманов Э.З., Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р. Моделирование процесса резания минеральных грунтов пассивным рабочим органом дренажера при строительстве закрытого дренажа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):165-174. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-165-174.
2. Маслов Б.С. Пути совершенствования осушительных систем. Труды ВНИИГиМ им.А.Н. Костякова. Том.52, Москва, 1972. С.5-21.
3. Томин Е.Д. Механизация строительства закрытого дренажа. Москва, Издательство «Колос», «Хлопководство», 1978. С.36-40.
4. Гасанов Т.Г. Устройство термического кротового дренажа. Москва, Издательство «Колос», «Хлопководство», 1978. С.40-41.
5. Гасанов Т.Г. Прокладка кротового дренажа с термически закрепленными стенками. Москва, Издательство «Колос», «Мех. и электр.соц. сельс. хозяйства», 1978. С.24-26.
6. Гасанов Т.Г. и др. Авторское свидетельство №630338 на изобретение «Кротователь». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 07.07.1978 года.
7. Бейлин Д.Х. Механизация дренажных работ. Перспективы механизации строительства дренажа. Москва, Издательство «Колос», 1975, 256 с.
8. Томин Е.Д., Казаков В.С. Опыт строительства, эксплуатации и ремонта закрытого дренажа на осушаемых землях. Москва, Издательство «Колос», 1970, 114 с.
9. Томин Е.Д., Маммаев З.М., Гумбург Г.В. Опыт строительства закрытого дренажа на осушаемых и орошаемых землях. М., Издательство «Машиностроение», «Строительные и дорожные машины», 1975. С.22-24.
10. Tomin E.D, Mammaev Z.M, Gumburg G.V «Onexperience in construction of mole drainage systems in areas to be dewatered and irrigated» М., Publishing house "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. pp.22-24.
11. Гасанов Т.Г., Магомедов Г.М. К вопросу борьбы с пучинообразованием на автомобильных дорогах. Махачкала: ДГИНХ, 2013. 154 с.
12. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопrotивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М. Издательство АСВ, 1995. 568 с.
13. Васильев Б.А., Гантман В.Б., Комисаров В.В. и др. Под редакцией Н.Н. Мера «Мелиоративные машины». М., Колос, 1980.
14. Варданян Г.С. Прикладная механика: применение методов теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики деформируемого твердого тела, Учебное пособие, - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. 174 с.
15. Клименко Н.И. Решение задач о напряженном состоянии вращающихся неоднородных в окружном направлении анизотропных полых цилиндров. Прикл. мех., Киев, 1999, 35, №12, с. 56-62.
16. Гиалаев Г.В. Тракторы и автомобили с основами технической механики: учебное пособие. МГУЛ, 2002. 347 с.
17. Рябенков Н.Г. О выполнении условий свободной границы торца связующего в теории слоистых конструкций//Матер. 4-го Междунар. Симпозиума, Дин.и техно. Проблемы механики констр. и сплошн. сред. Ярополец, 16-18 февр., 1998, М., 1998, с. 21-22.
18. Фриштер Л.Ю., Савостьянов В.Н. О представлении кусочно-однородной задачи теории упругости в виде суммы однородных задач, Вопросы математики, механики сплошных сред и применения математических методов в строительстве, Сб. научн. тр. МГСУ, Москва, 1999, с. 169-178.
19. Хесин Г.Л., Варданян Г.С., Мовила Н.И. Моделирование напряженного состояния конструкций из разномодульных материалов на вязкоупругих моделях, Тр. ин-та, МИСИ, 1975, Вып. 125-126, с. 81-89.
20. Шкелев Л.Т., Одинец Е.А. Приближенный метод решения пространственной задачи теории упругости, Киевск. нац. Ун-т стр-ва и архит., Киев, 1999, 8с., Деп. в ГНТБ Украины 26.07.99, №212-Ук. 99.

21. Andersen Thomas. Control system automatic. 1962, №4.
22. Ashida Fumihito, Tauchert Theodore. Control of a distribution of transient thermoelastic displacement in a composite circular disk, R. ISTAM, 2000, 20th, Intern. cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug. 2 Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, c. 166.
23. Bossavit A. On the computation of strains and stresses in symmetrical articulated structures, Exploit. Symmetry Appl. and Numer. Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, c. 111-123.
24. Jain Rajeev, Ramachandra K., Simha K.R.Y. Rotating anisotropic disc of uniform strength, Int. J. Mech., Sci., 1999, 41, №6, c. 639-648.

References:

1. Batmanov E.Z., Gasanov T.G., Guseynov M.R. Modelirovaniye protsessa rezaniya mineral'nykh gruntov passivnym rabochim organom drenoukladchika pri stroitel'stve zakrytogo drenazha. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018;45 (3):165-174. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-165-174. [Batmanov E.Z., Hasanov T.G., Guseynov M.R. Modeling the process of cutting mineral soils by the passive working body of the drainage machine during the construction of a closed drainage. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2018; 45 (3): 165-174. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2018-45-3-165-174. (In Russ)]
2. Maslov B.S. Puti sovershenstvovaniya osushitel'nykh sistem. Trudy VNIIGiM im.A.N. Kostyakova. Tom.52, Moskva, 1972. S.5-21. [Maslov B.S. Ways to improve drainage systems. Proceedings of VNIIGiM named after A.N. Kostyakov. Vol. 52, Moscow, 1972. p pp. 5-21. (In Russ)]
3. Tomin Ye.D. Mekhanizatsiya stroitel'stva zakrytogo drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Khlopkovodstvo», 1978. S.36-40. [Tomin E. D. Mechanization of closed drainage construction. Moscow, Publishing House "Kolos", "Khlopkovodstvo", 1978. pp.36-40. (In Russ)]
4. Gasanov T.G. Ustroystvo termicheskogo krotovogo drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Khlopkovodstvo», 1978. S.40-41. [Gasanov T.G. Thermal mole drainage device. Moscow, Publishing House "Kolos", "Cotton-growing", 1978. pp.40-41. (In Russ)]
5. Gasanov T.G. Prokladka krotovogo drenazha s termicheski zakreplennymi stenkami. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Mekh. i elektr.sots. sel's. khozyaystva», 1978. S.24-26. [Gasanov T.G. Laying of a mole drain with thermally fixed walls. Moscow, Kolos Publishing House, Fur. and electrical social. sels. economy ", 1978. pp.24-26. (In Russ)]
6. Gasanov T.G. i dr. Avtorskoye svidetel'stvo №630338 na izobreteniy «Krotovatel'». Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy SSSR 07.07.1978 goda. [Gasanov T.G. and others. Inventor's certificate No. 630338 for the invention "Molecater". Registered in the State Register of Inventions of the USSR on 07.07.1978. (In Russ)]
7. Beylin D.Kh. Mekhanizatsiya drenaznykh robot. Perspektivy mekhanizatsii stroitel'stva drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», 1975, 256 s [Beilin D.Kh. Drainage mechanization. Prospects for mechanization of drainage construction. Moscow, Kolos Publishing House, 1975, 256 p. (In Russ)]
8. Tomin Ye.D., Kazakov V.S. Opyt stroitel'stva, ekspluatatsii i remonta zakrytogo drenazha na osushayemykh zemlyakh. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», 1970, 114 s. [Tomin E.D., Kazakov V.S. Experience in the construction, operation and repair of closed drainage systems on drained lands. Moscow, Kolos Publishing House, 1970, 114 p. (In Russ)]
9. Tomin E.D., Mammaev ZM, Gumburg GV "Onepperience in construction of mole drainage systems in areas to be dewatered and irrigated" M., Publishing house "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. pp.22- 24.[Tomin E.D., Mammaev Z.M., Gumburg G.V. Experience in the construction of a closed drainage system on drained and irrigated lands. M., Publishing house "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. P.22-24.
10. Tomin Ye.D., Mammayev Z.M., Gumburg G.V. Opyt stroitel'stva zakrytogo drenazha na osushchayemykh i oroshayemykh zemlyakh. M., Izdatel'stvo «Mashinostroyeniye», «Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny», 1975. S.22-24.
11. Gasanov T.G., Magomedov G.M. K voprosu bor'by s puchinoobrazovaniyem na avtomobil'nykh dorogakh. Makhachkala: DGINKH, 2013. 154 s. [Gasanov T.G., Magomedov G.M. On the issue of combating heaving on highways. Makhachkala: DGINKH, 2013. 154 p. (In Russ)]
12. Vardanyan G.S., Andreyev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Soprotivleniye materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti. M. Izdatel'stvo ASV, 1995. 568 s. [Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Resistance of materials with the fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. M. Publishing house ASV, 1995568 p. (In Russ)]
13. Vasil'yev B.A., Gantman V.B., Komisarov V.V. i dr. Pod redaktsiyey N.N. Mera «Meliorativnyye mashiny». M., Kolos, 1980. [Vasiliev B.A., Gantman V.B., Komisarov V.V. and others. Edited by N.N. Measure "Reclamation machines". M., Kolos, 1980. (In Russ)]
14. Vardanyan G.S. Prikladnaya mekhanika: primeneniye metodov teorii podobiya i analiza razmernostey k modelirovaniyu zadach mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela, Uchebnoye posobiye, - M.: NITS INFRA-M, 2016. 174 s. [Vardanyan G.S. Applied mechanics: application of methods of the theory of similarity and analysis of dimensions to modeling problems of mechanics of a deformable rigid body, Textbook, M.: NITs INFRA-M, 2016. 174 p. (In Russ)]
15. Klimenko N.I. Solving problems on the stress state of anisotropic hollow cylinders rotating inhomogeneous in the circumferential direction. App. fur., Kiev, 1999, 35, No. 12, p. 56-62.
16. Gilayev G.V. Traktory i avtomobili s osnovami tekhnicheskoy mekhaniki: uchebnoye posobiye. MGUL, 2002. 347 s. 17. [Gilayev G.V. Tractors and cars with the basics of technical mechanics: a tutorial. MGUL, 2002. 347 p. (In Russ)]
17. Ryabekov N.G. O vypolnenii usloviy svobodnoy granitsy tortsa svyazuyushchego v teorii sloistykh konstruksii//Mater. 4-go Mezhdunar. Simpoziuma, Din.i tekhn. Problemy mekhaniki konstruk. i sploshnykh sred. Yaropolets, 16-18 fevr., 1998, M., 1998, s. 21-22. [Ryabekov N.G. On the fulfillment of the conditions for the free boundary of the end face of the binder in the theory of layered structures. 4th Int. Symposium, Din. And Techno. Structural mechanics problems. and continuous media. Yaropolets, 16-18 Feb., 1998, M., 1998, p. 21-22 (In Russ)]
18. Frishter L.YU., Savost'yanov V.N. O predstavlenii kusochno-odnorodnoy zadachi teorii uprugosti v vide summy odnorodnykh zadach, Voprosy matematiki, mekhaniki sploshnykh sred i primeneniya matematicheskikh metodov v stroitel'stve, Sb. nauchn. tr. MGSU, Moskva, 1999, s. 169-178. [Frishter L.Yu., Savostyanov V.N. On the representation of a piecewise-homogeneous

- problem of elasticity theory in the form of a sum of homogeneous problems, Problems of mathematics, mechanics of continuous media and the use of mathematical methods in construction, Collection of articles. scientific. tr. MGSU, Moscow, 1999, p. 169-178. (In Russ)]
19. Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. Modelirovaniye napryazhennogo sostoyaniya konstruksiy iz raznomodul'nykh materialov na vyzkouprugikh modelyakh, Tr. in-ta, MISI, 1975, Vop. 125-126, s. 81-89. [Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. Modeling the Stress State of Structures Made of Multimodal Materials on Viscoelastic Models, Tr. Institute, MISS, 1975, Issue. 125-126, pp. 81-89. (In Russ)]
 20. Shkelev L.T., Odinets E.A. An approximate method for solving a spatial problem of the theory of elasticity, Kievsk. nat. University of Building and Architect., Kiev, 1999, 8p., Dep. in the State Scientific and Technical Library of Ukraine on July 26, 1999, No. 212-UK. 99.
 21. Andersen Thomas. Control system automatic. 1962, No. 4.
 22. Ashida Fumihito, Tauchert Theodore. Control of a distribution of transient thermoelastical displacement in a composite circular disk, R.ISTAM, 2000, 20th, Intern. cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug. 2 Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, p.166.
 23. Bossavit A. On the computation of strains and stresses in symmetrical articulated structures, Exploit. Symmetry Appl. and Numer. Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, pp. 111-123.
 24. Jain Rajeev, Ramachandra K., Simha K.R.Y. Rotating anisotropic disc of uniform strength, Int. J. Mech. Sci. 1999, 41, No. 6, pp. 639-648.

Сведения об авторах.

Гасанов Тельман Гамзатович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и безопасности движения, e-mail: batmanov1978@mail.ru

Батманов Эдвард Загидинович, кандидат технических наук, декан транспортного факультета, e-mail: batmanov1978@mail.ru

Гусейнов Марат Рамизович, старший преподаватель кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, e-mail: Maratdgtu@mail.ru

Нажмудинова Мадина Нуричалавовна, аспирант, кафедра организации и безопасности движения, e-mail: madina.sss@mail.ru

Information about authors.

Telman G. Gasanov, Cand. Sci. (Technical), Assoc.Prof., Department of Organization and Traffic Safety, e-mail: batmanov1978@mail.ru

Edward Z. Batmanov, Cand. Sci. (Technical) Sciences, Dean of the Transport Faculty, e-mail: batmanov1978@mail.ru

Marat R. Guseynov, Senior Lecturer, Department of Highways, Foundations and Foundations, e-mail: Maratdgtu@mail.ru

Madina N. Nazhmudinova, Postgraduate student, Department of Organization and Traffic Safety, e-mail: madina.sss@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.11.2020.

Принята в печать 19.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.11.2020.

Accepted for publication 19.11.2020.

Для цитирования: Т.В.Золина, С.П.Стрелков, Н.В.Купчикова, Р.И.Шаяхмедов, Г.К. Кондрашин. Мониторинг разрушения и обмеления водных объектов, берегоукрепительных сооружений в дельте реки Волги в рамках программы «Экология безопасного строительства». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4):132-140. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-132-140

For citation: T.V. Zolina, S.P. Strelkov, N.V. Kupchikova, R.I. Shayakhmedov, G.K. Kondrashin. Monitoring of destruction and shallowing of water bodies and bank protection structures in the Volga river delta within the framework of the "Ecology of safe construction" program. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):132-140. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-132-140

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 699.88

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-132-140

МОНИТОРИНГ РАЗРУШЕНИЯ И ОБМЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ, БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ВОЛГИ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ «ЭКОЛОГИЯ БЕЗОПАСНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА»

Т.В.Золина, С.П.Стрелков, Н.В.Купчикова, Р.И.Шаяхмедов, Г.К. Кондрашин

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева 18, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является мониторинг процессов разрушения прибрежных зон в рамках программы экология безопасного строительства и городского хозяйства для прогнозирования и предотвращения рисков, а также обеспечения информативности дальнейших работ по построению надежной береговой защиты. Несмотря на существующее разнообразие способов защиты насыпей от эрозии, поиск новых технических решений на данный момент продолжает оставаться актуальной задачей. **Метод.** Проведен геотехнический мониторинг гидротехнических сооружений и даны визуальные оценки трещин, наклонов отдельных блоков конструкции, деформаций. Использован прибор тепловизор, применяемый для поиска аномальных температур, и электронный скрерометр, измеряющий прочность бетона. **Результат.** Определено, что водный режим Астраханской области отличается неравномерным распределением стока из-за прямой зависимости от расхода с Волгоградской ГЭС. Преобладающим источником попадания влаги являются сбросы в виде серии дождевых паводков, которые часто вызывают наводнения. Одним из эффективных решений является сохранение эксплуатационных характеристик берегоукрепительной шпорой-сваей переменного сечения при изменении гидрологического режима реки. Берегоукрепительная шпора выполняется ограниченно подвижной по горизонтали и вертикали и включает: голову шпоры в виде сваи переменной высоты; тело в виде плавучей гирлянды переменного сечения; основание в виде подвижного блока с возможностью перемещения. Конструктивно-технологическое решение позволяет перекрывать телом шпоры прибрежный поток при любом уровне воды; изменять угол наклона шпоры по отношению к защищаемому берегу. **Вывод.** Предотвращение чрезвычайных ситуаций, особенно в урбанизированных районах, подверженных интенсивному антропогенному воздействию, возможно только при строительстве инженерных защитных сооружений, которые имеют положительный эффект как в защитном, так и в экологическом аспектах.

Ключевые слова: мониторинг, разрушение берегов, спутниковые снимки, берегоукрепление, экология безопасного строительства

MONITORING OF DESTRUCTION AND SHALLOWING OF WATER BODIES AND BANK PROTECTION STRUCTURES IN THE VOLGA RIVER DELTA WITHIN THE FRAMEWORK OF THE "ECOLOGY OF SAFE CONSTRUCTION" PROGRAM

T. V. Zolina, S. P. Strelkov, N. V. Kupchikova, R. I. Shayakhmedov, G. K. Kondrashin

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The article describes the features of works on coastal protection of territories subject to slope processes. The role of research of leading processes of destruction of coastal zones in the framework of the program “The Ecology of Safe Construction and Municipal Services” for forecasting and preventing risks, as well as providing information for further work on building reliable coastal protection, is emphasized. Despite the existing variety of ways to protect embankments from erosion, the search for new technical solutions at the moment continues to be an urgent task. **Methods.** Geotechnical monitoring of hydraulic structures was carried out. Visual assessments of cracks, slopes of individual structural blocks, and deformations were performed. A thermal imager device is used to search for abnormal temperatures and an electronic hardness meter that measures the strength of concrete. **Results.** It is determined that the water regime of the Astrakhan Region is characterized by an uneven distribution of runoff due to a direct dependence on the flow rate from the Volgograd hydropower plant. The predominant source of moisture is discharges in the form of a series of rain floods, which often cause flooding. One of the most effective solutions is to preserve the operational characteristics of the bank protection spur-pile of variable cross-section when changing the hydrological river regime. The bank protection spur runs partially movable horizontally and vertically and comprises a head spur in the form of piles of variable height; the body in the form of a floating garland of variable cross-section; the base in the form of a slider block. The design and technological solution allow blocking the coastal stream with the body of the spur at any water level and changing the angle of inclination of the spur with the protected shore. **Conclusion.** Prevention of emergencies, especially in urbanized areas that are subject to intense anthropogenic impact, is possible only when engineering protective structures are built, which have a positive effect both in protective and environmental aspects.

