

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, № 3, 2020.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 47, No.3, 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, № 3, 2020
Главный редактор: Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, Россия.

<p>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. к 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 промышленности 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.</p>	<p>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, № 3 Махачкала, 2020 – 136с. Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»</p> <p>Адрес учредителя и издателя: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамяка, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс 8722)623715; (8722)623964 e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: http://vestnik.dgtu.ru/</p>
<p>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.</p>	

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ... 8

Т.А. Исмаилов, Х.М. Гаджиев, А.М. Ибрагимова

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕПЛОТВОД
ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ 8

А.В. Месропян, Е.А. Платонов, Р.Р. Рахматуллин

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХОДНОГО ДВИЖИТЕЛЯ
ПАРОМНО-МОСТОВОЙ МАШИНЫ ПММ-2М 16

Шакуров А.В., Кольшикин Л.М., Андреев Н.А.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 26

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 39

А.Р. Абзалов, И.И. Кашанов, А.Ю. Орлов, И.Р. Мамлеев

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ МОДЕЛИ
КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА 39

А.А. Горбунов, А.Д. Припадчев

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТ-
КИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ 49

Д.А. Гура, Н.М. Кирюникова, Э.Д. Лесовая, Н.И. Хушт, А.П. Павлюкова

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ
ИНФРАСТРУКТУРЫ 60

П.А. Кадиев, И.П. Кадиев

ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ МЕТОДОМ ИНДЕКСНОЙ
СТРУКТУРИЗАЦИИ ТАБЛИЦ УМНОЖЕНИЯ n - МНОЖЕСТВ 71

С.И. Короткевич, Ю.В. Минаева

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ КАРТЫ ГЛУБИНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЯРКОСТИ ТОЧЕК
И ИХ УДАЛЕННОСТИ ОТ ТОЧКИ НАБЛЮДЕНИЯ 82

В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов

УСТОЙЧИВЫЕ ДЕСКРИПТОРЫ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ 93

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА101

Э.К. Агаханов, С.Т. Хидиров, Г.Г. Габидулаев
НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ101

Б.В. Соболев, Е.В. Рашидова, П.В. Васильев, А.И. Новикова
РАВНОВЕСНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ТРЕЩИНЫ В УПРУГИХ ТЕЛАХ, ПОДКРЕПЛЁННЫХ
ТОНКИМИ ГИБКИМИ ПОКРЫТИЯМИ111

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов
РАСЧЁТ МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ122

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ132

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»
HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 4 7 , N o . 3 , 2 0 2 0 .

<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. Davidiyuk, 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. Kobzarenko, 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. Larionov, 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. Khadzhisalopov, 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:</p> <p>Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p>The co-chairs of the editorial council:</p> <p>Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;</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:</p> <p>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), 05.04.13 - Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences), 05.13.01 - System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.06 - Automation and management of technological processes and production (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.10 - Management in social and economic systems (Technical Sciences), 05.13.12 - Design automation systems (By Branches) (Technical Sciences), 05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 05.13.19 - Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences), 05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 05.23.05 - Building materials and products (Technical Sciences), 05.23.17 - Construction mechanics (Technical Sciences), 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.3 Makhachkala, 2020-136p.</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 ENGINEERING	8
<i>T.A. Ismailov, H.M. Gadjiev, A.M. Ibragimova</i> POWER-EFFECTIVE THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR HEAT REJECTION FOR COMPUTER PROCESSORS	8
<i>A.V. Mesropyan, E.A. Platonov, R.R. Rakhmatullin</i> MODELING WORKING PROCESSES OF THE MARINE THRUSTER OF THE PMM-2M FERRY-BRIDGE MACHINE	16
<i>A.V. Shakurov, L.M. Kolyshkin, N.A. Andreev</i> STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF TECHNICAL SUPPORT FOR CRYOTHERAPY TREATMENT	26
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT	39
<i>A.R. Abzalov, I.I. Kashapov, A.Yu. Orlov, I.R. Mamleev</i> USER AUTHENTICATION BASED ON THE THREE-STAGE KEYBOARDING MODEL	39
<i>A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev</i> SHAPING THE APPEARANCE OF A LONG-RANGE AIRCRAFT AT THE STAGE OF DEVELOPING A TECHNICAL PROPOSAL.	49
<i>D.A. Gura, N.M. Kiryunikova, E.D. Lesovaya, N.I. Husht, A.P. Pavlyukova</i> SOFTWARE FOR MONITORING THE STATE OF INFRASTRUCTURE FACILITIES	60
<i>P.A. Kadiev, I.P. Kadiev</i> FORMATION OF ORTHOGONAL LATIN SQUARES BY INDEX STRUCTURING OF N-SET MULTIPLICATION TABLES	71
<i>S.I. Korotkevich, Yu.V. Minaeva</i> ALGORITHM FOR CORRECTING THE IMAGE DEPTH MAP BASED ON THE POINTS BRIGHTNESS AND THEIR DISTANCE FROM THE OBSERVATION POINT	82
<i>V.B. Melekhin, V.M. Khachumov</i> STABLE DESCRIPTORS IN IMAGE RECOGNITION TASKS.	93
BUILDING AND ARCHITECTURE	101
<i>E. K. Agakhanov, S.T. Khidirov, G.G. Gabibulaev</i> STRESS STATE OF THE FOUNDATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES	101

B.V. Sobol, E.V. Rashidova, P.V. Vasiliev, A.I. Novikova

EQUILIBRIUM INTERNAL FRACTURES IN ELASTIC BODIES SUPPORTED BY THIN FLEXIBLE COATINGS 111

A. K. Yusupov, H. M. Muselemov, T.O. Ustarhanov

METAL-WOOD CRANE BEAM CALCULATION 122

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS 132

Для цитирования: Т.А. Исмаилов, Х.М. Гаджиев, А.М. Ибрагимова. Энергоэффективный термоэлектрический полупроводниковый теплоотвод для компьютерных процессоров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (3): 8-15. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

For citation: T.A. Ismailov, H.M. Gadjiev, A.M. Ibragimova. Power-effective thermoelectric semiconductor heat rejection for computer processors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 8-15. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

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

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-8-15

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕПЛОТВОД ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Т.А. Исмаилов, Х.М. Гаджиев, А.М. Ибрагимова

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

Резюме. Цель. В статье рассматривается отвод тепла от компьютерных процессоров с целью обеспечения необходимых тепловых режимов и термостатирования тепловыделяющих компонентов на интегральных схемах. **Метод.** Применены методы моделирования теплообменных процессов при теплопереносе от нагретого интегрального кристалла в окружающую среду. **Результат.** Энергоэффективность процессоров теплоотвода возрастает при применении излучающих термоэлектрических полупроводниковых устройств за счёт того, что поглощение тепла осуществляется на одних переходах, а вместо выделения тепла на других происходит испускание фотонов ультрафиолетового диапазона с целью получения лучших энергетических характеристик для обеспечения необходимого отвода мощности от тепловыделяющих компонентов радиоэлектронных схем. Такой подход обладает большим преимуществом за счет того, что излучение обладает максимальным быстродействием при переносе энергии по сравнению с конвекцией и кондукцией, что позволяет осуществить безынерционный отвод тепла от тепловыделяющих компонентов в окружающую среду. Также такой подход позволяет повысить коэффициент полезного действия системы охлаждения и ускорить перенос тепла от нагретых участков для предотвращения теплового пробоя. **Вывод.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для охлаждения с высокой энергоэффективностью можно использовать светоизлучающие термоэлектрические полупроводниковые устройства, которые могут с малой инерционностью осуществить перенос больших объемов мощности в окружающую среду. Инновационная система охлаждения компьютерных процессоров позволяет повысить степень интеграции на несколько порядков, что приведет к увеличению производительности компьютеров и их быстродействию.

Ключевые слова: светоизлучающий, термоэлектрический, полупроводниковый, процессор, эффект Пельтье

POWER-EFFECTIVE THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR HEAT REJECTION FOR COMPUTER PROCESSORS

T.A. Ismailov, H.M. Gadjiev, A.M. Ibragimova

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

Abstract. Objective. The article deals with heat removal from computer processors in order to provide the necessary thermal conditions and temperature control of heat-generating components on integrated circuits. **Methods.** Methods for modeling heat exchange processes during heat transfer from a heated integral crystal to the environment are applied. **Results.** The power efficiency of heat

*rejection processors increases when using radiating thermoelectric semiconductor devices since heat is absorbed in some junctions, and instead of generating heat photons of the ultraviolet range are emitted to obtain better energy characteristics to ensure the necessary power removal from the heat-generating components of radio-electronic circuits. This approach has a significant advantage as radiation has the maximum speed when transferring energy compared to convection and conduction, which allows for non-inertial heat removal from heat-generating components to the environment. This approach also allows increasing the efficiency of the cooling system and accelerating the transfer of heat from the heated areas to prevent heat breakdown. **Conclusion.** The conducted research allows concluding that light-emitting thermoelectric semiconductor devices can be used for cooling with high power efficiency, which can transfer large amounts of power to the environment with low inertia. An innovative cooling system for computer processors allows increasing the degree of integration by several orders of magnitude, which will increase the performance of computers and their speed.*

Keywords: *light-emitting, thermoelectric, semiconductor, processor, Peltier effect*

Введение. Современный этап развития человечества привел к широкому внедрению компьютерных технологий во все области человеческой жизни. Прогресс приводит к повышению степени интеграции компьютерных процессоров и быстродействию. В результате растет уровень тепловых потерь при выполнении логических операций и необходимо паразитное тепло отводить в окружающую среду [1-6, 14-17]. Увеличение степени интеграции для повышения быстродействия компьютерных процессоров приводит к тому, что даже при незначительных тепловыделениях каждого переключающего компонента интегральная совокупность устройства придет к тому, что удельная мощность тепловыделения превышает допустимую.

При выполнении логических операций на компьютерном процессоре возникают ситуации, при которых возможно резкое пиковое увеличение тепловыделений для отдельных компонентов. За счет высокой инерционности процессов кондуктивного теплопереноса излишнее тепло будет накапливаться в районе тепловыделения, что приведет к повышению температуры. В результате может наступить тепловой пробой [11-13, 18-20].

Дополнительную проблему составляют возникающие тепловые сопротивления при переносе тепла от интегрального кристалла через подложку и корпус процессора на систему охлаждения. Существующие системы охлаждения компьютерных процессоров используют воздушное охлаждение при не больших мощностях и водяное охлаждение при больших мощностях тепловыделения компьютерных процессоров.

Для интенсификации процессов теплопереноса целесообразно использовать термоэлектрическое устройство, позволяющее в режиме теплового насоса увеличить теплоперенос от нагретой зоны в окружающую среду. Однако такой подход недостаточен для дальнейшего роста производительности компьютерных процессоров. Увеличение степени интеграции и быстродействия увеличивает на порядки уровень тепловыделений. Главным препятствием для дальнейшего развития современных компьютерных процессоров является инерционность тепловых процессов по кондуктивному переносу и конвективному теплообмену.

Самый эффективный способ теплопереноса по быстродействию и мощности является излучение [7-11]. Процесс излучения основывается на нагреве поверхности и превращении избыточной тепловой энергии в электронные переходы с изменением энергетических состояний с испусканием фотонов соответствующей мощности. Главным препятствием для применения высокоэффективного переноса энергии в виде излучения является необходимость доведения до высоких температур поверхностей, излучающих фотоны. Чем выше температура поверхности, тем большую частоту имеют фотоны и, соответственно, большую мощность.

Постановка задачи. С появлением полупроводниковых компонентов появился еще один способ излучения, основанный на работе р-п-перехода. При переходе электронов из полупроводника n-типа через р-п-переход в полупроводник р-типа электрон может быть рекомбинирован с вакантной дыркой, и избыток энергии может быть излучен виде фотона. Чем больше перепад энергии между полупроводниковыми зонами, тем более мощный получается фотон и

выше его частота. Светодиоды могут испускать фотоны: инфракрасные, красные, оранжевые, жёлтые, зелёные, голубые, синие, фиолетовые и ультрафиолетовые. Выгодным качеством светодиодов является их маленькое сопротивление, что обуславливает малый уровень Джоулевых паразитных тепловыделений.

Если разместить светодиоды последовательно, то на всех полупроводниковых переходах будет происходить излучение, а на всех электродах с противоположной стороны электроны будут поглощать энергию за счёт того, что они будут переходить из полупроводника с меньшей энергетической величиной в полупроводник с большей энергетической величиной.

Таким образом, полупроводниковое устройство, испускающее излучение, способно отводить тепло с малой инерционностью и большой мощностью. Уровень паразитных тепловыделений будет незначительным за счёт того, что р-п-переход имеет малое сопротивление. Дополнительным преимуществом является возможность рекуперировать часть излученной энергии опять в электричество на солнечных полупроводниковых батареях.

Полупроводниковые светодиоды позволяют при невысокой температуре излучающей поверхности получить мощное излучение в широком диапазоне частот. Это делает возможным применить такое устройство для охлаждения нагретого компьютерного процессора. Причём можно интегрировать это устройство в компьютерный кристалл. Обычно компьютерные процессоры охлаждаются при помощи электрических вентиляторов и медных теплопроводов (рис. 1) [11-13, 21].



Рис. 1. Охлаждение компьютерного процессора электрическим вентилятором и медными теплопроводами

Fig. 1. Cooling the computer processor with an electric fan and copper heat conductors

Политическая нестабильность в мире приводит к ужесточению санкций в отношениях между государствами и требует проведения политики импортозамещения. Отечественная промышленность создала два типа мощных компьютерных процессоров. Это процессоры Байкал (рис. 2) и Эльбрус (рис. 3).

Эти процессоры обладают высоким быстродействием и производительностью. Соответственно для их охлаждения потребуется энергоэффективная мощная система. Применение излучающей полупроводниковой системы охлаждения повысит уровень отводимого тепла.



Рис. 2. Процессор Байкал

Fig. 2. Processor Baikal

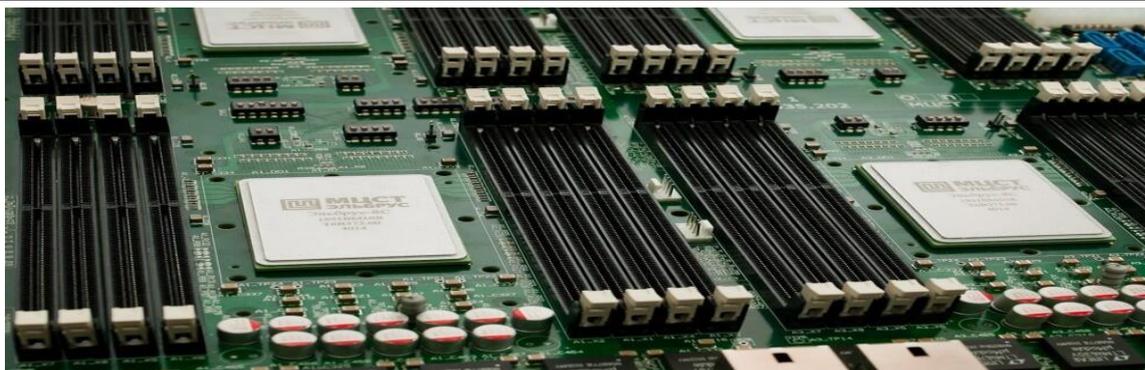


Рис.3. Процессор Эльбрус
Fig. 3. Elbrus processor

Мощность излучения светодиодной матрицы, состоящей из последовательно соединенных диодов, можно определить по формуле (1) как произведение постоянной планка на частоту фотонов и их количество. Количество фотонов определяется из величины тока за единицу времени, делённое на заряд электрона, так как каждый электрон после рекомбинации дает не более одного фотона.

Методы исследования. Подставляя формулу (2) в формулу (1) можно получить формулу (3). При подаче напряжения питания на полупроводниковый охладитель необходимо рассчитать баланс мощностей, приведённый в формуле (4). После преобразования и сокращения будет получена формула (5).

$$P_U = h\nu m \quad (1)$$

$$m = \frac{Jt}{e} \quad (2)$$

$$P_U = \frac{h\nu Jt}{e} \quad (3)$$

$$P = UJ = J^2 R t - J \Pi t - \frac{h\nu Jt}{e} \quad (4)$$

$$U = JRt - \Pi t - \frac{h\nu t}{e} = t \left(JR - \Pi - \frac{h\nu}{e} \right), \quad (5)$$

где P_U - мощность излучения фотонов,
 h - постоянная Планка,
 ν - частота излучения фотонов,
 m - количество излученных фотонов,
 J - величина тока в амперах,
 t - время в секундах,
 e - заряд электрона,
 U - напряжение питания,
 R - сопротивление р-п перехода,
 Π - коэффициент Пельтье.

На рис. 4 приведён график оптимальных характеристик работы термоэлектрического устройства по охлаждению компьютерных процессоров. По графику видно, что уменьшение сопротивления р-п перехода приводит к тому, что оптимальный ток возрастает по величине. Таким образом, применение светодиодов позволяет существенно увеличить оптимальный ток и увеличить степень охлаждения. При этом будет возрастать уровень излучения, и большая часть энергии может быть возвращена для питания системы охлаждения.

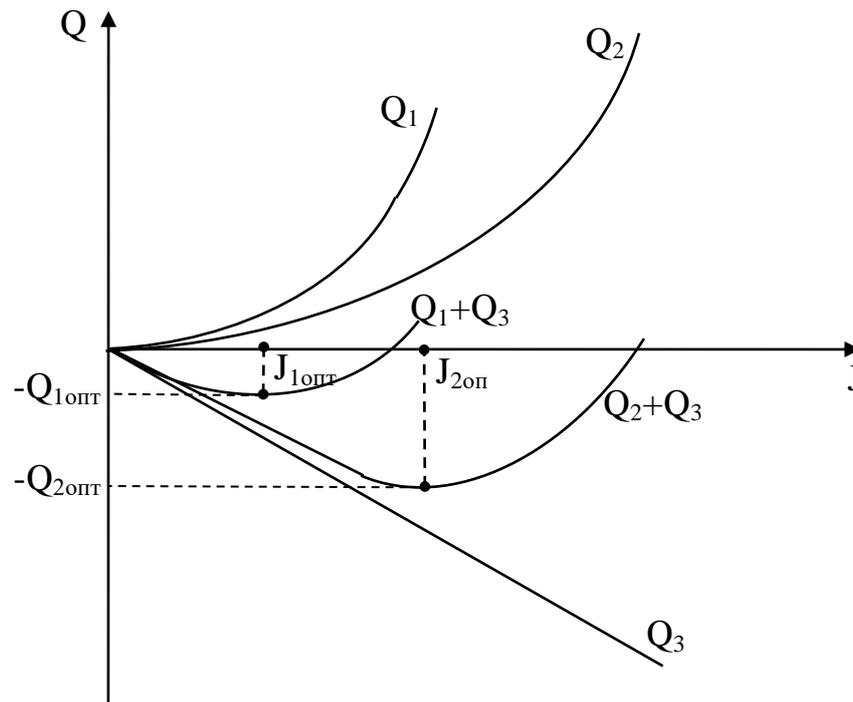


Рис.4. Зависимость количества теплоты Джоуля (Q_1 и Q_2) и Пельтье (Q_3), поступающей на холодный спай от тока (J),

Fig.4. Dependence of the amount of heat Joule (Q_1 and Q_2) and Peltier (Q_3) supplied to the cold junction on the current (J),

где: Q – теплота, приходящая на холодный спай термоэлемента, Q is the heat arriving at the cold junction of the thermoelement,

Q_1 – кривая теплоты Джоуля обычного термоэлектрического полупроводникового устройства, is the Joule heat curve of a conventional thermoelectric semiconductor device,

Q_2 – кривая теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства, Joule heat curve of a radiating thermoelectric semiconductor device,

Q_3 – кривая теплоты Пельтье, Peltier heat curve,

$-Q_{1\text{опт}}$ – оптимальное количество теплоты для обычного термоэлектрического полупроводникового устройства при оптимальном токе питания, the optimal amount of heat for a conventional thermoelectric semiconductor device at an optimal supply current,

$-Q_{2\text{опт}}$ – оптимальное количество теплоты для излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства при оптимальном токе питания, the optimal amount of heat for a radiating thermoelectric semiconductor device at an optimal supply current,

Q_1+Q_3 – сумма теплоты Джоуля обычного термоэлектрического полупроводникового устройства и теплоты Пельтье, is the sum of the Joule heat of a conventional thermoelectric semiconductor device and the Peltier heat,

Q_2+Q_3 – сумма теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства и теплоты Пельтье, is the sum of the Joule heat of the radiating thermoelectric semiconductor device and the Peltier heat,

J – ток питания, supply current,

$J_{1\text{опт}}$ – оптимальный ток питания обычного термоэлектрического полупроводникового устройства, $J_{1\text{опт}}$ the optimal supply current for a conventional thermoelectric semiconductor device,

$J_{2\text{опт}}$ – оптимальный ток питания излучающего термоэлектрического полупроводникового устройства, is the optimal supply current for the emitting thermoelectric semiconductor device.

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований становится очевидным, что применение светоизлучающих термоэлектрических полупроводниковых устройств для охлаждения позволяет повысить мощности, отводимые энергии от тепловыделяющих компонентов компьютерных процессоров, и увеличить скорость охлаждения.

При этом точность термостатирования возрастает за счет увеличения быстродействия реакции системы охлаждения на возможные режимы термостатирования, в том числе нестационарные процессы.

Чем выше частота излучения фотонов, тем большую мощность они могут отвести. Чем меньше сопротивление р-n переходов светодиодов, тем больше ток для оптимального значения охлаждения. Применение инновационной системы охлаждения позволит увеличить степень интеграции компьютерных процессоров и ускорить выполняемые ими операции. Для отечественных типов процессоров применение светоизлучающих устройств позволит реализовать энергоэффективные режимы работы.

Вывод. Перенос тепла от компьютерных процессоров в виде излучения обладает большими преимуществами по сравнению с конвекцией и кондукцией. Часть излучения может быть рекуперирована для повышения энергоэффективности работы термоэлектрического полупроводникового охладителя в целом. Применение светотранзисторов при проектировании отечественных компьютерных процессоров позволит уменьшить тепловые выделения и реализовать криоэлектронные режимы работы вплоть до возникновения сверхпроводящих режимов. Надежность работы компьютерных процессоров будет значительно увеличена как при стационарных режимах, так и при нестационарных режимах работы.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386с.
2. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. 149 с.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. Москва: «Академия», 2012. 136 с.
6. Патент РФ №2156424. Термоэлектрический полупроводниковый теплообменник / Исмаилов Т.А., Магомедов К.А., Гаджиева С.М., Мурадова М.М., опубл. 20.09.2000.
7. Патент РФ на изобретение №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 20.02.2014.
8. Патент РФ на изобретение №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 01.06.2009.
9. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
10. Патент РФ на изобретение №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А., опубл. 20.02.2014.
11. Патент РФ, №2360380. Устройство для термостатирования компьютерного процессора / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., опубл. 27.06.2009.
12. Патент РФ №2208830. Терморегулирующее устройство для обеспечения минимальных тепловых напряжений в режимах включения и выключения ЭВМ / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., опубл. 20.07.2003.
13. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Применение многокаскадных термоэлектрических модулей для охлаждения процессора компьютера/ Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2004. Т. 47 №7. С.25-29.
14. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.
15. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (англ.). gizmag.com (25 July 2014). Дата обращения 6 июня 2016.
16. Jamri, M.S. Modeling and control of a photovoltaic energy system using the state-space averaging technique / M.S.Jamri, T.C.Wei // American Journal of Applied Science. 2010. №7. pp.682-691.
17. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010. pp. 152.
18. Ramabadran, R. Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern applied science. -2010.- Vol.3. No.10. pp.32-41.