Keywords: monitoring, coastal destruction, satellite images, coastal protection, safe construction ecology

Введение. Береговые линии акватории дельты реки Волги постоянно подвергаются различным воздействиям с разной интенсивностью, результатом которых часто становится разрушение берегов, а также обмеление рек, ериков и ильменей. В прибрежной зоне сосредоточено много видов человеческой деятельности и интересов, которые значительно возросли в последние несколько десятилетий [1].

Постановка задачи. В рамках приоритетной НИР «АГАСУ» сотрудниками научно-исследовательской лаборатории проведены работы по исследованию процессов разрушения береговых зон, составлению алгоритма дистанционного мониторинга береговых линий по разновременным спутниковым снимкам, структуры формирования берегоукрепительных сооружений и мониторинга за их состоянием, в том числе получено три патента на новые технологии берегоукрепления. Были проведены работы на основе дистанционного мониторинга береговых линий дельты реки Волга по разновременным спутниковым снимкам. Фиксировалась береговая линия по наиболее качественному и наиболее старому снимку и накладывалась на современные снимки.



Рис.1. Ильмень к западу от села Промысловка
Fig.1. Ilmen to the west of the Promyslovka village

Объект: Ильмень к западу от села Промысловка (рис.1). Статус объекта Ильмень: высох.
Объект: Остров с северной и западной с. Бекетовка (рис.2.).



Состояние 2007 года Состояние 2020 года

Рис. 2. Остров с северной и западной с. Бекетовка
Fig.2. Island from the north and west with. Beketovka

Статус острова на текущий момент: размыв береговой линии восточной стороны острова с постепенным намывом на западной.

Объект: Береговая линия вдоль с. Никольское (рис.3 и 4).

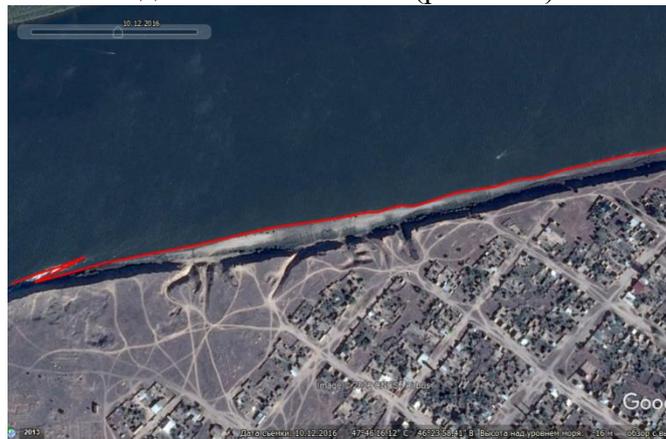


Рис.3. Состояние 2016 г.
Fig.3. State of 2016

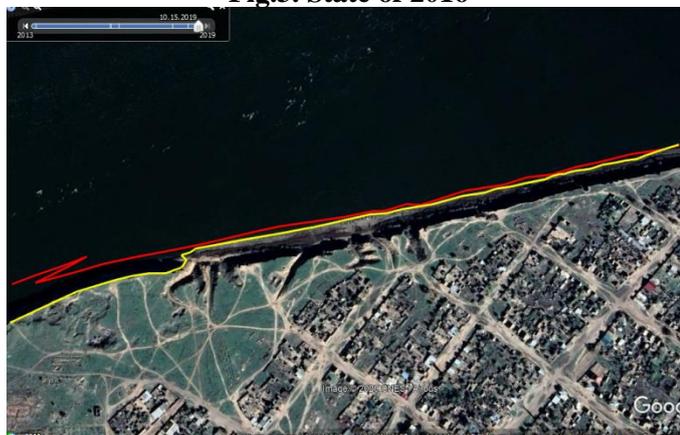


Рис.4. Состояние 2019 года
Fig.4. State of 2019

Статус берега на текущий момент: наблюдается мощное разрушение (размыв) береговой линии за три года.

Объект: Береговая линия и остров близ с. Далта (рис.5. и 6).



Рис.5. Береговая линия и остров близ с. Далта
Fig.5. Coastline and island near s. Dalt



Статус берега на текущий момент: наблюдается существенное разрушение (размыв с последующим намывом) береговой линии.

Методы исследования. Исходной информацией для вычислений скорости размыва берегов служат данные наблюдений (съемок) за величиной отступления берегов за длительный период. Для этого можно воспользоваться различными математическими и статистическими методами расчёта [2].

Чтобы избежать дорогостоящих донно-углубительных работ на территории судоходства и рыбоходных мест, необходимо как проведение данных дистанционных наблюдений за состоянием береговых линий, так и работы по берегоукреплению разрушающихся береговых линий.

Подобные берегоукрепительные сооружения относятся к гидротехническим. Они предназначены для защиты береговой полосы от агрессивного воздействия волн, течения и льда. Возводятся для предупреждения разрушений и затоплений берегов рек, морей, озёр и водохранилищ, откосов земляных дамб и искусственно созданных территорий.

Главная особенность мониторинга гидротехнических сооружений в том, что требуется вести непрерывное наблюдение за их состоянием, чтобы исключить или своевременно предотвратить аварийные ситуации в связи с воздействием опасных факторов техногенного и природного происхождения.

В рамках данных работ были проведены обследования берегоукреплений (рис.7), визуальные оценки трещин, наклонов отдельных блоков конструкции, деформаций. Были использован прибор тепловизор, который применяется для поиска аномальных температур, и электронный скреометр, измеряющий прочность бетона.



Рис.7. Объект гидротехнического мониторинга (берегоукрепление)

Fig.7. Hydrotechnical monitoring object (bank protection)

Оценка уязвимости перед опасностями является ключевым шагом на пути к повышению эффективности уменьшения опасности бедствий и создание потенциала устойчивости [3].

Целью геотехнического мониторинга является обеспечение безопасности строительства и эксплуатационной надежности возводимых (реконструируемых) сооружений и сохранности экологической обстановки.

При обследовании ГТС должны быть решены следующие задачи:

- выявлены признаки неблагоприятных для сооружений процессов;
- выявлены аномально большие осадки, деформации, перемещения;
- выявлены зоны и участки разрушения материала конструктивных элементов, сосредоточенных выходов фильтрационного потока;
- проведена оценка эффективности выполненных ремонтных мероприятий, состояния механического оборудования ГТС.

Использование данных статического и динамического зондирования в геотехнических проектах является сложной и часто достаточно специфичной задачей [4].

Обследования ГТС должны сопровождаться контрольными измерениями по контрольно-измерительным аппаратам, тестовыми испытаниями и проверочными расчетами, цели и объемы которых определяются программой работы организации, проводящей обследование. Вес, площадь покрытия береговой поверхности и двумерная гибкость конкретного матраца (элемента берегоукрепления), обеспечивает сопротивление против гидродинамических волновых нагрузок [5].

При выборе технологии строительства конструкций нужно ответить на несколько вопросов:

- Что доступно на месте строительства: ресурсы, строительные материалы?
- Каким должен быть срок строительства?
- Какие требования предъявляются к зданию: противопожарные и технологические?
- Каков способ доставки материалов на строительную площадку?
- Предусмотреть возможность расширения и модернизации производства [6].

Мониторинг конструктивных элементов сооружений осуществляется при помощи ряда инструментов, как для элементов конструкций, так и для сооружения в целом. Основными измерительными средствами данного блока мониторинга являются тензометрические датчики напряжения в конструктивных элементах здания; датчики контроля наклонов и ротационных процессов на объекте; датчики контроля перемещений технологически важных сочленений, стыков и швов.

Анализ технического состояния конструкций зданий и сооружений предусматривает, кроме прочих, использование результатов геодезического контроля [7].

В конструктивном отношении надводная часть сооружения делится на две зоны.

Основная часть берегоукрепительного сооружения с протяженностью 304 м представляет собой полуоткосную набережную со шпунтовой незаанкерванной стенкой нижнего яруса из стальных шпунтовых свай Ларсен IV, погруженных в грунт до отметки минус 33,900 м. абс. Верх стенки оформлен шапочным брусом из монолитного железобетона. Отметка верха шапочного бруса минус 24,500 м. абс. Обратная засыпка застенного пространства – песчаный грунт с углом внутреннего трения 30°. Заложение откоса набережной 1:2. Поверхность нижнего

яруса, откосной части и верхнего яруса покрыта монолитным железобетоном по щебеночному основанию. Отметка гребня верхнего яруса набережной минус 21,000 м. абс.

В состав подводной части берегоукрепительного сооружения входят:

- подушка из несортированного камня с бермой на отметке минус 37,500 м. абс;
- упорная призма из тетраподов Т-1 или Т-1,5 с просыпкой несортированной каменной мелочью с бермой на отметке минус 33,500 м. абс.
- крепление рваным камнем крупностью 15...45 см до отметки минус 27,500 м. абс. и до отметки минус 29,500 м. абс. перед пирсом.
- крепление проектного дна перед стенкой на всей длине набережной крупным щебнем фракции 70...150 мм толщиной слоя 1 м.

Применение информационных технологий обеспечивает специалисту-строителю возможность быстрой и эффективной работы [8].

В рамках реализации на территории Астраханской области программы «Экология безопасного строительства» на кафедрах геодезии и экспертизы строительства в Астраханском архитектурно-строительном университете уже много лет ведутся опытно-конструкторские разработки по мониторингу, экологически безопасным и энергоэффективным технологическим решениям по сохранению берегового ландшафта от вымывания, половодья и обмеления [11-14].

Одним из эффективных решений является сохранение эксплуатационных характеристик берегоукрепительной шпорой-свайей переменного сечения при изменении гидрологического режима реки. Берегоукрепительная шпора выполняется ограниченно подвижной по горизонтали и вертикали и включает: голову шпоры в виде сваи переменной высоты; тело в виде плавучей гирлянды переменного сечения; основание в виде подвижного блока с возможностью перемещения. Конструктивно-технологическое решение позволяет перекрывать телом шпоры прибрежный поток при любом уровне воды; изменять угол наклона шпоры по отношению к защищаемому берегу.

Конструкция подвижной берегоукрепляющей шпоры представлена на рис.8 и в период ледостава на рис.9. Энергия движения воды в разработке вместо разрушения берегов направляется на выработку электрического тока, который передается в сеть или используется на месте, например: на работу земснаряда, углубляющего основное русло реки.

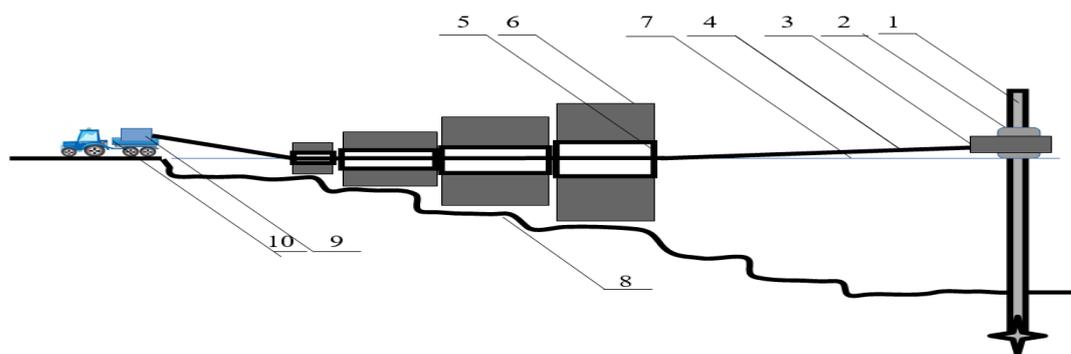


Рис.8. Технологическая схема устройства берегоукрепляющей шпоры из сваи переменного сечения:

1 – оголовок, 2 – фиксирующий блок, 3 – вертлюг, 4 – трос, 5 – поплавки, 6 – лопасти, 7 – верхнее положение лопастей, 8 – речное дно, 9 – генератор, 10 – перемещаемая платформа

Fig.8. Technological diagram of the device of a bank protection spur from a pile of variable cross-section:
1 - head, 2 - fixing block, 3 - swivel, 4 - cable, 5 - floats, 6 - blades, 7 - upper position of the blades, 8 - river bottom, 9 - generator, 10 - movable platform

Зимой, в период ледостава (рис. 3) вертлюг (3) закрепляется фиксирующим устройством (2) на новом самом низком уровне сваи, верхушка сваи (1) отсоединяется (вариант: свая более глубоко ввинчивается в дно), так чтобы от уровня льда (11) свая отстояла более чем на 0,5 метра. Лопасти (6) и поплавки (5) закрепляются тросом (4) в наклонном положении и продолжают выработку электроэнергии в генераторе (10), используя только свою винтовую поверхность.

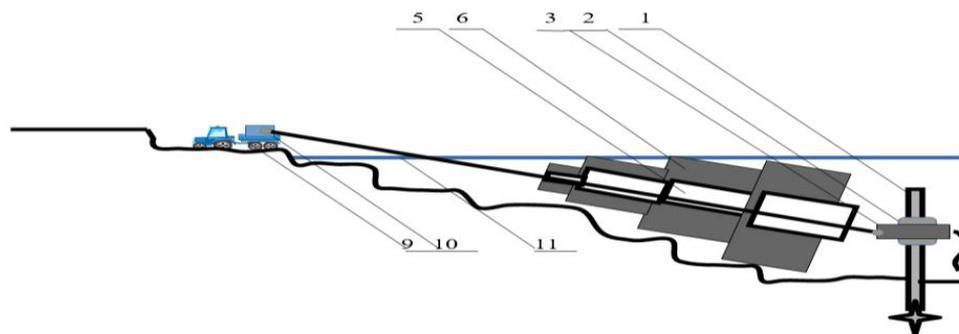


Рис.9. Технологическая схема устройства берегоукрепляющей шпоры из свай переменного сечения зимой, в период ледостава:

1 – оголовок, 2 – фиксирующий блок, 3 – вертлюг, 5 – поплавки, 6 – лопасти, 9 – генератор, 10 – перемещаемая платформа; 11 – уровень льда

Fig.9. Technological diagram of the device of a bank protection spur from a pile of variable cross-section in winter, during the freeze-up period:

1 - head, 2 - fixing block, 3 - swivel, 5 - floats, 6 - blades, 9 - generator, 10 - movable platform; 11 - ice level

Вывод. Выявлено что подавляющее большинство негативных воздействий на зоны, прилегающие к водным объектам, в той или иной степени являются следствием антропогенной нагрузки на территорию. Исследуемая зона дельты реки Волги, в том числе, подвержена сезонным колебанием паводковых вод.

Положительный эффект метода мониторинга береговых зон (с последующим берегоукреплением территорий наиболее потенциально разрушаемых), будет проявляться в сравнении с ликвидацией последствий подобных разрушений (дорогостоящими дноуглубительными работами) [9].

Представленные способы предотвращения обрушения крутых речных берегов, в полной мере взаимодействует с результатами мониторинга водных объектов и при отсутствии нарушений в возведении и правильном выборе параметров данных конструкций, можно рекомендовать применение данных исследований на практике [11-14].

Однако перед массовым внедрением данных технологий данные гидротехнические сооружения рекомендуется протестировать на различных отрезках береговых зон, с разной интенсивностью разрушения берегов. Так как, к примеру, при землетрясении степень повреждений и обрушений сооружений находится в прямой зависимости от потенциала заложенных в него критических дефектов [10]. А значит мониторинг не только водных условий, но и устанавливаемых защитных сооружений береговых зон, носит обязательный характер.

Библиографический список:

1. Postacchini M. Dyn. of the Coas. Zone. / M. Postacchini, A. Romano. DOI: 10.3390/jmse7120451 (2019)
2. Zolina T.V. Mag. of Civil Eng. / T.V Zolina, P.N. Sadchikov. 84(8), 150–161 (2018)
3. Gomez M.L.A. Dodou Trawally./M. L.A.Gomez, O.J.Adelegan, J.Ntajal.DOI: 10.1016/j.2019.101439 (2019)
4. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования [Текст] / Г.Г. Болдырев; – Москва: ООО НПП «Геотек», 2017. 12 с.
5. Gouw T.L. / T.L. Gouw DOI: 10.3208/jgssp.SEA-13(2016)
6. Золина Т.В. Пот. инт. од. мол. VII / Т.В. Золина, И.А. Попова, 68-73 (2018)
7. Шеховцов Г.А. Современные геодезические методы определения деформации инженерных сооружений / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шевцова // ИГАСУ. – Н. 101 с.
8. Золина Т.В. Пер. разв. стр. комп. / Т.В. Золина, С.В. Рассказова 12, 433-437 (2018)
9. Zolina T.V. Monitoring of the collapse of the shores of reservoirs and the technology of their surface and deep fixing e3s Web of conferences / Zolina T.V, Strelkov S.P, Kupchikova N.V, Kondrashin K.G. Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019. 2020
10. Zolina T.V. Adv. Mat., Str. & Mech. Eng. / T.V. Zolina, P.N. Sadchikov. 115–118 (2016)

11. Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group. В сборнике: Материалы XIII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. Под общей редакцией В.А. Гутмана, Т.В. Золиной. 2019. С. 149-153.
12. Купчикова Н.В., Шаяхмедов Р.И., Золина Т.В. Подвижная берегозащитная шпора. Патент на изобретение RU 2730607, 24.08.2020. Заявка № 2020107423 от 18.02.2020.
13. Купчикова Н.В., Шаяхмедов Р.И., Антипова А.Д. Способ создания уширения на конце винтовой сваи. Патент на изобретение RU 2678251 С2, 24.01.2019. Заявка № 2017125665 от 17.07.2017.
14. Купчикова Н.В., Шаяхмедов Р.И., Золина Т.В., Стрелков С.П. Способ предотвращения обрушения крутых речных берегов. Патент на изобретение RU 2729103, 04.08.2020. Заявка № 2020101977 от 17.01.2020.