19. Single-wire dye-sensitized solar cells wrapped by carbon nanotube film electrodes / S. Zhang, C. Ji, Z. Bian et al. // Nano Lett. 2011. Vol. 11. pp. 3383-3387.
20. Synopsys' Sentaurus TCAD Used to Simulate Solar Cell Performance Characteristics at NREL: Электронный ресурс. (<http://synopsys.mediaroom.com/index.php?s=43&item=737>). Проверено 28.11.2010.
21. Znajdek, K. Review of simulation models suitability for characterization of actual Si PV cells / K.Znajdek // XII International PhD Workshop OWD 2010. pp. 423-425.

References:

1. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003. 386p.
2. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. - SPb.: Politehnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - SPb.: Polytechnic, 2005. (In Russ)]
3. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTS DGTU, 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilization of microelectronic equipment using semiconductor thermoelectric devices. - Makhachkala: IPC DSTU, 2013. 149 p. (In Russ)]
4. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye. Makhachkala: IPTS DGTU, 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Hajiyev H.M. Cooling of radio electronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPC DSTU, 2012. 165 p. (In Russ)]
5. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye teplovydelyayushchikh komponentov mikroelektronnoy tekhniki. Moskva: «Akademiya», 2012. 136 [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Thermoelectric cooling of heat-generating components of microelectronic technology. Moscow: "Academy", 2012. 136 p. (In Russ)]
6. Patent RF №2156424. Termoelektricheskiy poluprovodnikovyy teploobmennik / Ismailov T.A., Magomedov K.A., Gadzhiev S.M., Muradova M.M., opubl. 20.09.2000. [RF patent No. 2156424. Thermoelectric semiconductor heat exchanger / Ismailov T.A., Magomedov K.A., Gadzhiev S.M., Muradova M.M., publ. 09/20/2000. (In Russ)]
7. Patent RF na izobreteniyе №2507613. Kaskadnoye svetoizluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for invention №2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina T.A., publ. 02/20/2014. (In Russ)]
8. Patent RF na izobreteniyе №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov v vide izlucheniya / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 01.06.2009. [RF patent for invention №2405230. Method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov TD, Chelushkina T.A., publ. 01.06.2009. (In Russ)]
9. Patent RF №2487436. Svetotranzistor/ Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Opubl. 10.07.2013. [RF patent №2487436. Svetotransistor / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Publ. 10.07.2013. (In Russ)]
10. Patent RF na izobreteniyе №2507632. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviyem / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov SH.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for invention №2507632. Light transistor with high speed / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A., publ. 02/20/2014. (In Russ)]
11. Patent RF, №2360380. Ustroystvo dlya termostatirovaniya komp'yuternogo protsessora / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., opubl. 27.06.2009. [RF patent, No. 2360380. A device for thermostating a computer processor / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhiev S.M., Nezhvedilov T.D., publ. 27.06.2009. (In Russ)]
12. Patent RF №2208830. Termoreguliruyushcheye ustroystvo dlya obespecheniya minimal'nykh teplovykh napryazheniy v rezhimakh vklyucheniya i vyklyucheniya EVM / Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D., opubl. 20.07.2003. [RF patent №2208830. Thermoregulating device for ensuring minimum thermal stresses in the modes of switching on and off the computer / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov TD, publ. 20.07.2003. (In Russ)]
13. Ismailov T.A., Gadzhiev KH.M., Nezhvedilov T.D. Primeneniye mnogokaskadnykh termoelektricheskikh moduley dlya okhlazhdeniya protsessora komp'yutera/ Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. - 2004. T. 47 №7. C.25-29. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. The use of multistage thermoelectric modules for cooling the computer processor/Bulletin of higher educational institutions. Instrumentation. 2004. Vol. 47 No. 7. pp. 25-29. (In Russ)]
14. Bloomberg New Energy Finance Tier 1 module maker list, Q2 2016.

15. David Szondy. Stanford researchers develop self-cooling solar cells. (English). gizmag.com (25 July 2014). Date of treatment June 6, 2016.
16. Jamri, M.S. Modeling and control of a photovoltaic energy system using the state-space averaging technique / M.S. Jamri, T.C. Wei // American Journal of Applied Science. 2010. No. 7. pp. 682-691.
17. Frolkov O.A. // 13 International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010. p. 152.
18. Ramabadran, R. Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern applied science. 2010. Vol.3. No.10. pp. 32-41.
19. Single-wire dye-sensitized solar cells wrapped by carbon nanotube film electrodes / S. Zhang, C. Ji, Z. Bian et al. // Nano Lett. 2011. Vol. 11. pp. 3383-3387.
20. Synopsys' Sentaurus TCAD Used to Simulate Solar Cell Performance Characteristics at NREL: Electronic resource. (<http://synopsys.mediaroom.com/index.php?s=43&item=737>). Retrieved 28.11.2010.
21. Znajdek, K. Review of simulation models suitability for characterization of actual Si PV cells / K. Znajdek // XII International PhD Workshop OWD 201, pp. 423-425.

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

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

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: ibrasya@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

Hadzhimurat M. Gadzhiev, Cand.Sci (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Asiyat M. Ibragimova, Applicant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: ibrasya@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.08.2020.

Принята в печать 10.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.08.2020.

Accepted for publication 10.09.2020.

Для цитирования А.В. Месропян, Е.А. Платонов, Р.Р. Рахматуллин. Моделирование рабочих процессов водоходного движителя паромно-мостовой машины ПММ-2М. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (3):16-25. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-16-25

For citation: A.V. Mesropyan, E.A. Platonov, R.R. Rakhmatullin. Modeling working processes of the marine thruster of the PMM-2M ferry-bridge machine. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(3):16-25. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-16-25

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

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-16-25

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВОДОХОДНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПАРОМНО-МОСТОВОЙ МАШИНЫ ПММ-2М

А.В. Месропян, Е.А. Платонов, Р.Р. Рахматуллин

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

Резюме. Цель. В статье рассматриваются аспекты моделирования рабочих процессов, протекающих в водоходных движителях амфибийных машин, с учетом специфики их эксплуатации. **Метод.** Применены методы трехмерного моделирования гребных винтов в САД- и САЕ- пакетах, способные с достоверной точностью определять и оптимизировать параметры протекающих рабочих процессов. **Результат.** Предложен математический аппарат, позволяющий рассчитывать характеристики водоходных движителей машин-амфибий. Спроектирован гребной винт, обеспечивающий большую тягу по сравнению с исходной конструкцией, позволяющий увеличить скорость движения по воде и уменьшить радиус циркуляции при движении по воде. Рассчитанный вариант гребного винта обеспечивает повышение тяги на 36%, позволяет развить большую скорость движения по воде и значительно снизить радиус циркуляции паромно-мостовой машины при маневрировании на воде. **Вывод.** Предложенный вариант увеличения скорости движения и маневренности на воде паромных машин является наиболее эффективным и наименее затратным; перспективным направлением дальнейших исследований для достижения максимальной эффективности является создание и верификация программно-аппаратных и методических комплексов для моделирования совместной работы системы «водоходный движитель – корпус – силовая установка».

Ключевые слова: паромно-мостовая машина, гребной винт в кольцевой насадке, водоходный движитель, машина-амфибия, кольцевая насадка, моделирование рабочих процессов

MODELING WORKING PROCESSES OF THE MARINE THRUSTER OF THE PMM-2M FERRY-BRIDGE MACHINE

A. V. Mesropyan, E. A. Platonov, R. R. Rakhmatullin

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

Abstract. Objective. The article deals with aspects of modeling the working processes occurring in marine thrusters of amphibious vehicles, taking into account the specifics of their operation. **Methods.** The methods of 3D modeling of propellers in CAD and CAE packages are applied, which can determine and optimize the parameters of ongoing work processes with reliable accuracy. **Results.** A mathematical construct is proposed that allows calculating the characteristics of marine thrusters of amphibious vehicles. The propeller is designed to provide more thrust compared to the original design, making it possible to increase the speed of movement on the water and reduce the radius of circulation when moving through the water. The calculated version of the propeller provides

an increase in thrust by 36%, allows developing a high speed on the water, and significantly reduces the radius of circulation of the ferry-bridge machine when maneuvering on the water. **Conclusion.** The proposed option for increasing the speed and maneuverability of ferry vehicles on the water is the most effective and least expensive; a promising direction for further research to achieve maximum efficiency is the creation and verification of software, hardware, and methodological complexes for modeling the joint operation of the "marine thruster – hull – power plant" system.

Keywords: ferry-bridge machine, propeller in a ring nozzle, marine thruster, amphibious vehicle, ring nozzle, working processes modeling

Введение. Совершенствование и глубокая модернизация паромной техники, разработанной на рубеже 70-80-х гг. прошлого века и до сих пор используемой в МЧС, инженерно-технических подразделениях МО, предопределяют актуальность работ, направленных на безусловное обеспечение повышенных требований и энергоэффективности водоходных движителей, применяемых в схемных решениях паромно-мостовой техники, паромов, машин-амфибий и т.д. Выполнение подобных работ неразрывно связано с моделированием рабочих процессов, сопровождающих функционирование водоходных движителей, при этом должна учитываться специфика эксплуатации подобной техники, используемые технологии ремонта и обслуживания, а также ограничения, связанные с обеспечением бескавитационной работы водоходных движителей и требуемыми прочностными и ресурсными характеристиками узлов и агрегатов.

Постановка задачи. Объектом исследования является паромно-мостовая машина ПММ-2М (рис. 1). Согласно паспортным данным, скорость, развиваемая данной ПММ с нагрузкой на воде, составляет 10 км/ч [1]. К специфике конструктивно-компоновочного решения относится труднообтекаемый корпус и наличие выступающего за пределы корпуса гусеничного движителя, что, в совокупности, обуславливает большое сопротивление движению при преодолении водной преграды.



Рис. 1. Паромно-мостовая машина ПММ-2М в походном положении
Fig. 1. Ferry-bridge machine PMM-2M in the stowed position

Повышение скоростных характеристик можно обеспечить несколькими путями: изменение параметров водоходного движителя, уменьшение сопротивления паромной техники за счет изменения обводов корпуса машины в сочетании повышением мощностных характеристик двигателя. Наиболее перспективным и наименее затратным является вариант модернизации водоходного движителя.

Методы исследования. Параметры водоходного движителя определяются с учетом полного сопротивления и буксировочной мощности корпуса ПММ [2 - 4] на основе исходных данных, к которым относятся габаритные размеры и значение осадки ПММ (табл.1).

Таблица 1. Исходные данные для расчета параметров водоходного движителя
Table 1. Initial data for calculating the parameters of the water propulsion

Наименование параметра Parameter name		Значение параметра Parameter value
Длина, L , м Length, L , m	Основной корпус Main body	12,4
	Левый понтон Left pontoon	12,1
	Правый понтон Right pontoon	11,8
Ширина, B , м Width, B , m	Основной корпус Main body	3,36
	Левый понтон Left pontoon	3,36
	Правый понтон Right pontoon	3,36
Осадка с грузом 42,5 т, T , м Draft with a load of 42.5 t, T , m	Основной корпус Main body	1,8
	Левый понтон Left pontoon	0,62
	Правый понтон Right pontoon	0,62

Величину смоченной поверхности корпуса ПММ необходимо определять с наиболее возможной точностью, поскольку сопротивление движению изменяется прямо пропорционально величине смоченной поверхности, при этом очевидно, что поверхность подводной части данной машины нельзя представить в виде явной функции от координат, вычислить её площадь аналитически невозможно, поэтому для вычисления смоченной поверхности необходимо применять приближённые методы расчета.

Площадь смоченной поверхности без учета выступающих элементов определяется по зависимости (1):

$$\Omega = 2 \frac{L}{n} \sum_{i=0}^n \left(l_i - \frac{l_0 - l_n}{2} \right), \quad (1)$$

где L – длина паррома; n – число теоретических шпангоутов; l – полудлина спрямленного теоретического шпангоута

Данная формула не учитывает влияния продольной кривизны обводов корпуса машины на величину смоченной поверхности, но это влияние незначительно (примерно $1 \div 1,15\%$), поэтому никаких поправок в расчёт не вводится. Результаты расчета сведены в табл.2.

Таблица 2. Расчет площади смоченной поверхности
Table 2. Calculation of wetted surface area

№ сече- ния Section No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ	Поправка Amendment	$\Sigma_{\text{исп}}$	Ω
$T_1=1,8$ ОК	-	1,33	2,35	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,69	2,52	2,18	26,11	2,875	23,23	83,9
$T_2=0,62$ ПП	-	1,34	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	20,09	2,875	17,22	33,1
$T_3=0,62$ ЛП	-	-	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	18,75	2,875	15,87	33,1

Таким образом, суммарная площадь смоченной поверхности:

$$\Omega = \sum \Omega_1 \Omega_2 \Omega_3 = 83,9 + 33,08 + 33,08 = 150,073 \text{ м}^2 .$$

Для верификации значения смоченной поверхности, полученной путем расчета по формуле (1), предложена трехмерная модель ПММ-2М с отсечением плоскостью, расположенной на уровне ватерлинии при нулевом дифференте, для определения площади смоченной поверхности корпуса.

Смоченная поверхность, определенная в ПК КОМПАС 3D, составила 158 м² (рис. 2). Сходимость результатов расчета составила 95%.

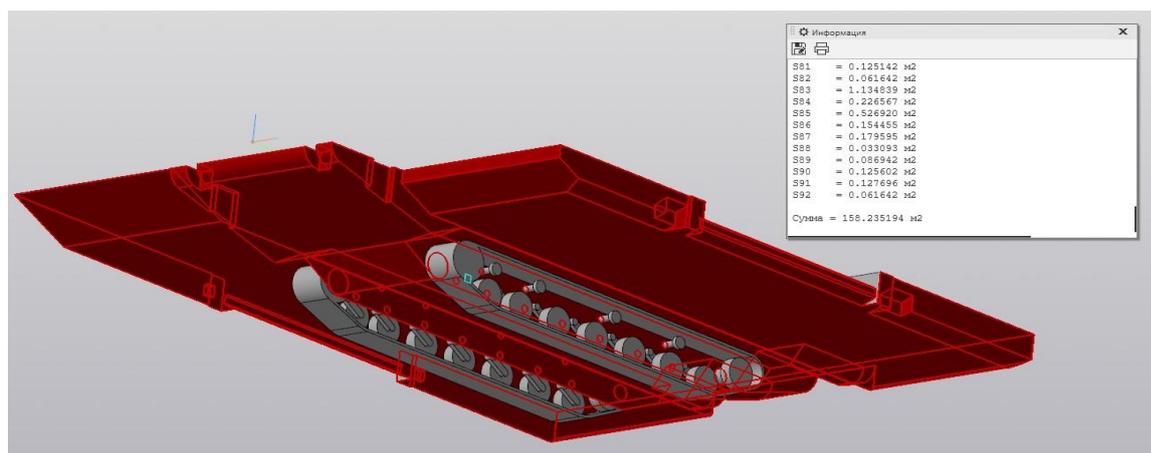


Рис. 2. Площадь смоченной поверхности, определенная в ПК КОМПАС-3D

Fig. 2. The Wetted surface area determined in the KOMPAS-3D PC

Суммарная площадь смоченной поверхности необходима для расчета полного сопротивления корпуса машины, включающего сопротивление трения и сопротивление давлений.

Сопротивление трения обусловлено влиянием вязкости жидкости и рассчитывается с учётом состояния поверхности корпуса машины. Оно включает также влияние неидеальности, с точки зрения судостроения, поверхности корпуса машины. Одним из главных участков сопротивления на ПММ является наличие полностью погруженных гусеничных движителей. Учитывая, что сопротивление трения и сопротивление формы обусловлены вязкостью, они могут быть объединены в одну составляющую, которую принято называть вязкостным сопротивлением.

Разделение полного сопротивления на сопротивление давлений и сопротивление трения основано на учёте физического различия элементарных сил, действующих на поверхность машины. В данном случае, из-за недостаточности полных сведений сопротивления сложных обводов данной машины (корпусные детали, покраска, не предназначенная для минимального сопротивления поверхности, выступающие гусеницы и т.п.) ими пренебрегается с учетом дальнейшей возможной поправки по геометрии корпуса ПММ.

Расчет полного сопротивления и буксировочной мощности рассчитывается на основе диаграмм серийных испытаний моделей судов с возможными поправками на геометрию паромно-мостовой машины.

Для расчёта полного сопротивления движению судна следует рассчитать соответствующие заданным скоростям коэффициенты сопротивления трения, ввести поправочные коэффициенты на шероховатость и на наличие выступающих частей корпуса. Сумма этих коэффициентов и коэффициента остаточного сопротивления определяет коэффициент полного сопротивления рассматриваемого корпуса паромы, используемый далее для расчета полного сопротивления корпуса ПММ и буксировочной мощности для случая движения на тихой воде.

При расчете данных параметров, применимых к обводам корпуса ПММ-2М, используется приближение в расчетах дебаркадеров и сложных форм плавучих земснарядов, однако необ-

ходимо учитывать, что поскольку скоростной параметр для судов подобного типа не имеет смысла, они никогда не испытывались в аэродинамической трубе и испытательном бассейне. Это, в свою очередь, не позволяет оценить степень адекватности существующих методик реальным объектам.

Расчет полного сопротивления корпуса ПММ включает в себя определение числа Фруда, поправочных коэффициентов, учитывающих тип судна, числа Рейнольдса, коэффициентов трения, сопротивления трения, остаточного сопротивления, полного сопротивления и буксировочной мощности.

Результаты расчета зависимости полного сопротивления корпуса ПММ от скорости движения на воде $R_x = f(V_s)$ при постоянном значении осадки представлены на рис. 3.

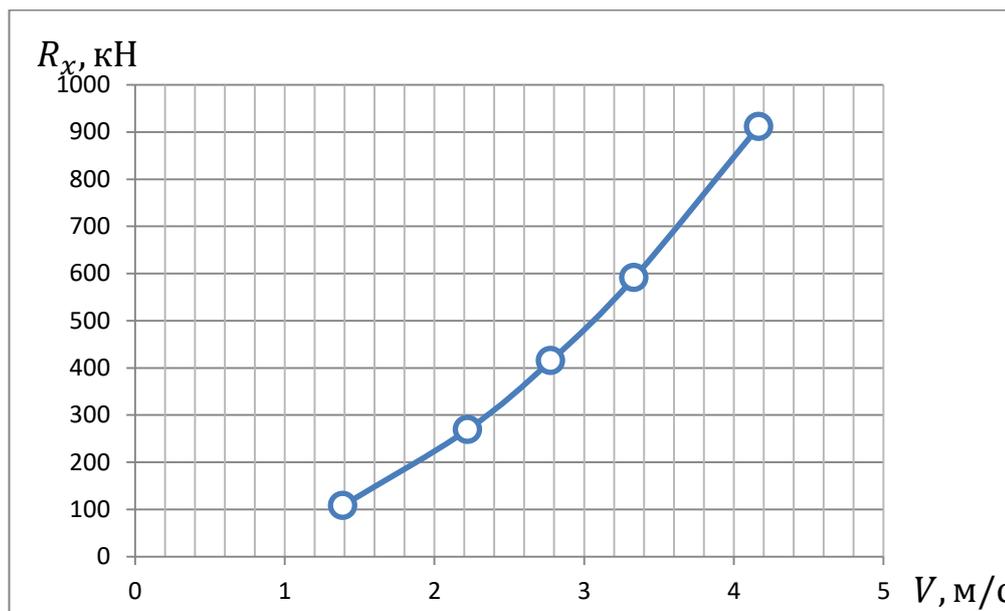


Рис. 3. Зависимость полного сопротивления парама от скорости движения на воде

Fig. 3. Dependence of the ferry impedance on the speed of movement on water

Следует отметить, что расчет сопротивления корпуса и буксировочной мощности проводился по методикам, предложенным для судов с обтекаемыми формами подводной части корпуса. Значение большинства коэффициентов, определяемых из диаграмм (коэффициент, учитывающий влияние относительной длины $\psi = L/\sqrt[3]{V}$, коэффициента продольной полноты $\phi = \delta/\beta$, отношение ширины к осадке B/T), приходится экстраполировать, что дает существенную погрешность в определении искомых параметров. Для получения более точных значений сопротивления корпуса необходимо применять специализированные САЕ-пакеты, такие как *Ansys* (модули *CFX* и *Fluent*), *FlowSimulation*, *FlowVision* и т.д. [5-12].

По полученным данным значения сопротивления корпуса ПММ в соответствии с известными методиками [13-17] определяются параметры водоходного движителя, проводится профилирование лопастей винта и строится его трехмерная твердотельная модель. Результат расчета гребного винта представлен в виде трехмерной модели (рис. 4 а).

На тяжелой водоизмещающей машине трудно получить высокий КПД гребного винта, если он приводится от сравнительно высокооборотного двигателя. Винт в этих случаях работает с большим скольжением и не развивает необходимый упор. Установка кольцевой насадки позволяет решить эту проблему и повысить скорость судна на 5-8%. При скоростях около 20 км/ч установка насадки нецелесообразна, поскольку резко возрастает сопротивление. Проектная скорость ПММ составляет порядка 12 км/ч, соответственно, применение насадки на данной технике целесообразно и актуально, поскольку она является хорошей защитой гребного винта от повреждений и, благодаря постоянному заполнению водой, не позволяет ему обнажаться при килевой качке. Трехмерная твердотельная модель спроектированной насадки совместно с гребным винтом представлена на рис. 4 б.

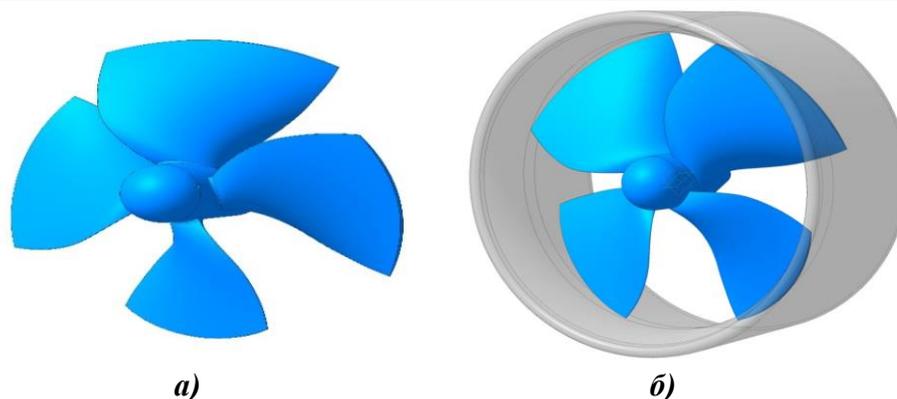


Рис. 4. Трехмерная CAD-модель гребного винта:
a – гребной винт; б – гребной винт в кольцевой насадке
Fig. 4. Three-dimensional CAD-model of the propeller:
a - propeller; b - propeller in an annular nozzle

Построенные трехмерные модели необходимы для моделирования рабочих процессов, протекающих в гребном винте с насадкой, в ПК *Ansys* [18-20]. Строится расчетная область течения рабочего тела, и далее в модуле *Mesh* расчетная область разбивается на сетку, состоящую из тетраэдрических элементов, количеством 3,8 млн. ячеек (рис. 5).