References:

1. Postacchini M. Dyn. of the Coas. Zone. / M. Postacchini, A. Romano. DOI: 10.3390/jmse7120451 (2019)
2. Zolina T.V. Mag. of Civil Eng. / T.V. Zolina, P.N. Sadchikov. 84(8), 150–161 (2018)
3. Gomez M.L.A. Dodou Trawally. / M. L. A. Gomez, O. J. Adelegan, J. Ntajal. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101439 (2019)
4. Boldyrev G.G. Rukovodstvo po interpretatsii dannykh ispytaniy metodami staticheskogo i dinamicheskogo zondirovaniya dlya geotekhnicheskogo proyektirovaniya [Tekst] / G.G. Boldyrev; – Moskva: OOO NPP «Geotek», 2017. –12 s. [Boldyrev G.G. Guidance on the interpretation of test data by static and dynamic sounding methods for geotechnical design [Text] / G.G. Boldyrev; Moscow: OOO NPP "Geotek", 2017. 12 p. (In Russ)]
5. Gouw T.L. / T.L. Gouw DOI: 10.3208/jgssp.SEA-13(2016)
6. Zolina T.V. Pot. int. od. mol. VII / T.V. Zolina, I.A. Popova, 68-73 (2018) Zolina T.V. Sweat. int. od. pier VII / T.V. Zolina, I.A. Popova, 68-73 (2018) [Zolina T.V. Sweat. int. od. pier VII / T.V. Zolina, I.A. Popova, 68-73 (2018) (In Russ)]
7. Shekhovtsov G.A. Sovremennyye geodezicheskiye metody opredeleniya deformatsii inzhenernykh sooruzheniy / G.A. Shekhovtsov, R.P. Shevptsova // NGASU. – N 101 s. Shekhovtsov G.A. [Shekhovtsov G.A. Modern geodetic methods for determining the deformation of engineering structures / G.A. Shekhovtsov, R.P. Shevptsova // NGASU. N 101 p. (In Russ)]
8. Zolina T.V. Per. razv. str. komp. / T.V. Zolina, S.V. Rasskazova 12, 433-437 (2018) Zolina T.V. Per. development p. comp. / T.V. Zolina, S.V. Rasskazova 12, 433-437 (2018) [Zolina T.V. Per. development p. comp. / T.V. Zolina, S.V. Rasskazova 12, 433-437 (2018) (In Russ)]
9. Zolina T.V. Monitoring of the collapse of the shores of reservoirs and the technology of their surface and deep fixing e3s Web of conferences / Zolina T.V., Strelkov S.P., Kupchikova N.V., Kondrashin K.G. Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019. 2020
10. Zolina T.V. Adv. Mat., Str. & Mech. Eng. / T.V. Zolina, P.N. Sadchikov. 115–118 (2016)
11. Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Numerical researches of the work of the pile with and spherical broadening as part of the pile group. In the collection: Materials of the XIII International scientific and practical conference of faculty, young scientists and students. Under the General editorship of V. A. Gutman, T. V. Zolina. 2019. Pp. 149-153. [Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Numerical researches of the work of the pile with and spherical broadening as part of the pile group. In the collection: Materials of the XIII International scientific and practical conference of faculty, young scientists and students. Under the General editorship of V. A. Gutman, T. V. Zolina. 2019. pp. 149-153. (In Russ)]
12. Kupchikova N.V., Shayakhmedov R.I., Zolina T.V., Strelkov S.P. Sposob predotvrashcheniya obrusheniya krutykh rechnykh beregov. Patent na izobreteniyе RU 2729103, 04.08.2020. Zayavka № 2020101977 ot 17.01.2020. [Kupchikova N. V., Shayakhmetov R. I., Zolina T. V. Mobile coastal protection spur. The patent for the invention EN 2730607, 24.08.2020. Application no. 2020107423 dated 18.02.2020. (In Russ)]
13. Kupchikova N. V., Shayakhmetova R. I., Antipova A.D. a Method for creating a broadening at the end of a screw pile. The patent for the invention EN 2678251 C2, 24.01.2019. Application no. 2017125665 dated 17.07.2017.
14. Kupchikova N. V., Shayakhmetova R. I., Zolina T. V., Strelkov S. P. Method for preventing the collapse of steep river banks. The patent for the invention EN 2729103, 04.08.2020. Application no. 201977 dated 17.01.2020. [Kupchikova N. V., Shayakhmetova R. I., Zolina T. V., Strelkov S. P. Method for preventing the collapse of steep river banks. The patent for the invention EN 2729103, 04.08.2020. Application no. 201977 dated 17.01.2020. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Золина Татьяна Владимировна, доктор технических наук; профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, ректор, e-mail: zolinatv@yandex.ru

Стрелков Сергей Петрович, кандидат биологических наук, доцент кафедры геодезии, кадастрового учёта, декан строительного факультета, e-mail: ast_strelkov@mail.ru

Купчикова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры, заведующая кафедрой экспертизы, эксплуатации и управления недвижимостью, e-mail: kupchikova79@mail.ru

Кондрашин Кирилл Геннадьевич, ассистент кафедры геодезии, кадастрового учёта, e-mail: astrakhan_kirill@mail.ru

Шаяхмедов Растам Ирфагильевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры экспертизы, эксплуатации и управления недвижимостью, e-mail: rastams@mail.ru

Information about authors:

Tatiana V. Zolina, Dr. Sci. (Technical); Prof., Department of Industrial and Civil Engineering, Rector, e-mail: zolinatv@yandex.ru

Sergey P. Strelkov, Cand. Sci. (Biological), Assoc. Prof., Department of Geodesy, Cadastral Registration, Dean of the Faculty of Civil Engineering, e-mail: ast_strelkov@mail.ru

Natalya V. Kupchikova, Cand. Sci. (Technical); Assoc.Prof., Department, Head of the Department of Expertise, Operation and Management of Real Estate, e-mail: kupchikova79@mail.ru

Kirill K. Kondrashin, Assistant, Department of Geodesy, Cadastral Accounting, e-mail: astrakhan_kirill@mail.ru

Rastam I. Shayakhmedov, Cand. Sci. (Economic), Assoc. Prof., Department of Expertise, Operation and Management of Real Estate, e-mail: rastams@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.10.2020.

Принята в печать 18.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.10.2020.

Accepted for publication 18.11.2020.

Для цитирования: А.С. Личковаха, Б.А.Шемишюра, С.А.Кузнецов. Анализ колебаний нелинейной и линейной упругих систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4):141-150. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-141-150

For citation: A.S. Lichkovakha, B. A. Shemshura, S. A. Kuznetsov. Vibration analysis of nonlinear and linear elastic systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):141-150. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-141-150

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624. 016.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-141-150

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ И ЛИНЕЙНОЙ УПРУГИХ СИСТЕМ

А.С. Личковаха, Б.А.Шемишюра, С.А.Кузнецов

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),

344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Россия

Резюме. Цель. В настоящем исследовании поставлена задача установить теоретические предпосылки работоспособности регрессивно-прогрессивного упругого механизма путем сопоставления с линейной упругой системой сопоставимой жесткости в положении статического равновесия сравнением амплитудно-частотной характеристик и фазовых траекторий. **Метод.** В статье проводится сравнительный динамический анализ колебаний упругих систем с линейной жесткостью и с регрессивно-прогрессивной характеристикой, полученной в результате использования упругих элементов в виде стержней большой гибкости с продольным внецентренным сжатием. Такие упругие элементы в различных конструктивных вариантах были испытаны и запатентованы в качестве демпфирующих для использования в конструкции гасителей колебаний строительных сооружений и подвесок транспортных средств и в эксперименте показали свою эффективность в гашении колебаний. **Результат.** Регрессивно-прогрессивная упругая характеристика, полученная методом эллиптических параметров и с помощью расчетного комплекса ANSYS, используется в уравнениях динамики в аппроксимированном виде, что расширяет возможности метода. Показано, что повышение энергоемкости нелинейной системы позволяет уменьшить амплитуду колебаний. **Вывод.** Регрессивно-прогрессивный характер изменения жесткости нелинейной упругой системы, может быть достигнут при использовании упругого элемента с внецентренным продольным сжатием, причем регрессивный участок упругой характеристики достигается именно за счет внецентренного сжатия, а прогрессивный участок – за счет применения поводка или других конструктивных решений. Реализация характеристики позволяет использовать такие упругие механизмы в системах, когда при одном и том же возмущении накопление потенциальной энергии происходит с меньшим ходом сжатия, чем для линейных систем.

Ключевые слова: колебания, линейная механика, нелинейная механика, регрессивно-прогрессивная характеристика, стержень большой гибкости, продольное внецентренное сжатие, демпфирование, фазовые траектории

VIBRATION ANALYSIS OF NONLINEAR AND LINEAR ELASTIC SYSTEMS

A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov

Rostov State Transport University (RSTU),

2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Rostov-on-Don 344038, Russia

Abstract. Objective. In this study, the task is to establish the theoretical prerequisites for the operability of a regressive-progressive elastic mechanism by comparing the amplitude-frequency characteristics and phase trajectories with a linear elastic system of comparable stiffness in a static equilibrium position. **Methods.** The article presents a comparative dynamic analysis of vibrations of

elastic systems with linear rigidity and regressive-progressive characteristics obtained as a result of the use of elastic elements in the form of high flexibility rods with longitudinal eccentric compression. Such elastic elements in various design variants have been tested and patented as damping elements for use in the construction of vibration dampers for construction structures and vehicle suspensions, and have experimentally shown their effectiveness in damping vibrations. Results. The regressive-progressive elastic characteristic obtained by the elliptic parameters method and using the ANSIS calculation complex is used in the dynamics equations in an approximated form, which expands the capabilities of the method. It is shown that increasing the energy intensity of a curvilinear system reduces the vibration amplitude. Conclusion. The regressive-progressive change of the stiffness of curvilinear elastic systems can be achieved using an elastic element with eccentric longitudinal compression; the regression plot of elastic properties is achieved due to eccentric compression; the progressive plot – through the use of a guide or other design solutions. The implementation of this characteristic allows using such elastic mechanisms in systems where the accumulation of potential energy occurs with a smaller compression stroke for the same perturbation than for linear systems.

Keywords: vibrations, linear mechanics, curvilinear mechanics, regressive-progressive characteristic, high flexibility rod, longitudinal eccentric compression, damping, phase paths

Введение. Линейные колебания объектов с упругими элементами имеют место, когда восстанавливающая сила, или восстанавливающий момент пропорциональны величине отклонений колеблющегося объекта от положения равновесия. При этом в процессе движения жёсткость упругих элементов остаётся постоянной.

На практике часто возникает необходимость использовать переменную жёсткость упругих элементов с целью организации определённого вида колебаний. Так переменную жесткость системы можно получить, применив в качестве упругого элемента стержень большой гибкости [1-3], который позволяет получать нелинейную упругую характеристику с изменяемой жёсткостью (регрессивно-прогрессивная характеристика).

Постановка задачи. Задачей настоящего исследования является сравнение характера колебаний систем со стержнями большой гибкости (нелинейных систем) и систем с пружинами, имеющими линейную характеристику.

Методы исследования. На основе метода эллиптических параметров, разработанного Е.П. Поповым [4, 5], и геометрического представления эллиптических интегралов, предложенных Е.В. Анфиловьевым и В.М. Замятиным [6], в работах [7] и [8] определено напряжённо-деформируемое состояния стержней большой гибкости от воздействия на них осевых и не осевых нагрузок. В работе [9] разработана методика вычисления энергетического баланса системы со стержнем большой гибкости.

Исследования колебаний систем со стержнем большой гибкости проведём для схемы, изображённой на рис.1.

Она состоит (рис.1 б) из гибкого стержня «ОА», жёсткого рычага «АВ» и жёсткого поводка ВД.

Гибкий стержень «ОА» одним концом закреплён шарниром в т. «О», а другим концом жёстко соединён под прямым углом с рычагом «АВ». Жёсткий рычаг «АВ» (эксцентриситет), соединён шарниром «В» с поводком «ВД», который другим концом закреплён шарнирно в т. «Д». К шарниру «В» прикладывается направленная вертикально сила тяжести груза G .

Деформированное состояние системы определяется величиной силы G и параметрами стержней по методике, разработанной в [4].

Параметры стержней: $AB = 0,04$ м, $ВД = h = 0,08$ м, $l = OA = 0,4$ м, изгибная жёсткость гибкого стержня $H = 0,010728$ Нм². $ОД = d = 0,32$ м.

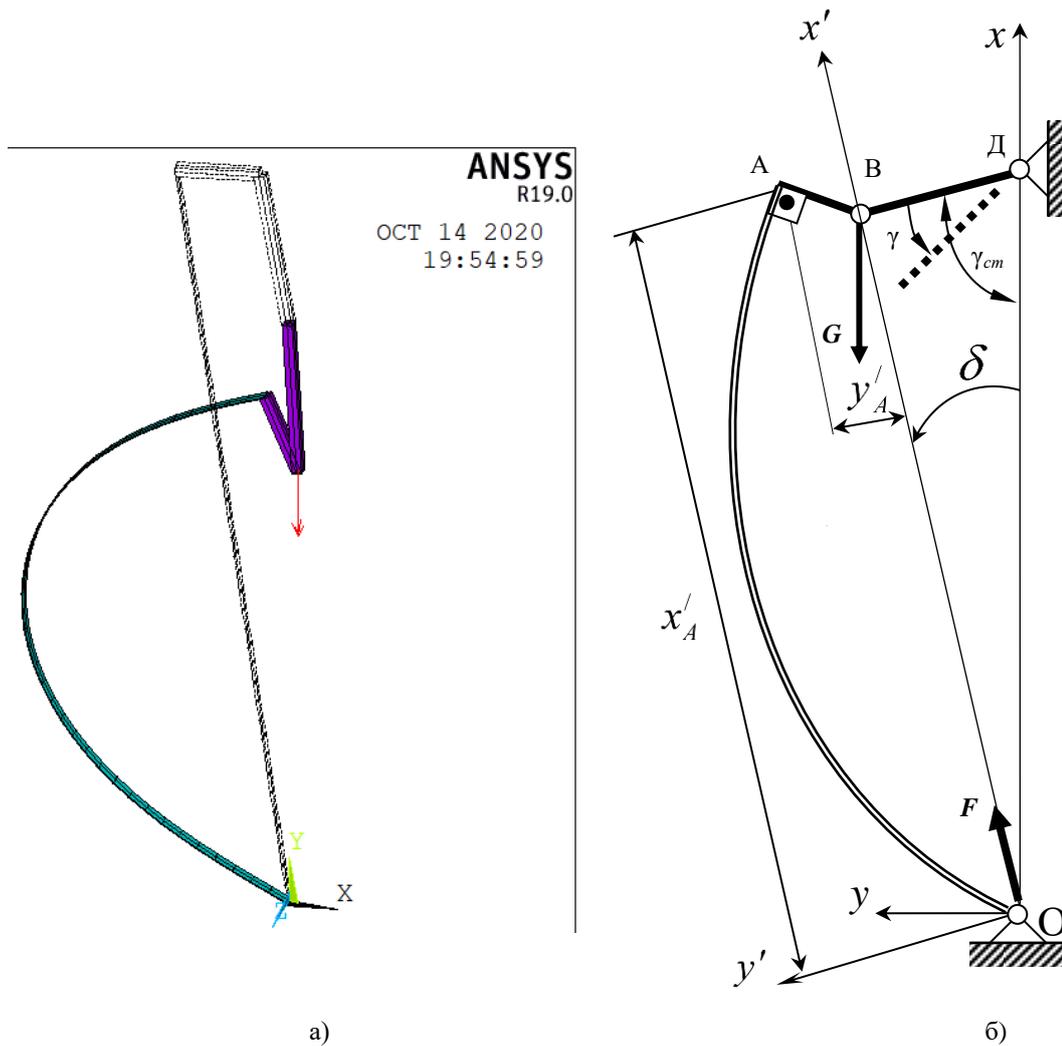


Рис. 1. Модель (а) и расчётная схема (б) системы со стержнем большой гибкости
 Fig.1. Model (a) and design scheme (b) of a system with a rod of great flexibility

В табл.1 приведены результаты расчётов, полученные методом эллиптических параметров необходимые для исследования колебаний.

Таблица 1. Результаты расчетов
 Table 1. Calculation results

Вычисляемые параметры Calculated parameters	Значения параметров Parameter values									
F , Н	0,2	0,39	0,45	0,52	0,55	0,6	0,64	0,68	0,71	0,74
ОВ, см	39,6	38	36,89	34,7	33,3	31	28,9	26,77	24,7	24,1
$\zeta = \gamma_{cm} - \gamma$, град	5,2	9,26	10,94	13,3	14,1	14,6	14,1	11,93	6,74	2,33
ζ , град	153,7	131,3	120,9	101,3	92	74	60,7	42,9	20,9	6,9
G , Н	0,162	0,33	0,39	0,485	0,54	0,63	0,7	0,815	0,93	0,97
h_B , см	0,7	2,65	3,9	6,4	7,8	10,3	12	14,1	15,6	16

В таблице обозначено:

γ_{cm} – угол отклонения поводка ВД от вертикали до положения статического равновесия,

γ – обобщённая координата – угол отклонение поводка ВД от положения статического равновесия,

$\zeta = \gamma_{cm} - \gamma$, – угол отклонения поводка ВД от вертикали до произвольного положения.

The table indicates:

γ_{st} is the angle of deflection of the VD leash from the vertical to the position of static equilibrium,

γ - generalized coordinate - angle of deviation of the VD leash from the position of static equilibrium,

$\zeta = \gamma_{st} - \gamma$, is the angle of deviation of the VD leash from the vertical to an arbitrary position.

На рис.2 показаны зависимости вертикального перемещения точки «В» от нагрузки G с использованием метода эллиптических параметров и с помощью расчетного комплекса ANSYS [10]. Анализ этих статических характеристик позволяет установить диапазон силы G , где имеет место нелинейная зависимость перемещений от нагрузок, наименьшую вертикальную жёсткость упругого стержня и соответствующую ей величину статической нагрузки.

Зависимость вертикального перемещения h_B (м) груза от величины его силы тяжести G (Н) при аппроксимации кубической параболой (погрешность 98%), имеет вид.

$$G = 388,3h_g^3 - 101,2h_g^2 + 11,9h_g + 0,056. \quad (1)$$

Жёсткость c_g (Н/м) гибкого стержня при вертикальном перемещении любого груза равна первой производной его по перемещению h_B .

$$c_g = \frac{dG}{dh_g} = 1164,9h_g^2 - 202,4h_g + 11,9. \quad (2)$$

Наименьшее значение жёсткость имеет место, когда первая производная обращается в ноль $\frac{dc_g}{dh_g} = 0 = 2329,8h_g - 202,4$; откуда $h_B = 0,087$ м и из равенства (2) минимальная жёст-

кость $c_g = 3,1 \frac{H}{м}$. Соответствующая этому минимальному значению жёсткости сила G , определяемая по формуле (1), равна $G = 0,6$ Н.