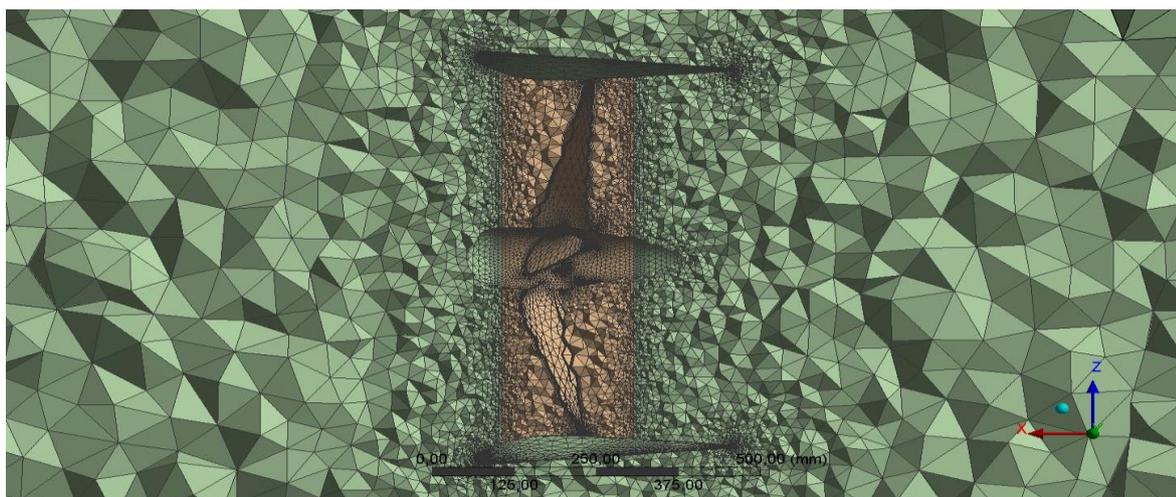


Рис. 5. Общий вид КЭ модели расчетной области в разрезе
Загущение сетки в районе гребного винта увеличено
Fig. 5. Sectional view of the finite element model of the computational domain
Propeller mesh thickening increased

В модуле *CFX-Pre* расчетная модель настроена со следующими параметрами:

- плотность воды $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$;
- динамическая вязкость $\mu=0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- моделирование течения через гребной винт проводится в режиме *Frozen Rotor*;
- расчеты проводятся при стандартных атмосферных условиях: $p=101325 \text{ Па}$, $T=288\text{К}$;
- в расчетах используется модель турбулентности *k- ϵ* .

Расчет гребного винта в кольцевой насадке в процессоре *CFX-Solver* проводится до получения погрешности не более 10^{-5} по каждому из гидродинамических параметров (скорость, давление, массовый расход, параметры турбулентности).

Результаты расчета представлены на рис. 6–8.

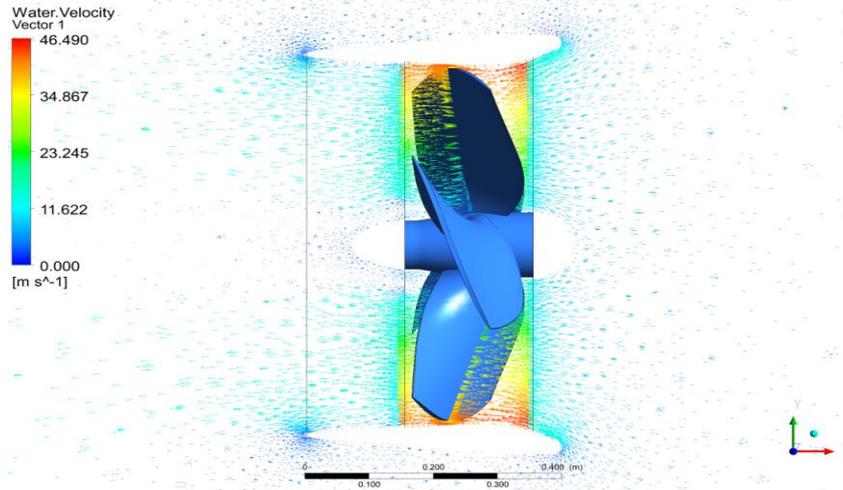


Рис. 6. Вектора скорости в проточной части водоходного движителя
Fig. 6. The velocity vector in the flow part of the water propulsion device

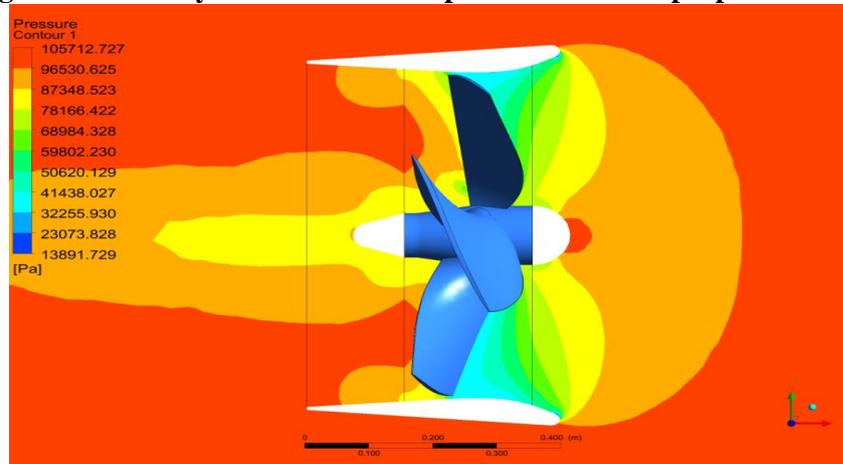


Рис. 7. Эпюра распределения давлений в проточной части водоходного движителя
Fig. 7. Diagram of the distribution of pressures in the flow part of the water propulsion

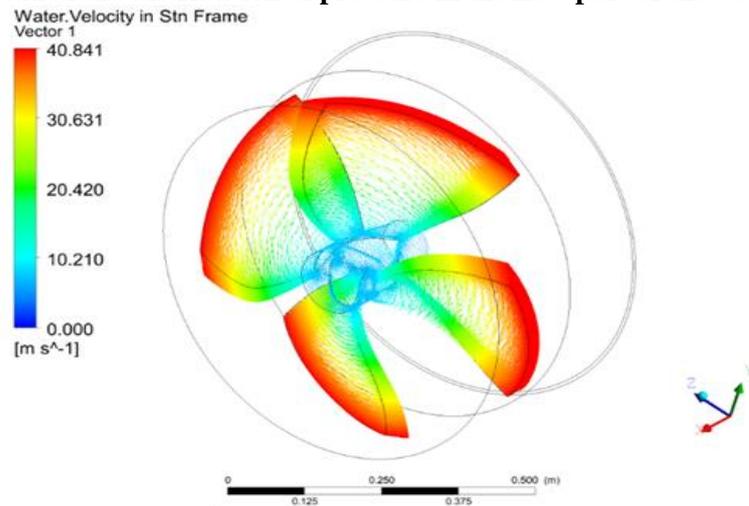


Рис. 8. Вектора скорости на поверхности лопастей гребного винта
Fig. 8. Speed vectors on the surface of the propeller blades

Обсуждение результатов. Анализ результатов численного моделирования позволяет получить представление о процессах и явлениях, протекающих в водоходном движителе паромной машины, и определять возможные направления параметрической оптимизации водоходных движителей. По направлению векторов скоростей можно судить о безотрывном тече-

нии рабочего тела в проточной части водоходного движителя, а по картине распределения давлений – о нагрузках, действующих на определенные элементы конструкции водоходного движителя.

Предлагаемый вариант математической модели позволяет рассчитывать параметры водоходного движителя для ПММ с учетом специфики эксплуатации данной техники. Рассчитанный вариант гребного винта обеспечивает повышение тяги на 36%, позволяет развить большую скорость движения по воде и значительно снизить радиус циркуляции ПММ при маневрировании на воде.

Вывод. Параметрическая оптимизация водоходных движителей для увеличения скорости движения, маневренности на воде и создаваемой тяги является наименее затратным и наиболее эффективным для эксплуатантов подобной техники вариантом, при этом, необходимо отметить, что создание, верификация и апробация методик по совместному расчету элементов «корпус-водоходный движитель-силовая установка» позволят обеспечить синергетический эффект для существенного повышения скоростных и маневренных характеристик судов подобного типа и сформировать научно-технический задел для создания перспективных образцов паромной техники российского производства.

Библиографический список:

1. Степанов А. П. Инженерные переправочно-десантные средства СССР и России // Техника и вооружение: вчера, сегодня, завтра. 2001. №10. С. 1-13.
2. Антоненко С. В. Судовые движители: учебное пособие. – Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2007. 126 с.
3. Емельяненко Н. Ф. Ходкость водоизмещающих морских судов: учебное пособие. – Владивосток. Из-во Дальрыбвтуз, 2004. 249 с.
4. Веретенников А. И. Особенности расчета сопротивления движению боевой колесной машины на плаву / А. И. Веретенников, Ю. М. Мушинский, А. В. Нефёдов // Механіка та машинобудування. 2009. №2. С. 11-16.
5. 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.
6. 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.
7. Simulation of amphibious vehicle water resistance based on fluent / Xiaochun Pan, et. al. // International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications. 2015. pp. 485-489.
8. Филатов В. В. Гидродинамическое исследование перспективной быстроходной амфибийной машины малого класса // Вестник гражданских инженеров. 2017. №2 (61). С. 219-223.
9. 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.
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. Хейфец Л. Л. Гребные винты для катеров – 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1980. 200с.
14. Басин А. М. Руководство по расчету и проектированию гребных судов внутреннего плавания. Л.: Из-во «Транспорт», 1977. 269 с.
15. Степанов А. П. Проектирование амфибийных машин. М.: Мегалион, 2007. 420 с.
16. Король Ю. М. Моделирование работы гребного винта в насадке в косом набегающем потоке / Ю. М. Король, А. С. Бражко // Збірник наукових праць нук. 2013. №1. С. 30-36.
17. Мартиросов Г. Г. Проектирование водоходных движителей с гребными винтами для амфибийных машин. М.: МАДИ, 2006. 87 с.
18. Абдулин А. Я. Особенности численного моделирования рабочего процесса водометных движителей / А. Я. Абдулин, А. В. Месропян // Вестник УГАТУ. 2013. №3 (56). С. 130-137.
19. Ghassemi H. Calculations of the Hydrodynamic Characteristics of a Ducted Propeller Operating in Oblique Flow / H. Ghassemi, S. Majdfar, H. Foroudzan // Ship Science & Technology. 2017. Vol. 10, No. 20. Pp. 31-40.

20. Ghassemi H. Hydrodynamic prediction of the ducted propeller by CFD solver / H. Ghassemi, S. Majdfar, H. Foroudzan, A. Ashrafi // *Journal of Marine Science and Technology*. 2017. Vol. 25, No. 3. pp. 268-275.