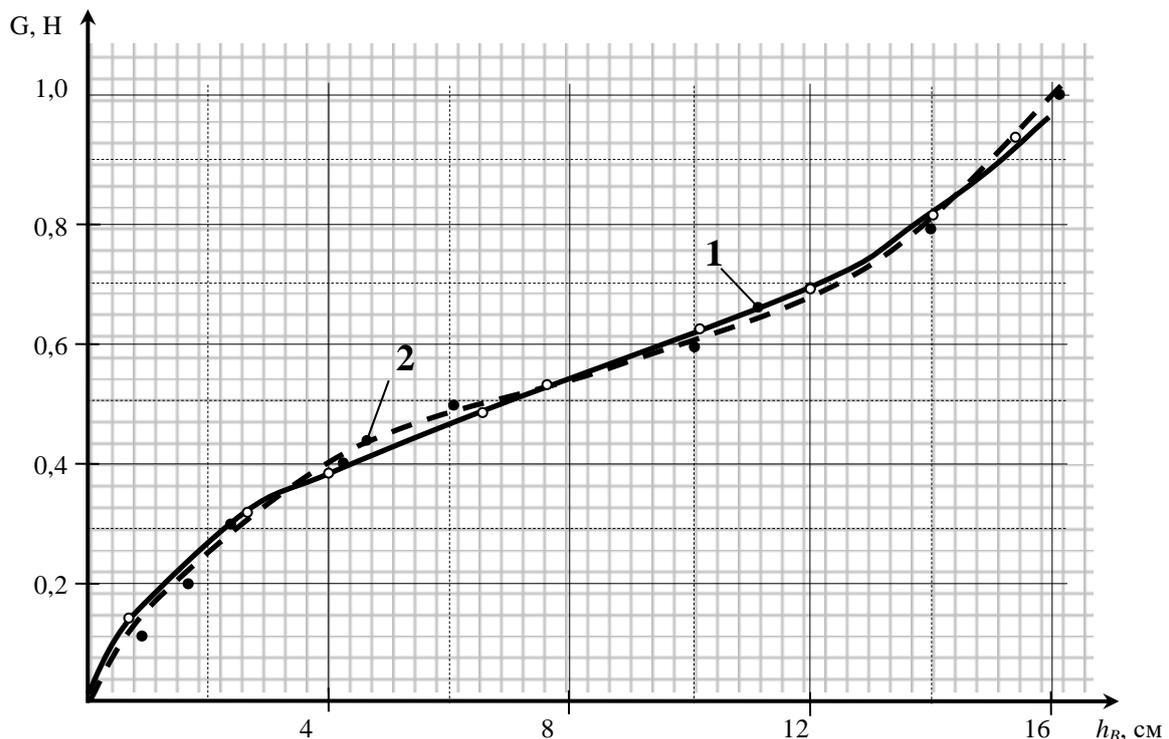


Рис. 2. Зависимости вертикального перемещения точки приложения силы G от величины этой силы (кривые равновесных состояний): 1 – кривая получена с помощью метода эллиптических параметров. 2 – кривая получена с помощью ПК ANSYS

Fig. 2. Dependences of the vertical displacement of the point of application of the force G on the magnitude of this force (curves of equilibrium states): 1 - the curve was obtained using the method of elliptical parameters. 2 - the curve was obtained using the ANSYS PC

Колебания будем рассматривать при постоянной силе $G = 0,6$ (статическая нагрузка). Реакция упругого стержня F (Н), зависящая при колебаниях от положения поводка ВД $F = f(\zeta)$, определяется с помощью аппроксимации из таблицы 1 (погрешность 98%).

$$F = 0,7397 - 0,0307\zeta^3 + 0,0494\zeta^2 - 0,112\zeta, \quad (3)$$

Здесь размерность ζ в радианах.

Выявим различие колебаний груза весом $G = 0,6$ Н в системах, представленных на рис.1 и рис.3. На рис.3 представлена система, позволяющая исследовать линейные колебания.

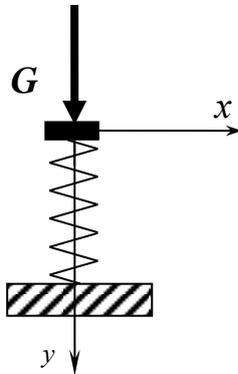


Рис. 3. Линейная система
 Fig. 3. Linear system

Линейная жёсткость пружины на рис. 3 постоянна и равна жёсткости упругого стержня по вертикальному направлению в положении статического равновесия

$$c = c_g = 3,1 \frac{H}{m}.$$

Начало координат при исследовании колебаний всегда принимается в положении статического равновесия системы. Восстанавливающая сила здесь пропорциональна перемещению груза и равна

$$F = c \cdot y.$$

Для системы, представленной на рис.3, дифференциальное уравнение движения груза весом G без учёта сопротивления имеет вид:

$$\ddot{y} + c \cdot \frac{g}{G} y = 0, \quad (4)$$

Круговая частота колебаний

$$\omega = \sqrt{\frac{c \cdot g}{G}} = \sqrt{\frac{3,1 \cdot 9,8}{0,6}} = 7,1 \frac{1}{c}$$

Период колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3,14}{7,1} = 0,88c.$$

Для системы рис.1 дифференциальное уравнение движения стержня ВД без учёта сил сопротивления примет вид

$$J_b \cdot \ddot{\gamma} = G \cdot h \cdot \sin \zeta - F \cdot d \cdot \sin \delta. \quad (5)$$

Здесь $J_b = \frac{G \cdot h^2}{g}$ – и а момент инерции массы относительно оси вращения поводка ВД.

Для решения дифференциального уравнения (5) необходимо, чтобы для всех переменных величин была установлена зависимость от обобщённой координаты γ . Для силы F такая зависимость установлена формулой (3), а для угла δ , определяющего направление подвижной оси x' , определяется по теореме синусов.

$$\sin \delta = \frac{h \sin \zeta}{\sqrt{h^2 + d^2 - 2h \cdot d \cos \zeta}}. \quad (6)$$

Угол отклонения поводка ВД от вертикали в зависимости от обобщённой координаты γ равен: $\zeta = \gamma_{cm} - \gamma$

Решение дифференциального уравнения (5) зависит от разности моментов сил F и G относительно оси вращения стержня «ВД». Такая разность, называемая восстанавливающим моментом, для рассматриваемой системы, имеющей стержень большой гибкости (рис.1) равна:

$$M = (0,7397 - 0,0307\zeta^3 + 0,0494\zeta^2 - 0,112\zeta) + 0,0277\gamma + 0,7084) \times \\ \times d \cdot \frac{h \sin \zeta}{\sqrt{h^2 + d^2 - 2h \cdot d \cos \zeta}} - Gh \sin \zeta. \quad (7)$$

По закону изменения восстанавливающего момента в зависимости от начальных условий определяется характер колебательных процессов.

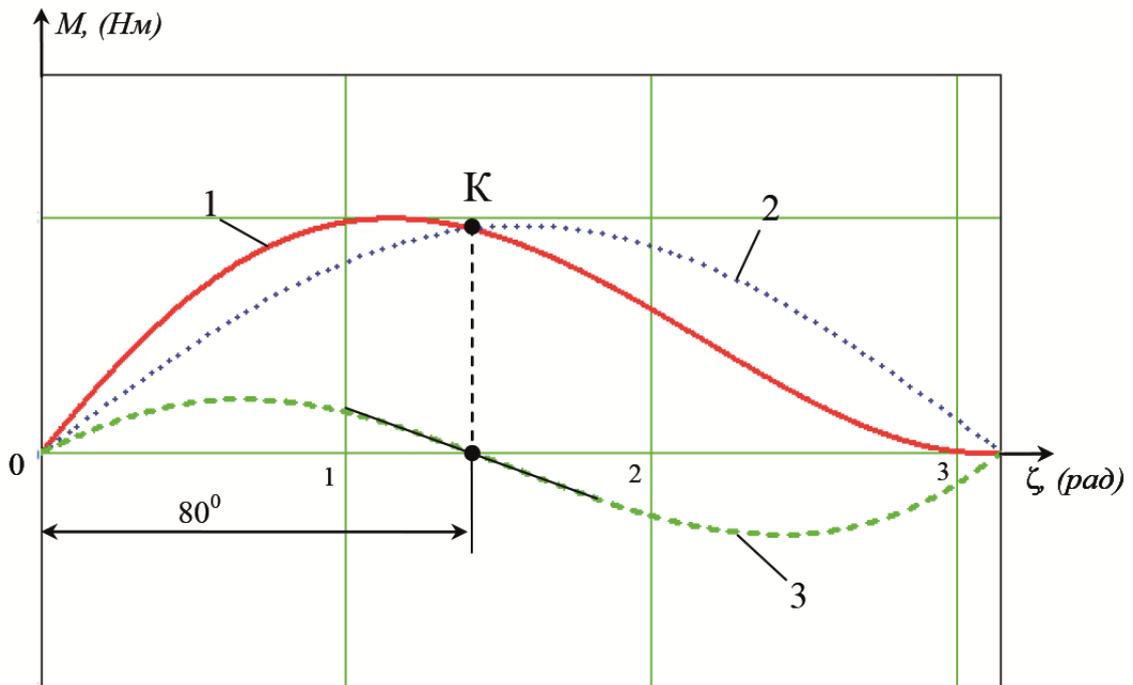


Рис.4. Зависимости моментов силы тяжести и реакции гибкого стержня от угла поворота ($M_B(F)$ – кривая 1 и $M_B(G)$ – кривая 2, $M = M_B(F) - M_B(G)$ – кривая 3)

Fig. 4. Dependences of the moments of gravity and the reaction of a flexible rod on the angle of rotation ($M_V(F)$ - curve 1 and $M_V(G)$ - curve 2, $M = M_V(F) - M_V(G)$ - curve 3)

На рис. 4 приведены графики моментов силы тяжести и реакции гибкого стержня относительно оси вращения рычага «ВД» (кривые 1 и 2) и восстанавливающего момента (кривая 3). При равенстве моментов силы тяжести $M_B(G)$ и реакции гибкого стержня $M_B(F)$ восстанавливающий момент M становится равным нулю (точка «К» на рис.4). При таком мгновенном положении равновесия меняется направление движения груза G.

Сравним колебания двух систем, (рис.1 и рис.3). Пусть системы находятся в положении статического равновесия и подвержены одинаковому возмущению.

В системе с гибким стержнем (рис. 1) примем следующие начальные условия:

Начальная угловая скорость $\dot{\gamma}_0 = 7 \frac{1}{c}$, начальное положение груза $\gamma_0 = 0$.

Тогда кинетическая энергия, сообщаемая системе равна

$$\mathcal{E}_k = \frac{G \cdot h^2}{2g} \cdot \dot{\gamma}_0^2 = \frac{0,6 \cdot 0,08^2}{2 \cdot 9,8} \cdot 7^2 = 0,0096 \text{ Дж.}$$

Начальные условия в линейной системе (рис.3) принимаются из условия, что кинетическая энергия будет такой же, т.е: $0,0096 = \frac{G}{2g} \cdot v_0^2$, откуда начальная скорость равна

$$v_0 = \dot{y}_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,0096}{0,6}} = 0,56 \frac{m}{c}, \quad \text{при этом } y_0 = 0.$$

Решения дифференциальных уравнений (4) и (5) с заданными начальными условиями получено в ПО *Mathcat*.

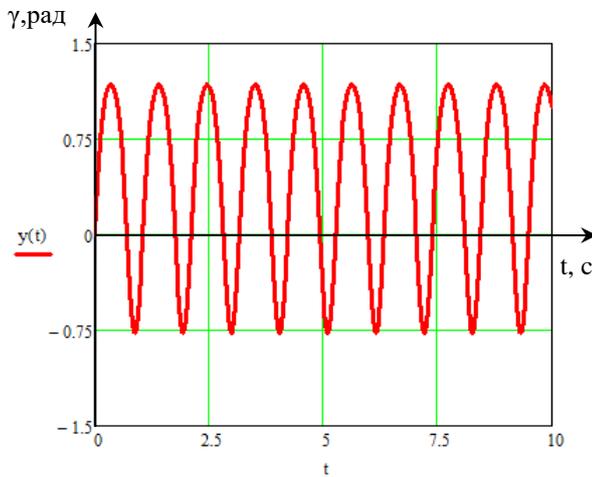
$$y''(t) + (-0.0307 \cdot y(t)^3 + 0.0494 \cdot y(t)^2 - 0.112 \cdot y(t) + 0.7397) \cdot d \cdot \frac{h \cdot \sin(y(t))}{Jb \cdot \sqrt{h^2 + d^2 - 2 \cdot h \cdot d \cdot \cos(y(t))}} - \frac{G \cdot h \cdot \sin(y(t))}{Jb} = 0$$

$y(0) = 0^\circ$ $y'(0) = 7$

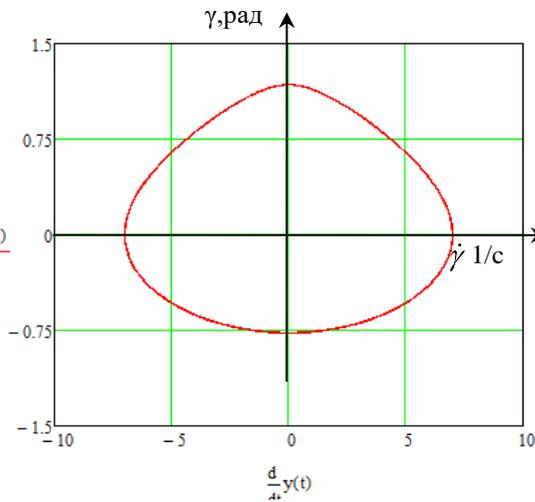
начальные условия

+

$y := \text{Odesolve}(t, 10)$ $t := 0, 0.01..100$



а)



б)

Given

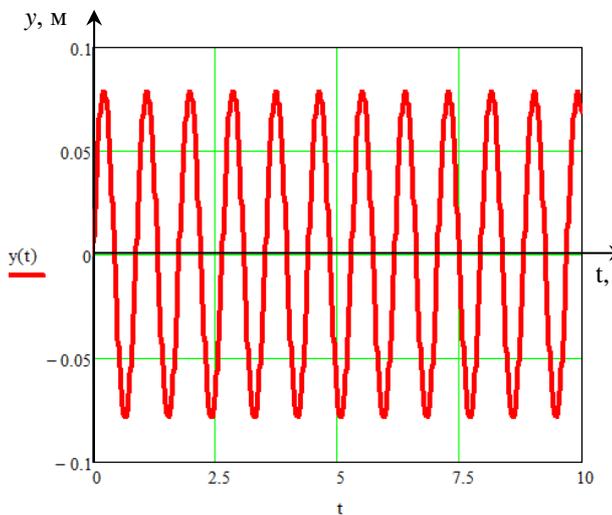
$$y''(t) + \frac{c \cdot g(y(t))}{G} = 0$$

исходное уравнение

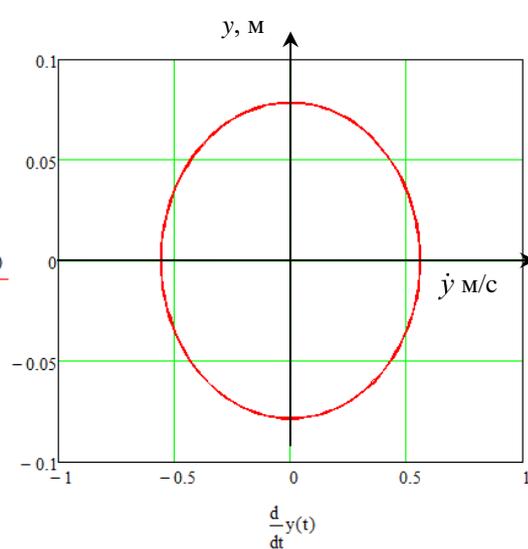
$y(0) = 0$ $y'(0) = 0.56$

начальные условия

$y := \text{Odesolve}(t, 10)$ $t := 0, 0.01..100$



в)



г)

Рис. 5. Колебания точки приложения силы во времени для нелинейной (а) и линейной (в) систем, фазовые траектории нелинейной (б) и линейной (г) систем
Fig. 5. Oscillations of the point of application of force in time for nonlinear (a) and linear (c) systems, phase trajectories of nonlinear (b) and linear (d) systems

На рис.5 а показана графическая зависимость обобщённой координаты от времени (система на рис. 1), на рис.5 в – такая же зависимость линейной системы (рис.3). Соответствующие фазовые траектории изображены на рис. 5 б и рис 5 г.

Проанализируем для каждой схемы, как преобразуется кинетическая энергия груза G в потенциальную энергию системы.

Для положений статического равновесия потенциальная энергия обеих систем (рис.1 и рис.3) равна нулю. При максимальном отклонении колеблющегося груза от положения равновесия скорость груза и, следовательно, кинетическая энергия становятся равной нулю. Согласно закону сохранения энергии механических колебаний, в этом случае кинетическая энергия, сообщённая каждой системе, полностью переходит в потенциальную энергию, равную 0,0096 Дж.

Определим при этом, как нарастает потенциальная энергия в зависимости от хода сжатия (вертикальное отклонения от положения равновесия груза G .) Для нелинейной системы из рис.5 а и 5 б следует, что максимальное отклонение стержня ВД от положения равновесия (обобщенная координата) в одну сторону равно $\gamma_1 = 1,2 \text{ рад} = 68,8^\circ$, а в противоположную $\gamma_2 = 0,77 \text{ рад} = 44,1^\circ$.

Потенциальная энергия для нелинейной системы (рис.1) равна работе восстанавливающего момента при перемещении поводка ВД от максимального отклонения $\gamma_{\max} = 68,8^\circ$ до первоначального $\gamma_0 = 0$.

$$E_n = \int_{68,8}^0 M d\gamma = 0,0096 \text{ Дж.}$$

Здесь значение M определяется по формуле (7).

Размах вертикальных колебаний для системы на рис.1 равен:

$$R_n = h[\cos(\gamma_{\text{ст}} - \gamma_1) - \cos\gamma_{\text{ст}}] + h[\sin(90^\circ - \gamma_{\text{ст}}) + \sin(\gamma_2 - 90^\circ + \gamma_{\text{ст}})]. \quad (8)$$
$$R_n = 0,1233 \text{ м.}$$

Потенциальная энергия для системы на рис.3 равна

$$E_n = \int_{0,0788}^0 c_g y dy = 0,0096 \text{ Дж.}$$

Для системы рис. 3 максимальное вертикальное отклонение груза G от положения равновесия равно амплитуде гармонических колебаний

$$A = h_g = \frac{v_0}{\omega} = \frac{\dot{y}_0}{\omega} = \frac{0,56}{7,1} = 0,0788 \text{ м.}$$

Размах линейных колебаний равен:

$$R_n = 0,1576 \text{ м.}$$

Обсуждение результатов. Свободные колебания сравниваемых систем при одной и той же сообщаемой энергии существенно различны (рис. 5 а, в). Это связано с тем, что для линейных колебаний восстанавливающий силовой фактор возрастает пропорционально величине отклонения груза от положения равновесия.

В то время как для схемы на рис. 1 он им пропорционален только при небольших отклонениях от положения равновесия, а при больших отклонениях эта пропорциональность нарушается (кривая 3 на рис.4).

Поэтому отклонения груза от положения равновесия нелинейной системы становятся не симметричным и движения таких систем по сравнению с линейными более «вальжжны». При этом размах колебаний более чем на 20% меньше, чем для линейной системы.

Фазовые траектории линейных колебаний имеют форму правильных эллипсов (рис. 5 г), а для нелинейных колебаний форма эллипсов искажается (рис. 5 б).

Вывод. Регрессивно-прогрессивный характер изменения жесткости нелинейной упругой системы, может быть, достигнут при использовании упругого элемента с внецентренным продольным сжатием, причем регрессивный участок упругой характеристики достигается именно

за счет внецентренного сжатия, а прогрессивный участок – за счет применения поводка или других конструктивных решений.

Реализация характеристики позволяет использовать такие упругие механизмы в системах, когда при одном и том же возмущении накапливание потенциальной энергии происходит с меньшим ходом сжатия, чем для линейных систем.

Библиографический список:

1. Пат. № 2706770 Российская Федерация, МПК В 60G 11/10. Упругий механизм с регрессивно-прогрессивной характеристикой / С.А. Кузнецов, А.С. Личковаха, Б. А. Шемшура . Заявл. 09.01.2019; опубл. 20.11.2019, Бюл. № 32.
2. Пат. № 2486065 Российская Федерация, МПК В 60G 11/04. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / С.А. Кузнецов, В.Н. Семенов, Я.А. Лысенко, Ю.Ю. Олейничева. Заявл. 15.02.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
3. Пат. № 2521879 Российская Федерация, МПК В 60G 3/16. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / В.Н. Семенов, С.А. Кузнецов, А.А. Галушкин. Заявл. 13.12.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
4. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е.П. Попов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 296с.
5. Пономарёв, С.Д. Расчёты на прочность в машиностроении /С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, В.И. Феодосьев. М.: Машгиз, 1956. Т.1. 886с
6. Анфилофьев А. В. Геометрическое представление эллиптических интегралов / А. В. Анфилофьев, В. М. Замятин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2005. Т. 308, № 5. С. 11-14.
7. Личковаха, А.С. Исследование деформации стержня большой гибкости при осевом нагружении /А.С. Личковаха, Б.А. Шемшура, С.А. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. 2016. №3. С. 71-76.
8. Личковаха А.С., Исследование напряжённо-деформированного состояния внецентренно сжатого стержня большой гибкости: / А.С. Кузнецов, Б.А.Шемшура, А.С. Личковаха. Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона №1, 2018 ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4773-0,9п.л.
9. А.С. Личковаха, Б. А. Шемшура, С.А. Кузнецов. К определению энергетического баланса нелинейной упругой системы// А.С. Личковаха, Б.А. Шемшура, С.А. Кузнецов// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения , 2018. №2. С.137-143.
10. Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов. М. : ДМК Пресс, 2009. 248 с.
11. Охорзин, В. А. Прикладная математика в системе Mathcad / В. А. Охорзин М. :, Лань, 2009. 352 с.

References:

1. Pat. № 2706770 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 60G 11/10. Uprugiy mekhanizm s regressivno-progressivnoy kharakteristikoy / S.A. Kuznetsov, A.S. Lichkovakha, B. A. Shemshura . Zayavl. 09.01.2019; opubl. 20.11.2019, Byul. № 32. [Pat. No. 2706770 Russian Federation, IPC B 60G 11/10. Elastic mechanism with a regressive-progressive characteristic / S.A. Kuznetsov, A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura. Applied. 01/09/2019; publ. 20.11.2019, Bul. No. 32.
2. Pat. № 2486065 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 60G 11/04. Uprugaya podveska s regressivno-progressivnoy kharakteristikoy / S.A. Kuznetsov, V.N. Semenov, YA.A. Lysenko, YU.YU. Oleynicheva. – Zayavl. 15.02.2012; opubl. 27.06.2013, Byul. № 18. [Pat. No. 2486065 Russian Federation, IPC B 60G 11/04. Elastic suspension with a regressive-progressive characteristic / S.A. Kuznetsov, V.N. Semenov, Ya.A. Lysenko, Yu. Yu. Oleinicheva. Applied. 02/15/2012; publ. 06/27/2013, Bul. No. 18.
3. Pat. № 2521879 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B 60G 3/16. Uprugaya podveska s regressivno-progressivnoy kharakteristikoy / V.N. Semenov, S.A. Kuznetsov, A.A. Galushkin. Zayavl. 13.12.2012; opubl. 10.07.2014, Byul. № 19. [Pat. No. 2521879 Russian Federation, IPC B 60G 3/16. Elastic suspension with a regressive-progressive characteristic / V.N. Semenov, S.A. Kuznetsov, A.A. Galushkin. Applied. 12/13/2012; publ. 07/10/2014, Bul. No. 19.
4. Popov, Ye.P. Teoriya i raschet gibkikh uprugikh sterzhney / Ye.P. Popov. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 296s. [Popov, E.P. Theory and calculation of flexible elastic rods / E.P. Popov. M. : Science. Ch. ed. physical-mat. lit., 1986. 296s.
5. Ponomarev, S.D. Raschoty na prochnost' v mashinostroyenii /S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, V.I. Feodos'yev. M.: Mashgiz, 1956. T.1. 886 s. [Ponomarev S. D. Strength calculations in mechanical engineering / S.D. Ponomarev, V.L. Biderman and V.I. Feodosiev. M. : Mashgiz, 1956 . Vol. 1. 886p.
6. Anfilof'yev A. V. Geometricheskoye predstavleniye ellipticheskikh integralov / A. V. Anfilof'yev, V. M. Zamyatin // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiya TPU]. 2005. T. 308, № 5. S. 11-14. [Anfilofiev

- AV Geometric representation of elliptic integrals / AV Anfilofiev, VM Zamyatin // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University [Bulletin of TPU]. 2005. T. 308, No. 5. pp. 11-14.
7. Lichkovakha, A.S. Issledovaniye deformatsii sterzhnya bol'shoy gibkosti pri osevom nagruzhenii /A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. 2016. №3. S. 71-76. [Lichkovakha, A.S. Investigation of the deformation of a rod of great flexibility under axial loading / A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. 2016. No. 3. pp. 71-76.
 8. Lichkovakha A.S., Issledovaniye napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya vnetsentrenno szhatogo sterzhnya bol'shoy gibkosti: / A.S. Kuznetsov, B.A.Shemshura, A.S. Lichkovakha. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Inzhenernyy vestnik Dona №1, 2018 ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4773-0,9p.1. [Lichkovakha AS, Investigation of the stress-strain state of an eccentrically compressed rod of great flexibility: / A.S. Kuznetsov, B.A. Shemshura, A.S. Lichkovakha. Electronic scientific journal Engineering Bulletin of Don No. 1, 2018 ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4773-0.9 pp.
 9. A.S. Lichkovakha, B. A. Shemshura, S.A. Kuznetsov K opredeleniyu energeticheskogo balansa nelineynoy upravlyayemyy sistemy// A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov// Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya , 2018. №2. S.137-143. [A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov On the determination of the energy balance of a nonlinear elastic system. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov // Bulletin of Rostov State University of Railways, 2018. No. 2. pp. 137-143.
 10. Basov K. A. ANSYS dlya konstruktorov / K. A. Basov. M. : DMK Press, 2009. 248 c. [Basov, K. A. ANSYS for designers / K. A. Basov M.: DMK Press, 2009. 248 p.
 11. Okhorzin, V. A. Prikladnaya matematika v sisteme Mathcad / V. A. Okhorzin. M. :, Lan', 2009. 352 c. Bibliographic list [Okhorzin, V. A. Applied mathematics in the Mathcad system / V. A. Okhorzin. M., Lan, 2009. 352 p.

Сведения об авторах:

Личковаха Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; кафедра «Строительная механика»; e-mail: lichkovaha@yandex.ru

Шемшура Борис Андреевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительная механика»; e-mail: stroi_meh@rgups.ru

Кузнецов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Общеинженерные дисциплины»; e-mail: sergey-kuznecov-57@mail.ru

Information about the authors:

Andrey S. Lichkovakha, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Mechanics; e-mail: lichkovaha@yandex.ru

Boris A. Shemshura, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Mechanics; e-mail: stroi_meh@rgups.ru

Sergey A. Kuznetsov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of General Engineering Disciplines, e-mail: sergey-kuznecov-57@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.11.2020.

Принята в печать 30.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 09.11.2020.

Accepted for publication 30.11.2020.

Для цитирования: А.Ф. Рожков, А.А. Лавров, И.В. Пикулева, Д.А. Поливанов. Обеспечение пространственной жесткости многоэтажного каркасного здания на основе древесины. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (4):151-161. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-151-161
For citation: A.F. Rozhkov, A. A. Lavrov, I.V. Pikuleva, D.A. Polivanov. Providing the spatial rigidity of a multi-story wood-based frame building. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):151-161. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-151-161

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-151-161

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

А.Ф. Рожков, А.А. Лавров, И.В. Пикулева, Д.А. Поливанов

Сибирский федеральный университет, Инженерно-строительный институт,
660041, г. Красноярск, проспект Свободный, 79, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается проблема обеспечения жесткости каркасного деревянного многоэтажного здания и способы достижения необходимой пространственной жесткости с учетом требований сохранения внутреннего объема и свободного пространства. В целях повышения экономической эффективности проекта предусмотрен случай избытка пространственной жесткости и меры ее оптимизации. **Метод.** Более простым и менее трудоемким методом является первоначальная оценка площади сечения жесткостных элементов, которые будут воспринимать ветровую нагрузку. Авторами предложен способ предварительного вычисления жесткости здания с последующей корректировкой в расчетной схеме. **Результат.** Составлена расчетная схема каркаса здания в программном комплексе Scad Office с целью учета влияния собственного веса конструкций, перераспределения усилий и перемещений за счет пространственной работы каркаса, с последующей корректировкой сечений жесткостных элементов. **Вывод.** Наиболее рациональным и наименее трудоемким методом численного расчета жесткости является первоначальная оценка площади сечения системы жесткостных элементов. С его помощью возможно избежать избытка пространственной жесткости здания и сократить время и трудозатраты на подбор и выбор места расположения жесткостных элементов.

Ключевые слова: пространственная жесткость, каркасное деревянное домостроение, CLT-технология, система жесткостных элементов, конструктивная схема здания, ствольная система

PROVIDING THE SPATIAL RIGIDITY OF A MULTI-STORY WOOD-BASED FRAME BUILDING

A.F. Rozhkov, A. A. Lavrov, I.V. Pikuleva, D.A. Polivanov

Siberian Federal University, Civil Engineering Institute,
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

Abstract. Objective. The article deals with the problem of ensuring the rigidity of a frame wooden multi-story building and ways to achieve the necessary spatial rigidity, taking into account the requirements of preserving the internal volume and free space. The case of excess spatial rigidity and measures to optimize it are provided to increase the economic efficiency of the project. **Methods.** A simpler and less time-consuming method is the initial estimation of the cross-sectional area of the rigid elements that take the wind load. The authors propose a method for the preliminary calculation of building stiffness with subsequent adjustment in the calculation scheme. **Results.** The design scheme of

the building frame is made in the Scad Office software package to take into account the influence of the own structure weight, the redistribution of forces and movements due to the spatial work of the frame, with subsequent adjustment of the cross-sections of rigid elements. **Conclusion.** The most rational and least time-consuming method for numerical calculation of stiffness is the initial estimation of the cross-sectional area of the system of rigid elements. With its help, it is possible to avoid an excess of spatial rigidity of the building and reduce the time and labor costs for selecting the location of rigid elements.

Key words: spatial rigidity, frame wooden housing construction, CLT technology, system of rigid elements, building structural scheme, trunk system

Введение. В настоящий момент деревянное многоэтажное домостроение постепенно теснит другие виды многоэтажного строительства. Данный факт легко объясним относительной доступностью проектов, экологичностью сырья и альтернативой ограниченности в создании различных архитектурных и конструктивных форм, а также стойкостью к сейсмическим воздействиям. Наглядным подтверждением последнего выступает 7-этажное здание, изготовленное по каркасной технологии, протестированное на современном сейсмологическом оборудовании. В результате эксперимента строение восприняло 14 сейсмических толчков магнитудой 7,5 баллов без критических повреждений конструкций [1, 2].

Постановка задачи. Появление новых композитных материалов на основе древесины и высокотехнологичных систем, преимущественно комбинированных, простимулировало возрождение деревянного строительства. Одним из основных внешних мотивирующих факторов, наиболее привлекающих внимание к изделиям на основе древесины в жилищном строительстве, является господдержка рынка деревянного домостроения, мерами рассмотрения и утверждения законопроектов о финансовой поддержке, льготных ипотечных программ [3, 4]. Таким образом, в настоящее время появляется и набирает обороты направление популяризации культуры жизни и строительства финансируемых проектов в городской среде с применением древесины в качестве основного материала. За последние 10 лет уже появилось множество успешных проектов высотных зданий на основе древесины. «Stadthaus» (рис. 1) – одно из первых многоэтажных строений, в котором CLT-элементы используются как основной конструктивный материал [5, 6].



Рис.1. Девятиэтажный «Stadthaus» в Лондоне (2008 год)

Fig.1. Nine-story "Stadthaus" in London (2008)

«Life Cycle Tower ONE» (рис. 2) является представителем деревянного комбинированного строительства – здание высотой в 8 этажей с железобетонными фундаментом и центральным ядром жесткости, деревянными клееными колоннами и композитными плитами пролетом 9 метров [5]. Древесина плит горизонтальных перекрытий покрыта бетонным слоем по верхней поверхности и боковым краям и выходит наружу только на нижних поверхностях, образующих потолок [7, 8]. Таким образом, основная структура модулей здания спроектирована из дерева, а бетон и сталь использованы в качестве усиления всей конструкции.



Рис. 2. Деревянное модульное здание «Life Cycle Tower ONE» в Дорнбирне (Австрия)
Fig. 2. Wooden modular building "Life Cycle Tower ONE" in Dornbirn (Austria)

«TREET» – современное 14-этажное деревянное строение, высотой 45 метров относительно уровня бетонного основания, уникальной особенностью которого является включение железобетонных «силовых этажей» после каждых четырех этажей из древесины (рис. 3) [5, 9, 10]. Вертикальную нагрузку воспринимают клееные деревянные вертикальные фермы, а из CLT-панелей выполнены лестницы, лестничные и лифтовые шахты, стены и перекрытия.



Рис. 3. «Treet» 14-этажное деревянное здание в Бергене (Норвегия)
Fig. 3. «Treet» 14-storey wooden building in Bergen (Norway)

Проект 6-этажного здания, высотой 27,5 метров инновационного центра проектирования на основе древесины в Британской Колумбии полностью выполнен из древесины. Конструктивное решение заключается в использовании полносборных деревянных элементов и исключении использования бетона выше фундамента [5, 11]. Проект самого высокого деревянного офисного здания в Северной Америке призван акцентировать внимания на преимуществах древесины как экологически чистого, доступного во всем мире строительного материала, демонстрируя эстетические и конструктивные возможности многоэтажного строительства из древесины.



Рис.4. 29,5-метровое офисное здание в городе Принс-Джордж в провинции Британская Колумбия
Fig.4. 29.5-meter office building in Prince George, British Columbia

Однако самым высоким деревянным зданием в мире стало 18-этажное здание общежития Канадского университета Британской Колумбии «Brock Commons», высота которого составляет 53 метра (рис.5). Каркас здания составляют 16 панелей перекрытия, выполненных по CLT-технологии, точно-опирающихся на клееные колонны, а также два железобетонных жестких ствола, воспринимающие ветровые и сейсмические воздействия и обеспечиваю-

щие устойчивость строения [12-14]. Замысел проекта студенческого общежития заключается в создании массового деревянного строительства, стоимость которого будет наравне с себестоимостью железобетонной высотки в условиях точечной застройки. «Brock Commons» является наглядным доказательством целесообразности деревянного домостроения на рынке высотного строительства.



Рис.5. 53-метровое здание студенческого общежития Канадского университета Британской Колумбии «Brock Commons»

Fig.5. The 53-meter building of the student residence of the Canadian University of British Columbia "Brock Commons"

Методы исследования. При проектировании многоэтажных зданий на основе древесины следует соблюдать соответствие множеству условий эффективности и безопасности, таких как: обеспечение долговечности здания мерами согласования конструктивного и технологического аспектов проекта с целью исключения возможности увлажнения и перегрева деревянных конструкций, восприимчивых к воздействию температурно-влажностных факторов; обеспечение пространственной жесткости и устойчивости конструкций, мерами устройства и постановки соответствующих жесткостных систем/элементов, с учетом технико-экономической оценки эффективности и рациональности конструктивного решения.

Вопрос классификации систем многоэтажного каркасного деревянного строительства неоднократно становился предметом научно-прикладных исследований. Вариации технологий каркасного строительства на основе древесины разнятся в зависимости от материала основы каркаса.

Первый вариант – это деревянный каркас, состоящий исключительно из деревянных элементов. Каркас дома выполнен из деревянных балок, изготовленных из клееного бруса, способного противостоять биологическим процессам, установленных под разными углами между колоннами связей, придающих каркасу, а, соответственно, и всему строению дополнительную жесткость. Важным нюансом каркасного дома выступает отсутствие металлических элементов крепления, все стыковки бруса и связей выполняются деревянными шкантами и нагелями [15].

Второй вариант – это металло-деревянный каркас, рабочим элементом которого является металлический термопрофиль [16]. Такой вариации деревянного каркасного домостроения характерен высокий показатель сейсмостойкости: каркас способен сохранять первоначальную геометрическую форму при действии силы землетрясений с магнитудой до 9 баллов по шкале Рихтера благодаря малому весу конструктивных элементов, упругим свойствам каркаса, которые обеспечиваются болтовыми узловыми соединениями и симбиотической работой металла и дерева [17]. Однако, данная конструкция обладает большой металлоемкостью и сложностью узловой сборки. Пространственная жесткость металло-деревянного каркаса обеспечивается надежными узловыми соединениями, металлическими элементами жесткости, целостной конструкцией панели и соединением панелей, и металлических рам металлическими элементами. Современным и наиболее прогрессирующим представителем бескаркасной панельной технологии строительства на основе древесины является «CLT-технология». Бесспорное преимущество данной инновации заключается в возможности использования CLT-плит в мало- и многоэтажном, большепролетном строительстве, такие панели активно используются во многих европейских странах.