References:

1. Stepanov A. P. Inzhenernye perepravochno-desantnye sredstva SSSR i Rossii // *Tekhnika i vooruzhenie: vchera, segodnya, zavtra*. 2001. №10. s. 1-13. [Stepanov A. P. Engineering ferry and landing equipment of the USSR and Russia // *Equipment and weapons: yesterday, today, tomorrow*. 2001. No. 10. pp. 1-13. (In Russ.)]
2. Antonenko S. V. Sudovye dvizhiteli: uchebnoe posobie. Vladivostok: Iz-vo DVG TU, 2007. 126 s. [Antonenko S.V. Ship movers: a training manual. Vladivostok: Because of DVG TU, 2007. 126 p. (In Russ.)]
3. Emel'yanenko N. F. Hodkost' vodoizmeshchayushchih morskikh sudov: uchebnoe posobie. – Vladivostok. Iz-vo Dal'rybvuz, 2004. 249 s. [Emel'yanenko N. F. The propulsion of displacement ships: a training manual. - Vladivostok. Because of Dal'rybvuz, 2004 . 249 p. (In Russ.)]
4. 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.)]
5. 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.
6. 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.
7. Simulation of amphibious vehicle water resistance based on fluent / Xiaochun Pan, et. al. // *International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications*. 2015. pp. 485-489.
8. Filatov V. V. Gidrodinamicheskoe 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.)]
9. Hrenov I. O. Metod rascheta sily soprotivleniya dvizheniyu na vode amfibijnyh kolesnyh i gusenichnyh mashin s ispol'zovaniem programmnoho 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.)]
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. Hejfec L. L. Grebnye vinty dlya katerov – 2-e izd., pererab. i dop. L.: Sudostroenie, 1980. 200s. [Kheifets L. L. Propellers for boats - 2nd ed., Revised. and add. L. : Shipbuilding, 1980. 200 p. (In Russ.)]
14. Basin A. M. Rukovodstvo po raschetu i proektirovaniyu grebnyh sudov vnutrennego plavaniya. L.: Iz-vo «Transport», 1977. 269 s. [Basin A.M. Guidelines for the calculation and design of rowing inland navigation vessels. L. : Publishing house of the Transport, 1977. 269 p. (In Russ.)]
15. Stepanov A. P. Proektirovanie amfibijnyh mashin – M.: Megalion, 2007. 420 s. [Stepanov A.P. Design of amphibious machines - M. : Megalion, 2007. 420 p. (In Russ.)]
16. Korol' YU. M. Modelirovanie raboty grebnogo vinta v nasadke v kosom nabegayushchem potoke / YU. M. Korol', A. S. Brazhko // *Zbirnik naukovih prac' nuk*. 2013. №1. S. 30-36. [Korol' Yu. M. Modeling the operation of the propeller in the nozzle in an oblique oncoming flow / Yu. M. Korol, A. S. Brazhko // *Zbirnik naukovykh prats' nuk*. 2013. No 1. pp. 30-36. (In Russ.)]
17. 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.)]
18. Abdulin A. YA. Osobennosti chislennogo modelirovaniya rabocheho processa vodometnyh dvizhitelej / A. YA. Abdulin, A. V. Mesropyay // *Vestnik UGATU*. 2013. №3 (56). S. 130-137. [Abdulin A. Ya. Features of the numerical modeling of the working process of water-jet propulsors / A. Ya. Abdulin, A.V. Mesropyay // *Bulletin of USATU*. 2013. No3. (56). pp. 130-137. (In Russ.)]

19. Ghassemi H. Calculations of the Hydrodynamic Characteristics of a Ducted Propeller Operating in Oblique Flow / H. Ghassemi, S. Majdfar, H. Foroudzan // *Ship Science & Technology*. 2017. Vol. 10, No. 20. pp. 31-40.
20. Ghassemi H. Hydrodynamic prediction of the ducted propeller by CFD solver / H. Ghassemi, S. Majdfar, H. Foroudzan, A. Ashrafi // *Journal of Marine Science and Technology*. 2017. Vol. 25, No. 3. pp. 268-275.

Сведения об авторах:

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

Платонов Евгений Александрович, оператор ЭВМ, кафедра прикладной гидромеханики;
e-mail: elacom@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

Evgenij A. Platonov, computer's operator Department of Applied Hydromechanics;
e-mail: elacom@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 06.07.2020.

Принята в печать 10.08.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 06.07.2020.

Accepted for publication 10.08.2020.

Для цитирования: А.В. Шакуров, Л.М. Колышкин, Н.А. Андреев. Состояние и перспективы развития технического обеспечения криотерапевтического воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020;47 (3):26-38. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-26-38

For citation: A.V. Shakurov, L.M. Kolyshkin, N.A. Andreev. State and prospects of development of technical support for cryotherapy treatment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;47(3):26-38.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-26-38

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

УДК: 621.565.82

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-26-38

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.В. Шакуров, Л.М. Колышкин, Н.А. Андреев

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет)»,
105005, г. Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1, Россия

Резюме. Цель. Общее криотерапевтическое воздействие на тело человека охлаждающим газом (ОГКВ) – физиотерапевтический метод, положительный эффект которого доказан более чем 40 годами использования (в том числе и в России, является одним из лидеров в данной области). Целью исследования являлась оценка перспектив развития технического обеспечения криомедицинского воздействия на органы человека. **Метод.** В работе представлены обзор и анализ текущего состояния технического обеспечения данного криометода. **Результат.** Показаны перспективы развития метода и направления для совершенствования оборудования. Отмечается, что развитие ОГКВ ограничивают, в первую очередь, недостаточная точность проведения криовоздействий и относительно высокая их стоимость. **Вывод.** Низкотемпературное терапевтическое оборудование потенциально может располагаться не только в медицинских, косметологических, спортивных учреждениях, но и в офисных центрах. Ключевым в данном направлении является развитие возможностей технического обеспечения, которое в дальнейшем позволит практикующим специалистам осуществить следующий импульс развития методик применения ОГКВ в направлении массового использования данного физического фактора в медицине.

Благодарности. Исследование выполняется при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-1838.2020.2).

Ключевые слова: криовоздействие, криотерапия, общая криотерапия, криосауна, крио-агент, ПКХМ, исполнительное устройство, контроль воздействия, мониторинг температуры, автоматизация

STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF TECHNICAL SUPPORT FOR CRYOTHERAPY TREATMENT

A.V. Shakurov, L.M. Kolyshkin, N. A. Andreev

Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
2 Baumanskaya St., 5 buil., Moscow 1105005, Russia

Abstract. Objective. General cryotherapy effect on the human body with cooling gas is a physiotherapy method, the positive effect of which has been proven for more than 40 years of use (including in Russia, which is one of the leaders in this field). The objective of the study was to assess the prospects for the development of technical support for cryomedical effects on human organs. **Methods.**

*The work presents an overview and analysis of the current state of the technical support of this cryomethod. **Results.** The prospects for the method development and directions for improving the equipment are shown. It is noted that the development of the method is limited primarily by the lack of accuracy of cryotherapy and relatively high cost. **Conclusion.** Low-temperature therapeutic equipment can potentially be located not only in medical, cosmetology, sports facilities but also in office centers. The key in this direction is the development of technical support capabilities, which will further allow practitioners to impulse the development of methods for applying cryotherapy with cooling gas in the mass use of this physical factor in medicine.*

***Acknowledgements.** The research is supported by a grant from the President of the Russian Federation for State Support of Young Russian Scientists – Candidates of Science (MK-1838.2020.2).*

***Key words:** cryotherapy, general cryotherapy, cryosauna, cryoagent, vapor compression refrigerating machine, executive device, impact control, temperature monitoring, automation*

Введение. Использование холода в медицине известно с древних времен. Это один из нескольких традиционных методов оздоровления и облегчения физических страданий. В древней Греции, Персии, Римской империи, на Руси снег, смеси воды со льдом, холодная вода и другие источники холода, применялись (как и могут применяться сегодня) для профилактики и лечения широкого спектра травм и заболеваний [1, 11, 17, 19]. С течением времени, по мере развития цивилизации, техническое обеспечение данного вида физиотерапии развивалось. Наибольший импульс роста, как применения, так и развития такого оборудования наблюдался во второй половине XX века [2,18]. Следствием развития техники было развитие методик ее применения.

Постановка задачи. С развитием конкурирующих с холодом фармакологических средств, а также других физиотерапевтических методов в настоящее время область применения криомедицинского метода сузилась, однако сохраняются перспективы к его преобразованию для удовлетворения потребностей медицины будущего, для раскрытия которых необходимо повышать степень автоматизации и индивидуализации криовоздействия, чтобы «искусство врачевания» в данном случае становилось «ремеслом» [3, 21].

В зависимости от необходимости, охлаждать человека возможно, как локально (отдельную область организма), в целях терапии, криохирургии, криоконсервации, гипотермии и т.п., так и большую его часть – осуществлять общее охлаждение организма (только внешней его поверхности – с терапевтическими целями, либо вглубь – с целью осуществления общей гипотермии). Возможны также промежуточные методы общего охлаждения (например, моржевание – регулярное зимнее плавание в ледяной воде) [1,2,14].

С точки зрения низкотемпературной техники наибольший интерес вызывает терапевтическое общее газовое криовоздействие (ОГКВ, иначе называемое общей криотерапией), при проведении которого используется специализированное оборудование. ОГКВ – кратковременное охлаждение газом поверхности тела человека (за исключением наиболее чувствительных к холоду частей, закрытых защитной экипировкой и иногда головы и шеи, находящихся в таком случае в обычных условиях окружающей среды). Учитывая естественные преграды для теплообмена (например, в виде волосяного покрова), всего криовоздействию подвергается более половины поверхности тела пациента. Характерная длительность – 3 минуты. Цель – осуществить неглубокое охлаждение, понизив температуру поверхности тела до минимально безопасных значений, и одновременно с этим добиться неспецифического для человеческого организма понижения температуры покровных биологических тканей (кожи, жира, мышц, а также рецепторов нервной системы и капилляров сердечно-сосудистой системы), сопровождающегося последующим ответом организма. Эффективность применения охлаждающего газа по сравнению с водой обусловлена его низкой теплоемкостью, которая позволяет снижать опасность общего переохлаждения. Однако она же требует интенсификации конвективного теплообмена, например, значительного увеличения температурного напора между охлаждающим газом и пациентом (начальный температурный напор может превышать 170°C).

Основоположителем ОГКВ считается японский врач Тосимо Ямаучи. Основными странами-разработчиками стали Германия (Р. Фрике), Польша (З. Загробельный) и СССР (Г.А. Головкин, А.Ю. Баранов, Е.В. Майстрах, Ю.М. Губачев, И.С. Чернышев) [3, 7, 10]. ОГКВ применяется в различных областях профилактики и медицинской помощи [3, 4, 7, 10, 19], вызывает как локальные эффекты (положительное влияние на суставы, кожный покров и т.п.), так и общеукрепляющие (эффект нейрокриостимуляции – воздействия на нервную систему с целью закаливания организма). ОГКВ остается перспективным, но дорогим в применении и недостаточно оптимизированным с точки зрения точности дозирования методом.

Методы исследования. Установки ОГКВ состоят из трех основных частей [13]: исполнительного устройства (в котором находится человек, ИУ), блока охлаждения газа (БО) и блока управления (БУ). Исполнительные устройства применяются двух типов – с закрытым верхом – в них воздействию подвергаются в том числе голова и шея (рис.1, «whole body cryotherapy») и открытым верхом (рис. 3, за рубежом такое применение называется «partial body cryotherapy»). Также они проектируются для проведения индивидуальных и групповых процедур. БО применяются на основе жидкого азота (температура газа на входе в кабину до минус 140 °С) и каскадных холодильных машин (температура газа в камере до минус 105 °С). Блоки управления современных установок имеют минимальный функционал для обеспечения выполнения программ охлаждения, оттайки и захолаживания, а также реализации человеко-машинного интерфейса.

Первыми, в 70-е годы XX века, в Японии по аналогии с низкотемпературными холодильными камерами были разработаны большие установки с азотными газификаторами, сосудами Дьюара большой емкости. ИУ таких установок похоже на сауну, они получили название «криосаун» (рис. 1).

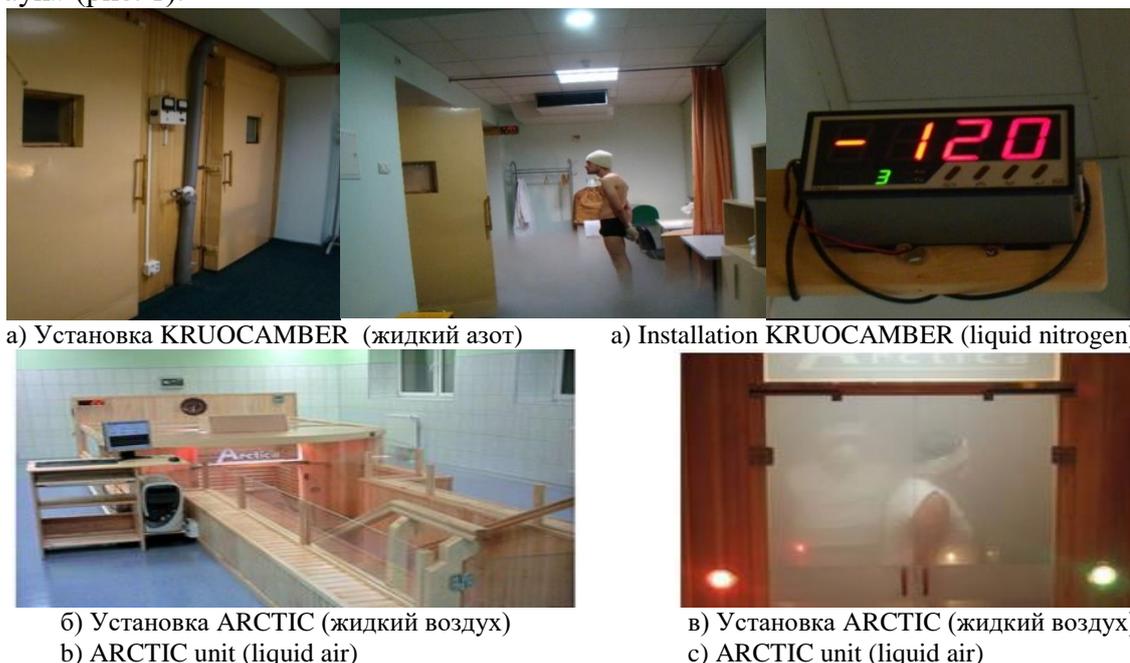


Рис. 1. Установки общего газового криовоздействия (запас жидкого хладагента, групповое ИУ)

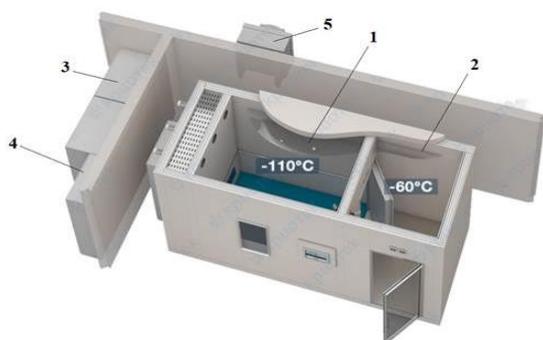
Fig. 1. Installations of general gas cryoinfluence (stock of liquid refrigerant, group IV)

Высокая стоимость такого криогенного оборудования и потребность в поставках жидкого азота послужили импульсом для применения каскадных холодильных машин (Германия). Однако, и в данном случае, как высокие капитальные и эксплуатационные затраты при применении установок с групповыми ИУ, так и накопленный опыт их медицинской эксплуатации, привели к разработке индивидуальных установок с применением жидкого азота (в начале 90-х годов XX века) или с двухкаскадной холодильной машиной (в Германии в начале XXI века). В РФ параллельно были разработаны два типа таких установок (жидкий азот): в Санкт-

Петербурге д.т.н., проф. А.Ю. Барановым, и в Москве под руководством доктора Чернышева Е.В. Первая установка осуществляет «partial body cryotherapy» (производитель НПП «Крион», многократно копировались различными зарубежными производителями, и являются наиболее распространенными на мировом рынке), вторая – «whole body cryotherapy» (текущий производитель ГРАНД-Крио). Сегодня в разных странах применяются практически все ранее разработанные серийные и опытные образцы установок ОГКВ. Основные производители такого оборудования: НПП Крион, ГРАНД-Крио (Россия), MECOTEC, Zimmer Medizin Systeme (Германия), JUKA, Asperia Group, Kriosystem Life, METRUM (Польша), Cryo Manufacturing (Франция). Установки также производят другие компании в США, Китае, Корее, Украине, Финляндии, Франция, Швеции и других странах [10, 11, 19].

Примером установки ОГКВ (жидкий азот, жидкий воздух) с групповыми ИУ (рис. 1) является польская KRUOCAMBER. Источником холода для таких установок является запас жидкого азота или воздуха (установка ARCTIC [22]), поступающего в теплообменный аппарат из криогенного резервуара за пределами здания. Сравнение энергозатрат при проведении ОГКВ в подобных групповых и индивидуальных азотных криосаунах [9] показало, что на одну процедуру в такой установке требуется в 1,5 раза больше электроэнергии и криоагента. Потребляемая электрическая мощность 1-2 кВт. Установка рассчитана на одновременное посещение 6 пациентами, имеет предкамеру с температурой минус 60 °С и основную камеру - от минус 100 до минус 150 °С. Рабочей средой в камере является воздух, охлаждаемый в теплообменном аппарате, расположенном за фальш-панелями в стене камеры.

Установки ОГКВ (трехкаскадные холодильные машины) с групповыми ИУ. Примером такой установки (рис. 2) является CrioSpaceCabin компании «Zimmer Medizin Systeme GmbH» (Германия).



а) общий вид установки «CrioSpaceCabin»

a) general view of the "CrioSpaceCabin" installation

(1 – процедурная камера treatment chamber; 2 – предкамера antechamber; 3 – трехкаскадная холодильная машина three-stage refrigerating machine; 4 – электрошкафы силового управления- power control electrical cabinets; 5 - конденсатор capacitor)

б) внешний вид холодильного агрегата установки

b) appearance of the refrigeration unit of the installation

Рис.2. Установки общего газового криовоздействия (трехкаскадные холодильные машины, групповое ИУ)

Fig. 2. Installations of the general gas cryoinfluence (three-stage refrigerating machines, group IU)

Источником холода в установке является трехкаскадная холодильная машина. На практике установку приходится захлаживать один раз на несколько дней непрерывной работы. Потребляемая электрическая мощность до 20 кВт. ИУ может быть выполнено в виде двух или трех камер (шлюзы) с различной температурой. Установка рассчитана на одновременное посещение 5-ю пациентами. Основная камера рассчитана на температуру среды до минус 110 °С (воздух в конце процедуры нагревается до -90°С...-85°С). Испаритель располагается под потолком и вдоль стены основной камеры. Воздух при этом циркулирует через решетки в стенках на уровне пола. Это позволяет добиться достаточно равномерного распределения температур в ИУ. Опыт процедур показывает, что при таких температурах пациент может дышать холодным

воздухом без вреда для здоровья, однако из-за большого количества инея в воздухе видимость при воздействии недостаточная. В РФ всего около 20 установок такого типа.

Установки ОГКВ (жидкий азот) с индивидуальным ИУ



а) внешний вид установки
a) installation appearance



б) криовоздействие
b) cryotherapy

**Рис.3. Установка КАЭКТ-01 (НПП «Крион», г. Санкт-Петербург)
Fig. 3. Installation КАЭКТ-01 (NPP «Kriion», St. Petersburg)**

В установках типа «КАЭКТ-01-Крион» (рис.3) охлаждение газа происходит путем смешения комнатного воздуха с кипящим азотом в контактном теплообменном аппарате, в результате чего температура газа на входе в ИУ составляет от минус 130 до минус 150°C [7-10, 20]. Время выхода установки на режим составляет от 3 до 5 минут. Голова пациента не контактирует с газовой смесью, ИУ выполнено в виде теплоизолированного бассейна и в верхнем сечении свободно сообщается с атмосферой. На одну процедуру требуется от 5 до 6 литров жидкого азота.

Блок управления установки имеет следующий функционал: автоматическая осушка; таймер процедуры, запуск и выключение вентилятора; индикация температуры. Имеет в составе: пульт дистанционного управления, индикатор температуры, датчики (термопары на входе, выходе из кабины, в жидком азоте).

НПП «Крион» произвело более 800 установок. Опытный образец наиболее простой конструкции (рис. 4, а) - Криофуро Головка. ИУ такого аппарата имеет вид прямоугольного бассейна. Преимуществами данной конструкции являлись простота, быстрый выход на режим, мобильность. Недостатками: отсутствие возможности регулировать и контролировать воздействие, риск удушья, низкая эргономичность. Данная конструкция не получила широкого распространения.

Установка Icequeen («ГРАНД-Крио», (рис. 4, б-г) реализует принцип «whole body cryotherapy». Охлаждение происходит смесью азота и воздуха (в контактном теплообменном аппарате происходит смешивание воздуха и кипящего азота). В сосуде Дьюара создается избыточное давление и жидкий азот поступает в теплообменник колонны системы подготовки криогенного газа [15]. Полученный таким образом криогенный газ нагнетается внутрь ИУ по системе каналов и с помощью сопел, расположенных вертикальными рядами в верхней и средней частях ИУ, равномерно распределяется вдоль внутренней поверхности стенок корпуса ИУ, воздействуя на кожные покровы пациента.



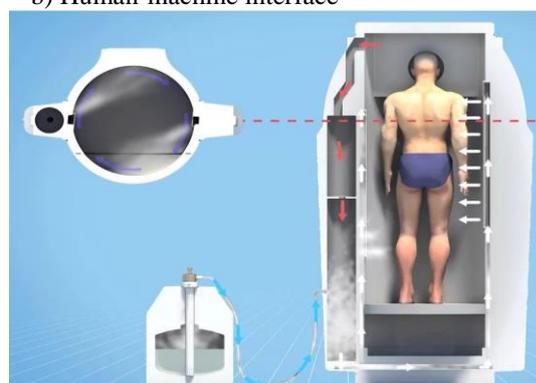
а) Криофуру Головка
 a) Kriofuro Golovko



б) Человеко-машинный интерфейс
 b) Human-machine interface



в) внешний вид
 v) appearance



г) схема
 g) scheme

**Рис. 4. Криофуру Головка и установка Icequeen («ГРАНД-Крио», г. Москва)
 Fig. 4. Cryofuro Golovko and Icequeen installation (GRAND-Cryo, Moscow)**

В рабочем пространстве могут поддерживаться температуры от минус 130 до минус 160°C. Данная установка является модернизацией установки Криомед-20/150-01 [16]. По данным [6] разность температур по высоте таких установок составляет около 20 °С, что подтверждает более равномерное распределение температуры в установках такой конструкции. Кроме того, Криомед-20/150-01 была снабжена тремя штатными датчиками температуры, два из которых расположены в ИУ и один на выходе из теплообменного аппарата. Это позволяет следить за температурой газа в течение процедуры, однако контроля температуры тела пациента не предусмотрено.

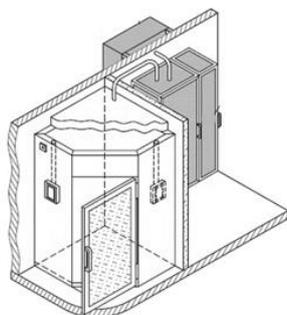
Новая установка совершеннее старой по времени выхода на режим и выполнена современнее в части дизайна. Расход азота составляет около 5 л на процедуру. Блок управления содержит современный человеко-машинный интерфейс (рис. 4 б) и выполнен из современных комплектующих.

Установка ОГКВ (двухкаскадная холодильная машина) с индивидуальным ИУ (рис.5). Последним концептуальным нововведением в данной области низкотемпературной техники был переход к применению индивидуальных ИУ в установках с каскадными холодильными машинами в 2005 г. компанией МесоТес GmbH в Германии (заправка R404a – 2,5 кг, R508b – 2,9 кг, потребляемая электрическая мощность 8-10 кВт). Однако, в данных камерах под тепловой нагрузкой криовоздействия температура воздуха повышается с -85 до -60..-70 °С, что не обеспечивает необходимого теплоотвода от пациента в условиях, приближенных к естественной конвекции (необходимо отводить не менее 1,5-2 кВт).