Безусадочность и непромерзаемость изделий, высокая межэтажная звукоизоляция до-

полняют жесткость CLT-панелей, создающую эффективную систему сопротивления сейсмическим воздействиям [18,19]. Пространственная жесткость каркаса обеспечивается многослойной структурой панелей, продольная и поперечная – вертикальным и горизонтальными ламелями плиты и жестким соединением колонн и балок с помощью стальных коннекторов. К тому же, CLT-элементы обладают возможностью перераспределять напряжения от касательных нагрузок при распространении сквозных трещин в панели до момента возникновения критического состояния элемента [20-22].

В зависимости от способа обеспечения пространственной жесткости здания можно выделить 3 конструктивные схемы: рамную, связевую, рамно-связевую.

В рамной схеме устойчивость и прочность пространственной системы создается жестким защемлением ригеля с колонной – рамным узлом. Рамная система каркасных зданий обеспечивает надежность в восприятии нагрузок и равномерность деформаций рам, расположенных в здании, в продольном и поперечном направлениях, а также система создает максимальную свободу планировочных решений.

При гибком соединении ригеля с колонной узел является шарнирным, а каркас - связевым. В связевой схеме устойчивость обеспечивается симбиотической работой вертикальных и горизонтальных связей и диафрагм жесткости, воспринимающих усилия от горизонтальной нагрузки. В рамно-связевой каркасной системе вертикальные и горизонтальные нагрузки совместно воспринимают вертикальные диафрагмы жесткости и рамный каркас. За счет этой комбинации достигаются минимальные перемещения конструкции здания [23].

В случае, когда каркасной жесткости недостаточно, возможно комбинированное решение, которое представляет собой комбинацию конструктивных приемов обеспечения жесткости стеновой и ствольной систем. Вследствие этого, составная конструктивная система обладает наибольшей конструктивной гибкостью в части возможности распределения воспринимаемых усилий за счет варьирования жесткости элементов основы каркаса. Существует проблема обеспечения жесткости многостержневого каркаса, решением которой служит поиск наиболее эффективной, экономически рациональной конструктивной схемы здания. При проектировании каркаса необходимо учитывать условие обеспечения целостности объемно-пространственной структуры здания, путем сохранения единства внешнего и внутреннего объемов.

Следовательно, необходимо отказаться от связевых систем, во избежание загромождения внутреннего пространства строения, так как наклонные связевые элементы способны уменьшить внутренний объем здания, а, следовательно, и ограничить в свободной композиции интерьера, разнообразности архитектурного решения и планировки здания [18]. Но вопрос нахождения средства обеспечения геометрической неизменяемости конструкции остается открытым.

Обсуждение результатов. Рассмотрим вариант включения в работу по обеспечению пространственной жесткости каркаса многоэтажного здания ствольной системы, вертикальным несущим элементом которой является внутренний ствол, образуемый стенами лестничной клетки и лифтовой шахты. Целесообразность применения ядра жесткости в каркасном здании обуславливается дифференциацией статических функций между каркасом, воспринимающим вертикальные воздействия, и стволом, воспринимающим горизонтальные нагрузки; стойкостью восприятия сейсмических воздействий; свободой планировочных решений, поскольку пространство между стволом и наружными ограждающими конструкциями свободно от опор. Стены лестничной клетки и лифтовой шахты выполняются из массивных деревянных элементов, изготовленных по CLT-технологии. Выбор перекрестно-клееных CLT-панелей обусловлен высокой стоимостью, легким весом конструкции и стабильной статической прочностью панелей во всех направлениях [18, 24]. Стены ядра жесткости должны соответствовать требованиям пожарной безопасности. Условие обладания требуемой огнестойкостью выполняется за счет установки массивных элементов диафрагм жесткости, пропитанных антиперенами и обшитых негорючими материалами.

Горизонтальная жесткость конструкции может достигаться введением жестких плоско-

стей – диафрагм жесткости, которые располагаются в плоскости рам каркаса и воспринимают крутящие усилия. Каркасно-ствольная система аналогична каркасно-диафрагмовой, основанной на разделении статических функций между стеновыми и стержневыми элементами несущих конструкций. На вертикальные диафрагмы жесткости передается вся или большая часть горизонтальных нагрузок и воздействий, на стержневые элементы каркаса – преимущественно вертикальные нагрузки. А также с вводом жесткостных элементов в виде диафрагм жесткости возможно применение узловых элементов ригелей и колонн, простых в изготовлении и монтаже. Диафрагмы жесткости наиболее выгодно выполнить из CLT-панелей.

Способ достижения необходимой пространственной жесткости. Наряду с недостатком жесткости и поиском способов по достижению необходимой пространственной жесткости существуют случаи ее избытка, что влечет за собой уменьшение внутреннего пространства и объема здания, перерасход материала, а, следовательно, и снижение экономической эффективности проекта. Для предупреждения и предотвращения излишка пространственной жесткости каркаса здания необходима ее оптимизация путем численного расчета, который, в свою очередь, будет универсален для различных конструктивных систем.

Более простым и менее трудоемким методом является первоначальная оценка площади сечения жесткостных элементов, которые будут воспринимать ветровую нагрузку. Выбор в пользу данного метода подбора пространственной жесткости здания обуславливается тем, что создание расчетной схемы здания в программных комплексах без предварительного учета конструктивных и архитектурных требований по размещению жесткостных элементов, а также без учета их предварительных сечений, представляется весьма времязатратным и трудоемким. С целью оптимизации времени подбора сечений жесткостных элементов предложен упрощенный вариант расчета.

Перейдем, непосредственно, к предлагаемому методу подбора жесткости здания. В качестве примера приведен расчёт на восприятие ветровой нагрузки проектируемым 6-этажным деревянным зданием. Проектируемое строение в плане имеет сложную форму, с размерами в осях 13,5×18 метров с шагом колонн 4,5 метров. Климатические характеристики приняты относительно климатического района города Красноярска.

За основу была взята формула по расчету крена k -ой диафрагмы [25]:

$$f_k = \frac{4 \cdot a + 11}{120 \cdot E \cdot I} \cdot q \cdot H^4 + \frac{H^2}{3 \cdot E \cdot I} \cdot M'_k, \quad (1)$$

где a – отношение интенсивностей горизонтальных нагрузок внизу и вверху здания для рассматриваемой внешней нагрузки;

q – нагрузка, приходящая на верх диафрагмы;

E – модуль упругости материала;

I – момент инерции сечения;

H – высота здания;

M'_k – момент в верхнем сечении.

Формулу (1) необходимо упростить. Так как момент в верхнем сечении равен нулю, то в правой части зануляется одно слагаемое и выражается момент инерции [25]:

$$I_{req} = \frac{4 \cdot a + 11}{120 \cdot E \cdot f_k} \cdot q \cdot H^4, \quad (2)$$

Далее с учетом геометрических параметров здания необходимо собрать ветровую нагрузку, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Величина максимального допустимого крена здания определяется в соответствии с требованиями существующего нормативного документа по формуле:

$$f_u = \frac{h}{500}, \quad (3)$$

где h – высота многоэтажного здания, равная расстоянию от верха фундамента до оси ригеля покрытия.

Следовательно, максимальный допустимый прогиб здания f_u , высотой 16,8 м в верхней точке, имеет величину 33,6 мм. Учитывая эстетические требования и условие сохранения внутреннего объема и пространства, располагаем в плане жесткостные элементы, а именно лифтовой узел и диафрагму жесткости (рис.6). Следующим шагом необходимо определить требуемый момент инерции здания I_{req} .

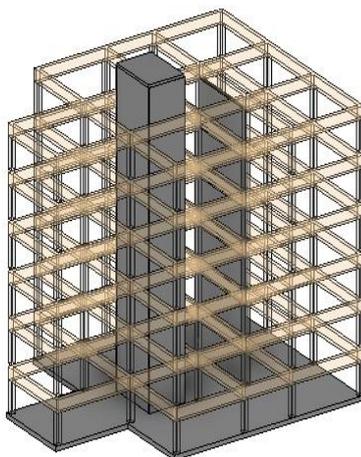


Рис.6. Схема расположения жесткостных элементов
Fig.6. Layout of stiffening elements

Учитывая принятые архитектурные и конструктивные решения, вычисляем момент инерции здания фактический I_f и сравниваем с моментом инерции требуемым I_{req} . Если условие выполняется, то постановка дополнительных диафрагм жесткости не требуется. В противном случае, необходимо увеличить жесткостные характеристики здания.

В нашем случае условие выполняется, и введение дополнительных диафрагм жесткости не требуется. Следовательно, утверждаем данное расположение жесткостных элементов (рис.7 и 8).



Рис.7. Итоговый вид конструкции здания с перекрытиями
Fig.7. The final view of the structure of the building with floors

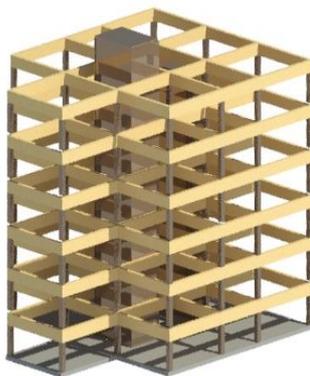


Рис. 8. Конструкции, воспринимающие горизонтальные усилия
Fig. 8. Structures that accept horizontal forces

Далее создаем расчетную схему каркаса здания в программном комплексе Scad Office, с целью учета влияния собственного веса конструкций, перераспределения усилий и перемещений за счет пространственной работы каркаса, с последующей корректировкой сечений жестких элементов. Расчетная схема здания представлена на рис. 9.

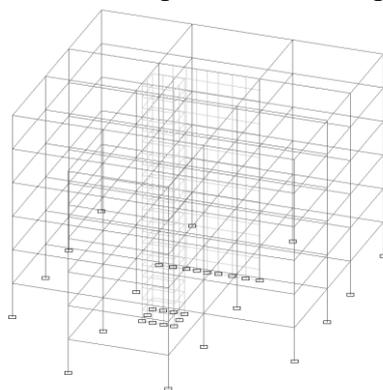


Рис. 9. Расчетная схема каркаса здания
Fig. 9. Design scheme of the building frame

В расчетной схеме защемление колонн и лифтового узла и диафрагмы – жесткое, соединение ригелей с колоннами – шарнирное.

По результатам расчета было установлено, что максимальное горизонтальное перемещение в верхней точке здания имеет величину 12,4 мм. Величина фактического прогиба не превышает значения предельно допустимого крена здания.

Следовательно, пространственная жесткость каркаса здания обеспечена. Деформированная схема здания представлена на рис. 10.

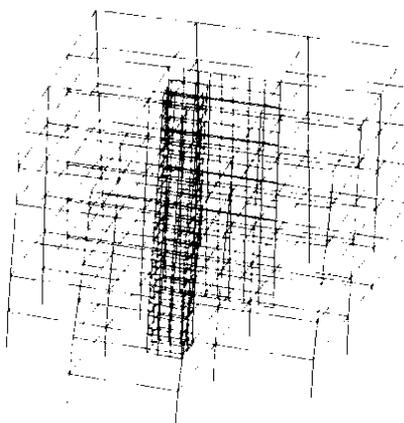


Рис.10. Деформированная схема каркаса здания
Fig.10. Deformed building frame diagram

Однако, с целью учета работы как самих CLT-панелей, так и их соединений, необходимо ввести поправочный коэффициент, который необходимо учесть в формуле расчета требуемого момента инерции здания I_{req} (2), так как его моделирование в программных комплексах затруднительно.

В заключение, выполним в ПК Scad Office два расчета, аналогичных расчету, приведенному выше, каркаса здания на воздействие ветровой нагрузки без предварительной оценки жесткостной характеристики каркаса здания.

Рассмотрим вариант конструктивной схемы здания, не включающего жесткостные элементы, каркас которого сформирован исключительно из стержневых элементов: колонн и ригелей. По результатам расчета максимальная величина горизонтального перемещения в верхней точке здания имеет величину 343,5 мм. Данное значение значительно превышает предельно допустимое. Следовательно, пространственная жесткость каркаса здания не обеспечена.

Далее рассмотрим вариант конструктивной схемы каркаса здания, горизонтальная жесткость которого обеспечивается конструкцией ядра жесткости. В этом случае, по результатам расчета, максимальная величина горизонтального перемещения в верхней точке здания имеет величину 24,61 мм. Данное значение не превышает предельно допустимое. Однако, в случае воздействия ветровой нагрузки в ином направлении, возникают крутящие моменты. Таким образом, принятое ранее расположение жесткостных элементов, представленное на рис.8, обеспечивает равномерное восприятие ветровой нагрузки и минимальное кручение здания вокруг своей оси.

Вывод. Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что предлагаемый способ предварительного вычисления жесткости здания с последующей корректировкой в расчетной схеме рационален и эффективен. С его помощью возможно избежать избытка пространственной жесткости здания и сократить время и трудозатраты на подбор и выбор места расположения жесткостных элементов.

Библиографический список:

1. Перспективы деревянного домостроения [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/perspektivy-derevyannogo-domostroeniya>. Заглавие с экрана.
2. Ведыков И. И., Мешкова Е.И. Тенденции мирового высотного строительства. Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура, 2013, 31-1 (50), 47-53 [Vedyakov I.I., Meshkova E.I. Trends of the world high-rise construction, J. Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 31-1 (50), 47-53(in Russian)].
3. Деревянное домостроительство получит господдержку [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/> – Заглавие с экрана. [Wood housebuilding will be supported by government [Electronic resource] – Access: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/>.
4. Анализ деревянного домостроения в России за 2010 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://marketing.rbc.ru/news_research/23/03/2011/562949979918112.shtml – Заглавие с экрана.
5. Poirier E, Moudgil M., Fallahi A., Staub-French S., Tannert T. Design and construction of a 53-meter-tall timber building at the university of British Columbia, World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 60-77.
6. Stadthaus, 24 Murray Grove, London [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://eoinc.weebly.com/uploads/3/0/5/1/3051016/murray_grove_case_study.pdf – Заглавие с экрана.
7. Zangerl M. Lct one [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://wooddesign.dgtlpub.com/2013/2013-02-28/pdf/LCT_ONE.pdf – Заглавие с экрана.
8. Tall Wood Gallery [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rethinkwood.com/tall-wood-masstimber/tall-wood-gallery> – Заглавие с экрана.
9. Abrahamsen R. B., Malo K.A. Structural design and assembly of “TREET” - a 14-storey timber residential building in Norway. World conference on Timber Engineering, Canada, 2014, 58-71.
10. Green M. The case for tall wood buildings [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-Tall-Wood.pdf> – Заглавие с экрана.
11. The Impacts of Construction and the Built Environment [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.willmott Dixon.co.uk/asset/download/9462 – Заглавие с экрана.
12. Mohammad M., Jones R., Karacabeyli E. New heights in building with wood: Canada’s tall wood buildings demonstration initiative. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 211-234.
13. Bergen N. Case study of UBC Brock Commons - construction details and methods. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 98-109.
14. Савицкий Н.В., Шехоркина С.Е., Никифорова Т.Д., Шляхов К.В. Многоэтажное деревянное домостроение: современные тенденции и будущие перспективы. Строительство, материаловедение, машиностроение, 2017, 99, 153-159 [Savyt-

- skyi M. V., Shekhorkina S. Yev., Nikiforova T. D., Slyakhov K. V. Multy-story wood construction: current trends and future prospects. J. Building, material engineering, mechanic engineering, 2017, 99, 153-159 (In Ukrainian)].
15. Bernhard G. Mass Timber Building Systems: Understanding the Options [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/NE-WSF-150916-GAFNER-Mass-Timber-Building-Systems.pdf> – Заглавие с экрана.
 16. Чеснокова О.Г. Возможности применения системы «Элевит» в малоэтажном строительстве. Журнал Интернет-вестник ВолГАСУ, 2013, 3 (28) [Chesnokova O.G., Potential for using the «Elevit» in low-rise housing construction, J. Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 3(28) (in Russian)].
 17. Stiemer S., Tesfamariam S., Karacabeyli E., Popovski M. Development of Steel-Wood Hybrid Systems for Buildings under Dynamic Loads. Conference: STESA. Santiago, Chile, 2012, 56/74.
 18. Fast P., Gafner B., Jackson R., Li J. Case study: an 18 storey tall mass timber hybrid student residence at the university of British Columbia, Vancouver. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 78-97.
 19. Zingerle P., Maderebner R., Flach M. System solutions for point-supported wooden flat slabs. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 277-288.
 20. Popovski M., Chen Z., Gafner B. Structural behavior of point-supported clt floor systems. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 268-275.
 21. Mestek P., Dietsch P. Design concept for CLT - reinforced with self-tapping screws. German Society of Wood Research. Germany, Munich, 2012, 307-318.
 22. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development, European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74 (3), 331–351.
 23. Воронкова Г.В., Ким Д.А. Влияние жесткостных характеристик элементов на перемещения в стержневой системе. Эффективные технологии и модели ресурсосбережения, энергосбережения и природопользования в ЖКХ и строительстве: труды международной научно-практической конференции. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2014, 69-75.
 24. Voccadoro L., Frangi A., Flachdecken aus Holz. Reliable timber and innovative wood products for structures. Structural elements of wood and wood products made of beech. Switzerland, Zürich, 2013, 21-29.
 25. Байков В.Н., Дроздов П.Ф., Трифонов И.А., Антонов К.К., Хлебной Я.Ф., Артемьев В.П., Рубинштейн В.С. Железобетонные конструкции. Специальный курс, М.: Стройиздат, 1981. 767 с.

References:

1. Perspektivy derevyannogo domostroyeniya [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/v/perspektivy-derevyannogo-domostroyeniya> – Zaglaviye s ekrana. [Prospects for wooden housing construction [Electronic resource] Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/v/perspektivy-derevyannogo-domostroyeniya>. Title from the screen. (In Russ)].
2. Vedyakov I. I., Meshkova Ye.I. Tendentsii mirovogo vysotnogo stroitel'stva. Vestnik volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhitektura, 2013, 31-1 (50), 47-53 [Vedyakov I. I., Meshkova E. I. Global high-rise construction trends. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction and architecture, 2013, 31-1 (50), 47-53 [Vedyakov I.I., Meshkova E.I. Trends of the world high-rise construction, J. Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 31-1 (50), 47-53 (In Russ)].
3. Derevyannoye domostroitel'stvo poluchit gospodderzhu [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/> – Zaglaviye s ekrana. [Wood housebuilding will be supported by government [Electronic resource] – Access: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/>. [Wooden house-building will receive state support [Electronic resource] - Access mode: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/> - Title from the screen. [Wood housebuilding will be supported by government [Electronic resource] - Access: <https://www.spb.kp.ru/daily/26574/3590018/>.(In Russ)].
4. Analiz derevyannogo domostroyeniya v Rossii za 2010 g. [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: http://marketing.rbc.ru/news_research/23/03/2011/562949979918112.shtml – Zaglaviye s ekrana. [Analysis of wooden housing construction in Russia in 2010 [Electronic resource] - Access mode: http://marketing.rbc.ru/news_research/23/03/2011/562949979918112.shtml Title from the screen. (In Russ)].
5. Poirier E, Moudgil M., Fallahi A., Staub-French S., Tannert T. Design and construction of a 53-meter-tall timber building at the university of British Columbia, World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 60-77.
6. Stadthaus, 24 Murray Grove, London [Electronic resource] - Access mode: https://eoinc.weebly.com/uploads/3/0/5/1/3051016/murray_grove_case_study.pdf - Screen title.
7. Zangerl M. Lct one [Electronic resource] - Access mode: http://wooddesign.dgtlpub.com/2013/2013-02-28/pdf/LCT_ONE.pdf - Title from the screen.
8. Tall Wood Gallery [Electronic resource] - Access mode: <http://www.rethinkwood.com/tall-wood-masstimber/tall-wood-gallery> - Title from the screen.
9. Abrahamsen R. B., Malo K.A. Structural design and assembly of “TREET” - a 14-storey timber residential building in Norway. World conference on Timber Engineering, Canada, 2014, 58-71.
10. Green M. The case for tall wood buildings [Electronic resource] - Access mode: <http://cwc.ca/wp-content/uploads/publications-Tall-Wood.pdf> - Screen title.
11. The Impacts of Construction and the Built Environment [Electronic resource] - Access mode: www.willmott Dixon.co.uk/asset/download/9462 - Title from the screen.
12. Mohammad M., Jones R., Karacabeyli E. New heights in building with wood: Canada's tall wood buildings demonstration initiative. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 211-234.

13. Bergen N. Case study of UBC Brock Commons - construction details and methods. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 98-109.
14. Savitsky N.V., Shekhorkina S.E., Nikiforova T.D., Shlyakhov K.V. Multi-storey wooden housing construction: current trends and future prospects. Construction, materials science, mechanical engineering, 2017, 99, 153-159 (In Ukrainian)].
15. Bernhard G. Mass Timber Building Systems: Understanding the Options [Electronic resource] - Access mode: <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/NE-WSF-150916-GAFNER-Mass-Timber-Building-Systems.pdf> - Screen title.
16. Chesnokova O.G. Vozmozhnosti primeneniya sistemy «Elevit» v maloetazhnom stroitel'stve. Zhurnal Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 3 (28) [Chesnokova O.G. Possibilities of using the "Elevit" system in low-rise construction. Journal Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 3 (28) [Chesnokova O.G., Potential for using the "Elevit" in low-rise housing construction, J. Internet-vestnik VolgGASU, 2013, 3 (28) (In Russ)]
17. Stiemer S., Tesfamariam S., Karacabeyli E., Popovski M. Development of Steel-Wood Hybrid Systems for Buildings under Dynamic Loads. Conference: STESA. Santiago, Chile, 2012, 56/74.
18. Fast P., Gafner B., Jackson R., Li J. Case study: an 18 storey tall mass timber hybrid student residence at the university of British Columbia, Vancouver. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 78-97.
19. Zingerle P., Maderbner R., Flach M. System solutions for point-supported wooden flat slabs. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 277-288.
20. Popovski M., Chen Z., Gafner B. Structural behavior of point-supported clt floor systems. World Conference on Timber Engineering. Austria, 2016, 268-275.
21. Mestek P., Dietsch P. Design concept for CLT - reinforced with self-tapping screws. German Society of Wood Research. Germany, Munich, 2012, 307-318.
22. Brandner R., Flatscher G., Ringhofer A., Schickhofer G., Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development, European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74 (3), 331– 351.
23. Voronkova G.V., Kim D.A. Vliyaniye zhestkostnykh kharakteristik elementov na peremeshcheniya v sterzhnevoy sisteme. Effektivnyye tekhnologii i modeli resursosberezheniya, energosberezheniya i prirodopol'zovaniya v zhkhk i stroitel'stve: trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2014, 69-75. [Voronkova G.V., Kim D.A. Influence of stiffness characteristics of elements on displacements in a rod system. Effective technologies and models of resource conservation, energy conservation and environmental management in housing and communal services and construction: proceedings of an international scientific and practical conference. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2014, 69-75. (In Russ)].
24. Boccadoro L., Frangi A., Flachdecken aus Holz. Reliable timber and innovative wood products for structures. Structural elements of wood and wood products made of beech. Switzerland, Zürich, 2013, 21-29.
25. Baykov V.N., Drozdov P.F., Trifonov I.A., Antonov K.K., Khlebnoy YA.F., Artem'yev V.P., Rubinshteyn V.S. Zhelezobetonnnyye konstruksii. Spetsial'nyy kurs, M.: Stroyizdat, 1981. 767 s. [Baikov V.N., Drozdov P.F., Trifanov I.A., Antonov K.K., Khlebnoi Y.F., Artemev V.P., Rubinstein V.S. Reinforced concrete structures. Special course, Moscow, Stroyizdat, 1981, 767 p. (In Russ)].

Сведения об авторах:

Александр Федорович Рожков, кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и управляемых систем, e-mail: labsfu@yandex.ru

Александр Алексеевич Лавров, магистр, кафедра строительных конструкций и управляемых систем, e-mail: lavrovdj@mail.ru

Инга Владимировна Пикулева, магистр, кафедра строительных конструкций и управляемых систем, e-mail: pikuleva.i.94@mail.ru

Денис Александрович Поливанов, магистр, кафедра строительных конструкций и управляемых систем, e-mail: frost_994@mail.ru

Information about authors:

Alexander F. Rozhkov, Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Controlled Systems, e-mail: labsfu@yandex.ru

Alexander A. Lavrov, Master, Department of Building Structures and Controlled Systems, e-mail: lavrovdj@mail.ru

Inga V. Pikuleva, Master, Department of Building Structures and Controlled Systems, e-mail: pikuleva.i.94@mail.ru

Denis A. Polivanov, Master, Department of Building Structures and Controlled Systems, e-mail: frost_994@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.11.2020.

Принята в печать 30.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 06.11.2020.

Accepted for publication 30.11.2020.

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4):162-171. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-162-171

For citation: A. K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Optimization of strutted beam parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(4):162-171. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-162-171

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-4-162-171

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ БАЛКИ

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является проектирование шпренгельных балок, которые имеют оптимальные по расходу металла параметры. **Метод.** Используется математическое моделирование работы шпренгельной балки с упругоподатливой в середине пролёта опорой. На основании решения соответствующего дифференциального уравнения поперечного изгиба верхней перекладины шпренгельной балки получены расчётные формулы. **Результат.** Разработана методика, позволяющая оптимизировать конструктивные параметры шпренгельной балки с одной стойкой. Приведены конструктивные расчётные схемы, а также формулы, которые дают возможность назначать параметры конструкции, обеспечивающие минимум расхода металла при соблюдении технологической простоты изготовления шпренгельной балки. Построен алгоритм, используя которого можно проектировать шпренгельные балки с одной стойкой. Полученные расчётные формулы лаконичны и просты при использовании. **Вывод.** Предлагаемая методика позволяет уменьшить собственный вес шпренгельной балки с одной стойкой до 60% по сравнению с обычными балками.

Ключевые слова: шпренгельная балка, упругоподатливая опора, дифференциальные уравнения, оптимальные параметры, алгоритм

OPTIMIZATION OF STRUTTED BEAM PARAMETERS

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov

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

Abstract. Objective. The objective of the research is to design strutted beams that have optimal parameters for metal consumption. **Methods.** A mathematical simulation of the operation of a strutted beam with elastic support in the middle of the span is used. The calculation formulas are obtained based on the solution of the corresponding differential equation of the transverse bend of the upper crossbar of the strutted beam. **Results.** A method has been developed to optimize the design parameters of a single-strut beam. Constructive calculation schemes are given, as well as formulas that allow assigning design parameters ensuring a minimum of metal consumption while maintaining the technological simplicity of manufacturing a strutted beam. An algorithm is constructed that can be used to design single-strut beams. The resulting calculation formulas are brief and easy to use. **Conclusion.** The proposed method allows reducing the weight of a single-strut beam by up to 60% compared to conventional beams.

Keywords: strutted beam, elasto-yielding support, differential equations, optimal parameters, algorithm

Введение. Шпренгельные балки находят широкое применение в практике проектирова-

ния и строительства. В отличие от обычных балок шпренгельные балки обладают рядом преимуществ: здесь прогибы существенно уменьшаются, достигается экономия металла. Применение шпренгельных балок обычно рациональны, когда по первой группе предельных состояний обычная балка отвечает условиям прочности, но не проходит по прогибам (по второй группе предельных состояний). В настоящее время шпренгельные балки часто встречаются в несущих конструкциях покрытия промышленных зданий, применяются как подкрановые балки [11], когда шаг колонн 12 м и более. Кроме того, эти конструкции часто применяются в балочных клетках в качестве главных балок. В тоже время, этим конструкциям присущи недостатки: возникает необходимость в устройстве стоек и затяжек, появляются сложности в устройстве опорных узлов. Однако в целом эти конструкции эффективны [2-6,8,12].

Постановка задачи. Шпренгельные балки рациональны [1,16] на пролётах $l = (8 \div 15)$ м. При проектировании таких балок можно повысить их эффективность, оптимизируя конструктивные параметры. Здесь мы приводим методику и примеры оптимизации параметров шпренгельной балки с одной стойкой.

Рассмотрим конструктивную схему, приведённую на рис.1. Из условия удобства эксплуатации высоту h назначаем, равной $h = 0,1 \cdot l$. В сечениях перекладки возникают изгибающие моменты M и поперечные силы Q . Кроме того, на перекладину действует и нормальное усилие N (рис. 2а и 2б).

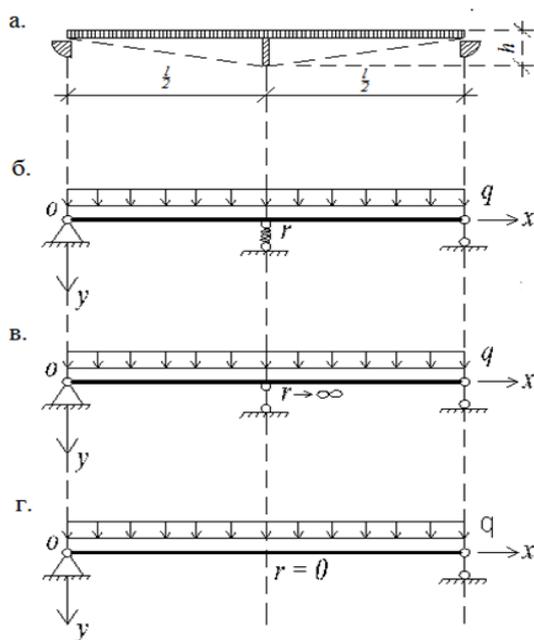


Рис.1. Конструктивные и расчётные схемы шпренгельной балки
Fig.1. Structural and design schemes of truss girders

Методы исследования. На основании использования функции прогибов с учётом упругой-податливости шпренгельных затяжек определяются изгибающие моменты в сечениях перекладки. Из условия равенства расчётных изгибающих моментов (по абсолютной величине) над средней опорой шпренгельной балки и в её пролётах, слева и справа от стойки, записывается условие оптимальности, которое позволяет определить параметры всей конструкции, что существенно уменьшают расход металла, когда сечение перекладки назначается постоянным по всему пролёту.

Всё это повышает технологичность изготовления конструкции и одновременно уменьшает её собственный вес.

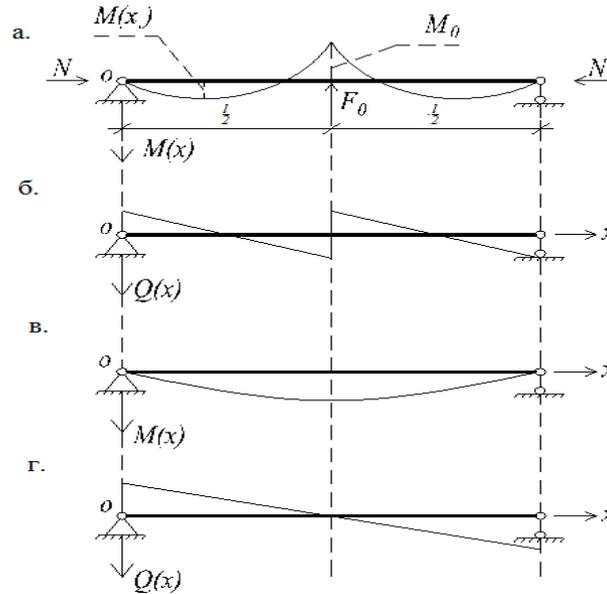


Рис.2. Эпюры внутренних усилий в шпренгельной балке
Fig.2. Diagrams of internal forces in a truss beam

Если жесткость упруго-податливой опоры стремится к бесконечности ($r \rightarrow \infty$), то расчетная схема упрощается (рис.1в). В этом случае предполагается, что затяжки, показанные пунктирными линиями на рис.1а, абсолютно жесткие.

При $r = 0$ шпренгельная балка вырождается в обычную однопролётную балку (рис.1г). На рис.2а, 2в, 2б, 2г даны соответствующие эпюры внутренних усилий.

Введём функцию прогибов $y(x)$ переключины в координатной системе, показанной на рис.1б. В расчетной схеме (рис.1б) работу затяжек и стойки (рис.1а) учитывает упруго-податливая опора. Пользуясь моделью Винклера [15], реакцию упруго-податливой опоры можно определить так (рис.2а):

$$F_0 = r \cdot y \left(\frac{l}{2} \right), \quad (1)$$

где коэффициент жесткости

$$r = 2E_3 \cdot A_3 \cdot l_3 \cdot \left(\frac{h}{l_3} \right)^2. \quad (2)$$

Здесь:

E_3, A_3, l_3 - соответственно модуль упругости, площадь сечения, геометрическая длина одной затяжки (рис.1а).

Усилия в затяжках найдём из условия равновесия нижнего узла шпренгельной балки (рис.1а и 3):

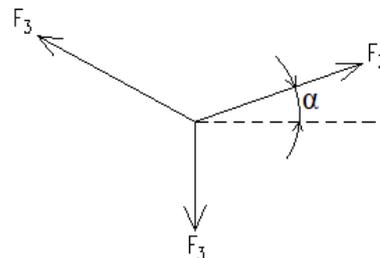


Рис. 3. Расчётная схема узла
Fig.3. Design scheme of the node

$$F_3 = r \cdot y \left(\frac{l}{2} \right) \cdot \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2}}{2h}. \quad (3)$$

Далее рассмотрим равновесие левого опорного узла (рис.1а и 4)

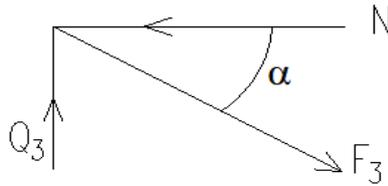


Рис.4. Расчётная схема левого опорного узла
Fig.4. Design scheme of the left support node

$$N = \frac{l}{4} \cdot \frac{r}{h} \cdot y\left(\frac{l}{2}\right). \quad (4)$$

Формулой (4) определяется осевое усилие N (рис.2а) в сечениях перекладины, которое остаётся постоянным по всему пролёту.

Далее перейдём к построению функции прогибов $y = y(x)$. В координатной системе, принятой на рис.1б, функция прогибов определяется выражением [14]:

$$y(x) = y_0(x) - \frac{y_0\left(\frac{l}{2}\right)}{G\left(\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right) + \frac{1}{r}} \cdot G\left(x, \frac{l}{2}\right). \quad (5)$$

Здесь:

r - коэффициент жёсткости (2);

$$y_0(x) = \int_0^l G(x, \xi) q(\xi) d\xi, \quad (6)$$

где $q(x)$ - погонная нагрузка, распределённая, в общем случае, произвольно; функция Грина

$$G(x, \xi) = [1 - e(x - \xi)] \cdot G_1(x, \xi) + e(x - \xi) \cdot G_2(x, \xi), \quad (7)$$

где $e(x - \xi)$ - единичная функция.

Функции, входящие в равенство (7), имеют вид [14]:

$$G_1(x, \xi) = -\frac{1}{E \cdot J} \cdot \left[\left(1 - \frac{\xi}{l}\right) \cdot \frac{x^3}{6} + A \cdot x \right], \quad (8)$$

$$G_2(x, \xi) = -\frac{1}{E \cdot J} \cdot \left[-\frac{\xi}{l} \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{\xi}{2} \cdot x^2 + B \cdot x + D \right],$$

коэффициенты:

$$A = \frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi \cdot l}{3} - \frac{\xi^3}{6 \cdot l}, \quad D = \frac{\xi^3}{6}, \quad B = -\frac{\xi \cdot l}{3} - \frac{\xi^3}{6 \cdot l},$$

EJ - жёсткость сечения перекладины при изгибе постоянная по пролёту.

Вернёмся к прогибам (6). Формулы (5 и 6) справедливы для любого распределения нагрузки. Наиболее часто встречающийся вариант нагрузки - это [7,9,10] равномерно распределённая нагрузка (рис.2). Поэтому далее примем $q = \text{const}$.

Подставив функцию (7) в подынтегральное выражение (6) и выполнив интегрирование (при $q = \text{const}$), найдём

$$y_0(x) = -\frac{q}{E \cdot J} \cdot \left(\frac{l \cdot x^3}{12} - \frac{x^4}{24} - \frac{l^3 \cdot x}{24} \right). \quad (9)$$

Отсюда при $x = \frac{l}{2}$

$$y_0\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} \quad (10)$$

Из выражений (7 и 8) определим

$$G\left(\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right) = \frac{l^3}{48 \cdot E \cdot J}, \quad (11)$$

$$G\left(x, \frac{l}{2}\right) = \left[1 - e\left(x - \frac{l}{2}\right)\right] \cdot G_1\left(x, \frac{l}{2}\right) + e\left(x - \frac{l}{2}\right) \cdot G_2\left(x, \frac{l}{2}\right). \quad (12)$$

где

$$G_1\left(x, \frac{l}{2}\right) = -\frac{1}{E \cdot J} \cdot \left(\frac{x^3}{12} - \frac{l^2}{16} \cdot x\right), \quad (13)$$

$$G_2\left(x, \frac{l}{2}\right) = -\frac{1}{E \cdot J} \cdot \left(-\frac{x^3}{12} + \frac{l}{4} \cdot x^2 - \frac{3 \cdot l^2}{16} \cdot x + \frac{l^3}{48}\right).$$

Формулами (9 - 13) даются все функции, входящие в равенство (5). Таким образом, выражением (5) функция прогибов $y(x)$ вполне определена.

Далее для компактности введём безразмерный коэффициент

$$k = \frac{E \cdot J}{r \cdot l^3}, \quad (14)$$

где величина r дана формулой (2).

С учётом коэффициента (14) и формулы (2) осевое усилие (4) запишем так:

$$N = \frac{5}{32} \cdot \frac{q \cdot l^2}{h(1 + 48 \cdot k)}.$$

$$\text{При } \frac{h}{l} = 0,1; \quad N = 1,56 \cdot \frac{q \cdot l}{1 + 48 \cdot k}; \quad (15)$$

из формулы (3) имеем

$$F_3 = 1,02 \cdot N, \text{ или } F_3 \approx N \quad (16)$$

Теперь, с учётом формул (10 – 13), а также зависимости (14), функцию прогибов (5) представим в компактном виде:

$$y(x) = y_0(x) - \frac{5 \cdot q \cdot l}{8(1 + 48 \cdot k)} \cdot G\left(x, \frac{l}{2}\right), \quad (17)$$

где

$y_0(x)$, $G\left(x, \frac{l}{2}\right)$, даны выражениями (9), (12), (13).

Изгибающие моменты $M(x)$ и поперечные силы $Q(x)$ в сечениях перекладкины определим по известным правилам:

$$M(x) = -E \cdot J \cdot y'', \quad Q(x) = -E \cdot J \cdot y'''(x) \quad (18)$$

Подставляя выражения (9), (12), (13) в равенство (17), затем полученное в формуле (18), имеем

$$M(x) = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (l \cdot x - x^2) - \frac{5 \cdot q \cdot l}{8(1 + 48 \cdot k)} \cdot \left\{ \left[1 - e\left(x - \frac{l}{2}\right)\right] \cdot \frac{x}{2} + e \cdot \left(x - \frac{l}{2}\right) \cdot \left(\frac{l}{2} - \frac{x}{2}\right) \right\}, \quad (19)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (l - 2x) - \frac{5 \cdot q \cdot l}{8(1 + 48 \cdot k)} \cdot \left\{ \left[1 - e\left(x - \frac{l}{2}\right)\right] \cdot \frac{1}{2} - e \cdot \left(x - \frac{l}{2}\right) \cdot \frac{1}{2} \right\}. \quad (20)$$

Далее введём обозначение

$$z = \frac{5}{4(1 + 48 \cdot k)}. \quad (21)$$

С учётом обозначения (22) формулы (20 и 21) упростим:

$$M(x) = \frac{q \cdot l}{2} \cdot x \cdot \left(1 - \frac{z}{2}\right) - \frac{q}{2} \cdot x^2, \quad (22)$$

$$Q(x) = M'(x) = \frac{q \cdot l}{2} \cdot \left(1 - \frac{z}{2}\right) - q \cdot x. \quad (23)$$

Координату $x=x_1$, при которой в левом пролёте шпренгельной балки изгибающие моменты имеют максимум (рис.2а), найдём из условия

$$M'(x) = Q(x) = 0.$$

Подставляя в это равенство функцию (24), находим

$$x = x_1 = \frac{l}{2} \cdot \left(1 - \frac{z}{2}\right). \quad (24)$$

Внося координату (25) в функцию (23), определим максимальное значение момента (рис.2а)

$$M(x_1) = \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{z}{2}\right)^2. \quad (25)$$

Из рис.2а видно, что изгибающие моменты имеют наибольшее значение M_0 над средней опорой. При $x = \frac{l}{2}$ по формуле (23) определим

$$M_0 = M\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot (1 - z). \quad (26)$$

Поскольку по технологическим соображениям перекладину рационально назначать в виде прокатного широкополочного двутавра или балки коробчатого сечения (постоянного сечения по пролёту), то оптимальность конструкции по массе будет обеспечена, если принять изгибающие моменты $M\left(\frac{l}{2}\right)$ и $M(x_1)$ равными по абсолютной величине. Другими словами, условие оптимальности по массе запишем так:

$$M(x_1) = -M\left(\frac{l}{2}\right). \quad (27)$$

Здесь знак минус введён, чтобы обеспечить абсолютное значение момента. Подставляя выражения (26) и (27) в равенство (28), получаем квадратное уравнение

$$z^2 - 8z + 8 = 0.$$

Корни этого уравнения:

$$z_1=6,828; \quad z_2=1,172. \quad (28)$$

Далее воспользуемся обозначением (22):

$$k = \frac{5-4z}{4 \cdot 48 \cdot z}. \quad (29)$$

Поскольку коэффициент «k» (30) - величина положительная, то в расчётах следует принимать $z_2=1,172$ (29). При этом значении z коэффициент k (формула 30) равен

$$k = 1,387 \cdot 10^{-3}. \quad (30)$$

Теперь по формулам (25), (26) и (27) (при $z = z_2 = 1,172$) вычислим

$$x_1 = \frac{l}{4,8}, \quad M(x_1) = \frac{q \cdot l^2}{46,46}, \quad M\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{q \cdot l^2}{46,24}. \quad (31)$$

Таким образом, приняв коэффициент (31), равным $k=1,387 \cdot 10^{-3}$, мы обеспечиваем одинаковость (по абсолютной величине) изгибающих моментов над стойкой и в пролётах (рис.2а).

Такая процедура позволяет разгрузить перекладину над средней опорой за счёт догружения недогруженных пролётов.

Например, при $k=0$ $M\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{q \cdot l^2}{32}$, а при $k=1,387 \cdot 10^{-3}$ $M\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{q \cdot l^2}{46,24}$.

На пролётах:

при $k=0$ $M(x_1) = \frac{q \cdot l^2}{56,80}$, а при $k=1,387 \cdot 10^{-3}$ $M(x_1) = \frac{q \cdot l^2}{46,46}$.

Другими словами: при $k=1,387 \cdot 10^{-3}$ изгибающий момент $M\left(\frac{l}{2}\right)$ (рис.3а) уменьшается с $M = \frac{q \cdot l^2}{32}$ до $M = \frac{q \cdot l^2}{46,46}$ и, наоборот, максимальное значение изгибающего момента на пролётах увеличивается с $M = \frac{q \cdot l^2}{56,80}$ до $M = \frac{q \cdot l^2}{46,46}$.

То есть, расчётные изгибающие моменты выравниваются. Это позволяет, сохранив по пролёту сечение перекладины постоянным, уменьшить затраты металла. Кроме того, здесь обеспечивается высокая технологичность изготовления. При этом сечение перекладины можно

принимать в коробчатом виде или в виде прокатного широкополочного двутавра, так как она (перекладина) работает на изгиб со сжатием.

Обсуждение результатов. Далее рассмотрим конкретный пример расчёта.

В сечениях перекладины шпренгельной балки (рис.2а, 2б) от усилий M, Q, N возникают напряжения σ_u, τ, σ_0 соответственно. Ниже, на рис. 5 и 6, даются эпюры напряжений.

В сечении перекладины с координатой $x = x_1$ (рис.2а) эпюры имеют вид, показанный на рис. 5.

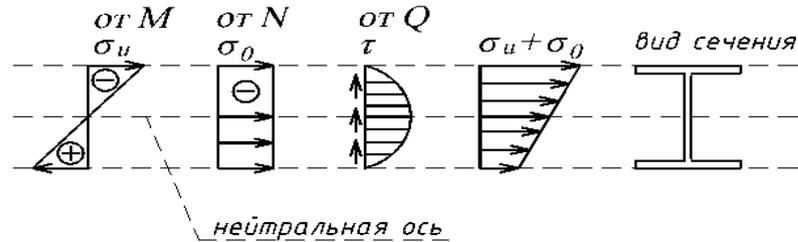


Рис.5. Эпюры внутренних напряжений
 Fig.5. Internal stress plots

В сечении перекладины с координатой $x = \frac{l}{2}$ (рис.2а) эпюры имеют вид, показанный на рис. 6.

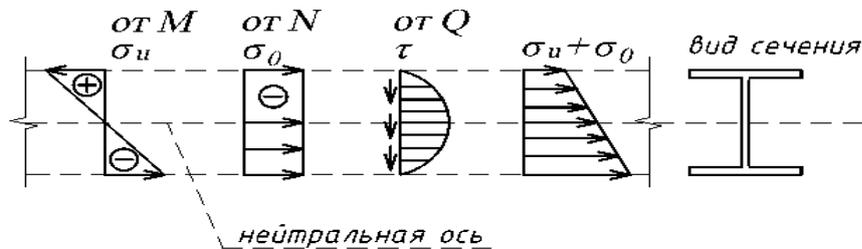


Рис.6. Эпюры внутренних напряжений
 Fig.6. Internal stress plots

Условие прочности запишем по 4-й теории прочности [3]:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma_u + \sigma_0)^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (32)$$

В соответствии с рис. (5) и (6) условие (33) упростим: на нейтральной оси сечения

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R, \quad (33)$$

на фибровых точках

$$\sqrt{(\sigma_u + \sigma_0)^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (34)$$

В формулах (33), (34), (35) [3]:

γ - коэффициент условий работы; R - расчётное сопротивление стали.

Перейдём к подбору сечения перекладины. Внутренние усилия M, Q, N будем вычислять по формулам (15), (23), (24), (26) при различных значениях коэффициентов « k » и « z » (формулы 22 и 31).

Рассмотрим различные варианты прокатного широкополочного двутавра (рис. 7). При этом будем пользоваться сортаментом [7,13].

Вид сечения перекладины - прокатный широкополочный двутавр. Для всех ниже рассматриваемых вариантов погонную нагрузку на перекладину примем равномерно распределённой, $q = 60$ кН/м, а пролёт шпренгельной балки $l = 15$ м. (рис.1а и рис.1б). Рассмотрим случай, когда $k = 0, z = \frac{5}{4}$; двутавр широкополочный № 55Б1 (рис. 7).

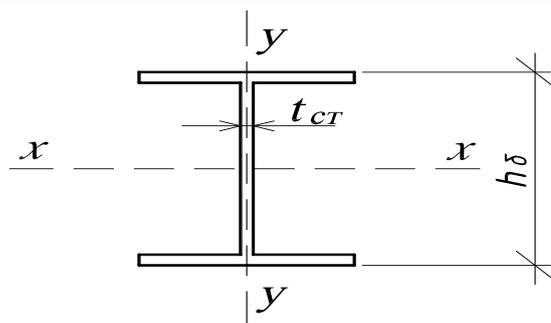


Рис.7. Сечение широкопачного прокатного двутавра
Fig.7. Section of a wide-flap rolled I-beam

Геометрические характеристики сечения:

$$h_{\delta} = 54,52 \text{ см}, \quad A = 110 \text{ см}^2,$$

$$\text{погонный вес } g = 86,3 \text{ кг/м},$$

$$J_x = 54480 \text{ см}^4, \quad W_x = 2000 \text{ см}^3,$$

статический момент половины сечения относительно нейтральной оси:

$$S = (27,25 \text{ см} \cdot 6,62 \text{ см}) \cdot 55 \text{ см}^2 = 1134,65 \text{ см}^3,$$

$$\text{толщина стенки } t_{ст} = 0,92 \text{ см}.$$

Внутренние усилия, вычисленные по формулам (15), (23), (24), (26):

$$M = 421,875 \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad N = 1406,25 \text{ кН}, \quad Q = 281,25 \text{ кН}.$$

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{421,875 \text{ кН}\cdot\text{м}}{2000 \text{ см}^3} = 21,09 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406,25 \text{ кН}}{110 \text{ см}^2} = 12,784 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{ст}} = \frac{281,25 \text{ кН} \cdot 1134,65 \text{ см}^3}{54480 \text{ см}^4 \cdot 0,92 \text{ см}} = 6,37 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34):

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(12,784)^2 + 3 \cdot (6,37)^2} = 16,89 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33,0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3.$$

На фибровых точках (условие 35);

$$\sqrt{(\sigma_u + \sigma_0)^2} = \sigma_u + \sigma_0 = 21,09 + 12,78 = 33,87 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \approx 33,0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3.$$

Вывод. Приведенный в статье алгоритм расчёта шпренгельных балок с одной стойкой позволяет проектировать шпренгельные балки, которые имеют оптимальные по расходу металла параметры.

Многочисленные примеры расчёта, выполненные по приведенному выше алгоритму, показали эффективность предлагаемой методики: шпренгельные балки с оптимизированными параметрами в среднем на 60% легче по собственному весу, по сравнению с обычными балками.

В силу ограниченности объёма статьи мы не можем здесь приводить конкретные таблицы, свидетельствующие о выше сказанном. В следующей нашей статье мы приведём все числовые примеры и соответствующие им таблицы, по которым можно будет судить об эффективности шпренгельных балок с оптимизированными параметрами, как по весу, так и по стоимости металла.

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 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. Клыкков В.М., Я.М. Лихтарников Расчет стальных конструкций. М.:75г. С.30-41.
4. Ливандовский 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.
5. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. Сб.V Международной научно-практической конференции "Научные исследования: от теории к практике". Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
6. Металлические конструкции. Под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
7. Металлические конструкции. Под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
8. Пат. 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.
9. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат,1980. С.195-196.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартиформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
12. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
13. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2010.
14. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
15. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
16. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019.

References:

1. Akayev N.K., Yusupov A.K. Algoritm rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. VESTNIK DGTU, Tom 42, №3, 2016 g. С.119-131. [Akayev N.K., Yusupov A.K. Algorithm for calculating truss crane beams. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences, Vol.42, No. 3, 2016. pp.119-131. (In Russ)]
2. Azhermachev S.G. Priblizhennyuy metod rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Stroitel'stvo i tekhnogen-naya bezopasnost'. Vypusk 37, 2011 g. С.34-39. [Azhermachev S.G. Approximate method for calculating truss crane beams. Construction and man-made safety. Issue 37, 2011. pp.34-39. (In Russ)]
3. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov Raschet stal'nykh konstruksiy. M–75g. С.30-41. [Klykov VM, Ya.M. Likh-tarnikov Calculation of steel structures. M.:75g. pp.30-41. (In Russ)]
4. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Usileniye zhelezobetonnykh balok shprengel'nymi zatyazhkami i vlozhennymi shprengelyami. XII mezhdunarodnaya konferentsiya studentov i molodykh uchenykh «perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk» Rossiya, Tomsk, 21-24 aprelya 2015 g. S.1338-1340. [Livandovsky N.N., Bo-gatyreva I.V. Reinforcement of reinforced concrete beams with truss ties and embedded trusses. XII International Conference of Students and Young Scientists "Prospects for the Development of Fundamental Sciences" Russia, Tomsk, April 21-24, 2015. pp.1338-1340. (In Russ)]
5. Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Razrabotka i issledovaniye shprengel'nykh balok novoy raskroyki. V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnyye issledovaniya: ot teorii k praktike". Tekhnicheskiye nauki. Tom 2. G. Cheboksary. 2015. s.62-70. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and research of new cut truss beams. V International scientific-practical conference "Scientific research: from theory to practice". Technical science. Vol. 2.G. Cheboksary. 2015. pp.62-70. (In Russ)]
6. Metallicheskiye konstruksii – pod redaksiyey Ye.I. Belenya, Moskva, Stroyizdat, 1986 g. С.382-384. [Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986, pp. 382-384. (In Russ)]
7. Metallicheskiye konstruksii - pod redaksiyey YU.I. Kudishina, Moskva, Akademiya, 2011g. С.439-442. [Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011 pp.439-442. (In Russ)]

8. Pat. 130333 RF. МПК E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonnoogo elementa / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyreva. Zayavleno 08.02.2013; Opubl. 20.07.2013, Byul. № 20. 5 s. [Pat. 130333 RF. IPC E04G 23/02. Sprengel for strengthening and ensuring the survivability of a bent reinforced concrete element / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyrev. Stated 02/08/2013; Publ. 20.07.2013, Bul. No. 20. 5 p. (In Russ)]
9. Stal'nyye konstruksii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat,1980. C.195-196. [Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M. : Stroyizdat, 1980. pp.195-196. (In Russ)]
10. SP 16.13330.2017 «Stal'nyye konstruksii». M.: Standartinform, 2017. AO "NITS "Stroitel'stvo" TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 92 s. [SP 16.13330.2017 "Steel structures". M. : Standartinform, 2017. JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 92 p. (In Russ)]
11. Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K., Muselemov KH.M. Shprengel'nyye podkranovyye balki. Makhachkala: DGTU, 2016. 120 s. [Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016.120 p. (In Russ)]
12. F. Khart (Myunkhen), V. Khenn (Braunshvayg), KH. Zontag (Berlin), Moskva, Stroyizdat, 1977g. «Atlas stal'nykh konstruksiiy». S. 37-84 [F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, 1977. "Atlas of Steel Structures". pp. 37-84 (In Russ)]
13. Yusupov A.K. «Metallicheskiye konstruksii v voprosakh, v otvetakh i v proyektirovani». Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2010. [Yusupov A.K. "Metal structures in questions, answers and design." Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2010. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 1. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 1. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
15. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 4. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» , 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 4. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
16. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalov SH.G. «Issledovaniye metalloderevyannoy balki». «Vestnik Mashinostroyeniya», №12, 2019 [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", No. 12, 2019. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Юсупов Абуспян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Устарханов Тагир Османович, ассистент, кафедра «Строительные материалы и инженерные сети»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyay K.Yusupov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Khairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Tagir O. Ustarkhanov, Assistant, Department of Building Materials and Engineering Networks, e-mail: hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.10.2020.

Принята в печать 19.11.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.10.2020.

Accepted for publication 19.11.2020.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах

невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования 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 редколлегией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;
- electronic copy (e-mail is acceptable);
- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);
- Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 - 2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 ImamaShamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 47– №4 – 2020.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 47, No.4 2020.

Верстка: Шагина С.Б.

Перевод: Субачев Ю.В.

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: Svetlana B.Shagina

Translation: Yuri.V. Subachev

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 15.12.2020г. Сдано в печать 15.12.2020г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 22,00 Уч. изд.л. 22,00

Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.