Согласно результатам вычислительного эксперимента, такой уровень температур и скоростей газа не позволяет получить полезный эффект при проведении процедуры ОГКВ [5], тем

не менее установка применяется в медицинской практике. Холодильная машина располагается отдельно от камеры в металлическом шкафу, испаритель находится в потолочной части.

Подобная конструкция имеет потенциал для регулирования режимов охлаждения, что немаловажно для более эффективного проведения ОГКВ. В установке также учтена возможность визуального контроля процедуры за счет наличия стеклянной двери с электроподогревом для предотвращения конденсации влаги. Установка имеет штатный датчик температуры среды, однако контроля температуры объекта не предусмотрено.



а) структура установки
a) installation structure



б) фото криовоздействия
b) photo of cryotherapy



в) иней в ИУ
v) frost in the IC



г) температура газа в конце воздействия
g) gas temperature at the end of exposure



д) внешний вид холодильного агрегата
d) appearance of the refrigeration unit



е) холодильный агрегат
e) refrigeration unit

Рис.5. Установка Criohome (MecoTec GmbH, Германия)
Fig. 5. Criohome plant (MecoTec GmbH, Germany)

Основные современные тенденции в разработке новых образцов оборудования ОГКВ (рис. 6-7): повышение мобильности установок, применение современных информационных технологий человеко-машинного интерфейса, расширение типов объектов охлаждения, совершенствование внутренних элементов конструкции и её внешнего вида.



а) внешний вид мобильных установок (Франция, Германия)

a) The appearance of mobile units (France, Germany)



б) Установка RevoCryo (США): мобильная, с надувным ИУ

b) RevoCryo installation (USA): mobile, with inflatable PS

Рис.6. Тренды в развитии мобильных установок общего газового криовоздействия
Fig. 6. Trends in the development of mobile installations for general gas cryoinfluence



а) Установка CryoCabin (Финляндия) с установленной тепловизионной камерой и большим человеко-машинным интерфейсом

a) Installation CryoCabin (Finland) with an installed thermal imaging camera and a large man-machine interface



б) Установка REVIVE (Дубай) большой производительности для ветеринарии

b) Plant REVIVE (Dubai) of high performance for veterinary medicine



в) Установка Cryo Arctic (Польша): у двери опускается стекло, нет контакта с парами азота (потребление 12 литров азота на процедуру)

v) Installation Cryo Arctic (Poland): glass is lowered at the door, there is no contact with nitrogen vapor (consumption of 12 liters of nitrogen per procedure)



г) Установка компании CryoEco (Франция), индивидуальное ИУ, трехкаскадная холодильная машина (до -110°C , потребляемая мощность 5,5 кВт).

g) Installation by CryoEco (France), individual IU, three-stage refrigeration machine (down to -110°C , power consumption 5.5 kW).

Рис.7. Тренды в развитии установок общего газового криовоздействия
Fig. 7. Trends in the development of general gas cryoinfluence units

Обсуждение результатов. С точки зрения анализа блоков охлаждения установок

ОГКВ, крупные установки, использующие массивные теплообменные аппараты (жидкий азот-воздух или жидкий воздух-воздух) ввиду высоких капитальных и эксплуатационных затрат на данный момент устарели. Сегодня, в установках с индивидуальным ИУ применяют два типа теплообменных аппаратов БО. В установке КАЭКТ-01 применяется принцип подхватывания потоком более теплого газа из канала рециркуляции кипящего жидкого азота. Аппарат показал свою работоспособность, однако имеет большие габариты и теплоемкость (материалоемкость). Теплообменный аппарат установки Icequeen более компактен, он содержит смешительную камеру («циклон»), в которой распыляется жидкий азот, поступающий под избыточным давлением из сосуда Дьюара, содержащего электронагреватель. В аппарате и системе подачи газа в ИУ применяются современные материалы (сам корпус ИУ и боковые колонны - аналог пластиковой гидромассажной ванны). В этом направлении перспективно проводить исследования в части регулирования работы БО. Что касается применения ПКХМ, применяются стандартные холодильные агрегаты, без их модификации для учета особенностей ОГКВ. Их основное преимущество, по сравнению с азотными системами – отсутствие необходимости организовывать доставку криогенной жидкости. Недостатки следующие. Каскадные (или смешиваемые) циклы с температурой кипения от -90 до -110 °С плохо подходят для условий кратковременных непостоянных воздействий.

Стоимость холодильных агрегатов значительно выше, чем стоимость азотного теплообменного аппарата и его обвязки (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики установок общего газового криовоздействия
Table 1. The main characteristics of the installations of the general gas cryotherapy

Показатели Indicators	КАЭКТ-01 «Крион»	Icequeen	CRIONOME	Cryo Space Cabin
Ориентировочная стоимость установки по ценам 2020 года, млн. руб. Estimated cost of installation at 2020 prices, mill.rubl.	от 1,5	3	более 14,0	более 20,0
Расход азота на процедуру, кг Nitrogen consumption for the procedure, kg	до 6	до 5	-	-
Время запуска установки, мин Installation start-up time, min.	от 3 до 5	около 3	от 120 до 240	от 240 до 400
Средняя температура в камере при процедуре, °С Average temperature in the chamber during the procedure, °C	-120...-130	-130...-140	-70	-100
Потребляемая электрическая мощность, кВт Consumed electric power, kW	1,5	1,5	8,5	15,0

В этом направлении перспективно проводить исследования по повышению температуры охлаждающего газа с целью добиться применения одноступенчатого холодильного цикла и рассматривать такие БО как альтернативные азотным. Альтернативой же применению ПКХМ может быть применение разомкнутых циклов ВХМ. Однако прецедентов их использования в установках ОГКВ не выявлено.

Исполнительное устройство установок ОГКВ является теплообменным аппаратом, предназначенным для кратковременного захлаживания поверхности объекта с высоким внутренним влагосодержанием (следовательно, относительно высокой теплоемкости). Ключевыми недостатками их конструкций являются низкая степень учета особенностей объекта охлаждения (неравномерность теплового потока по его внешней поверхности, различные размеры объ-

ектов и т.п.) и высокая степень влияния внешнего теплопритока из помещений. Также температура газа в ИУ нерегулируема. Решением данных проблем может быть рассмотрение их конструкции с точки зрения решения задач проектирования систем жизнеобеспечения типа «воздухораспределение в компактном помещении». То есть, перспективно было бы локально организовывать различную подачу газа к объекту охлаждения. А также с точки зрения повышения энергоэффективности, необходимо применять меры по снижению влияния смешения холодного газа из ИУ с воздухом комнатной температуры (их плотность может отличаться до 3-х раз).

Исторически, первыми ИУ были стандартные холодильные камеры. Их преимуществом остается достаточная для дыхания концентрация кислорода (дыхание должно быть медленное, через маску, чтобы не было переохлаждения дыхательных путей). В них не предусмотрено индивидуального подхода к подаче газа, однако интенсивность охлаждения можно менять, используя относительное движение объекта по отношению к газу (передвижение пациента). Однако, для этого пространства низкотемпературных камер недостаточно. Для снижения теплопритока применяются шлюзовые камеры (значительно увеличивают объем установки). Устройств «запирания потока» типа устройств воздушной завесы дверного проема не применялось. В таких камерах потенциально возможно установить локальные побудители потока (например, вентиляторы), для выполнения требований учета особенностей объекта охлаждения. С появлением индивидуальных ИУ азотных установок ОГКВ, конструкция их ИУ стала постепенно специализироваться, все более напоминая специализированный аппарат. Ключевым недостатком открытых сверху в атмосферу ИУ является повышенная степень неравномерности охлаждения поверхности объекта охлаждения (снизу интенсивно охлаждается, сверху охлаждения нет). А ИУ с профилированным окном не позволяют объекту охлаждения двигаться, перемещаться, что также повышает неравномерность его охлаждения и несет за собой организационные трудности. Их текущее развитие находится на этапе теоретического исследования [5].

С точки зрения **блоков управления** установок ОГКВ, ключевыми их недостатками являются отсутствие возможности обеспечивать различные программы охлаждения, а также отсутствие мониторинга температуры объекта охлаждения. Потребитель нуждается в наличии различных «сценариев» охлаждения (от предельно простого и безопасного, до специфических физиотерапевтических вариантов).

В рассмотренных установках (табл. 1) имеется в основном автоматизация пуска, стабилизация режима подачи газа, сушка, таймер и быстрая остановка.

Нет функций регулирования, контроля интенсивности охлаждения во время воздействия (что важно для развития методической базы применения ОГКВ на практике), не учитывается, что есть разные объекты (телосложение и др. возможные варианты группировки объектов охлаждения). Следовательно, нет автоматического контроля качества ОГКВ, и ввиду недостатка автоматизации оборудование на местах эксплуатируется часто неграмотно, целевые режимы не соблюдаются.

Вывод. ОГКВ не направлено на лечение пациентов, имеющих диагнозы из ряда наиболее социально значимых заболеваний. Однако, наиболее перспективные задачи данного метода – не допустить угрожающего ухудшения здоровья пациента, либо без использования фармакологических лекарственных средств осуществлять локальное лечение покровных тканей, что обязательно должно быть среди приоритетных задач медицины будущего. Общий тренд процесса научно-технического развития заключается в снижении издержек при выполнении актуальных для общества задач, что в данном случае выражается в снижении требований к индивидуальной подготовке оператора оборудования (медицинского персонала) и в общем снижении потерь экономики ввиду выявления заболеваний только на поздних стадиях их развития за счет проведения профилактических мер и лечения без отрыва от профессиональной деятельности.

Низкотемпературное терапевтическое оборудование потенциально может располагаться не только в медицинских, косметологических, спортивных учреждениях, но и в офисных центрах. Однако, недостаточный учет особенностей различных людей (объектов охлаждения) ве-

дет к неоптимальной парадигме использования данного относительно дорогостоящего метода лечения. В этом тренде, дальнейшее развитие ОГКВ ограничивают в первую очередь: недостаточная точность проведения воздействий (для учета индивидуальных особенностей различных пациентов и различных направлений применения метода, каждое из которых имеет свои особенности), что лежит в общем тренде потребности в повышении степени автоматизации криовоздействий, и относительно высокая стоимость, как процедур, так и оборудования. Ключевым в данном направлении является развитие возможностей технического обеспечения воздействия, которое бы позволило практикующим специалистам осуществить следующий импульс развития методик применения ОГКВ в направлении массового использования данного физического фактора в медицине.

Библиографический список:

1. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Шестакова О.А. Теплофизические основы производства эффективной аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. №3. С. 39-57.
2. Баранов А.Ю., Осина А.А., Синькова В.А. Энергетические и конструктивные условия эффективности аппаратов для общего криотерапевтического воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. №4. С. 25-33.
3. Баранов А.Ю. Искусственный холод на службе здоровья. Вестник Международной академии холода. 2006. № 1. С. 12-14.
4. Баранов А.Ю. Криотерапия в спорте: технологии комментарии прогнозы. Медицина и спорт. 2006. № 5. С. 38.
5. Баранов А.Ю. Научные основы разработки аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия: дис. ... доктора технических наук: 05.04.03 / Баранов Александр Юрьевич // Санкт-Петербург, 2014.
6. Баранов А.Ю. Проекту «Криотерапия в России 30 лет». В сборнике: Криотерапия в России Материалы IX Международной научно-практической конференции. 2017. С. 5-19.
7. Баранов А.Ю. Разработка техники и технологии криогенной терапии. Холодильная техника. 2006. № 12. С. 34-39.
8. Баранов А.Ю. 25 лет научно-исследовательской работы в области техники и технологии общей криотерапии // Сборник докладов IV международной конференции «Криотерапия в России». СПб. 2011. С. 3-10.
9. Баранов А.Ю., Савельева А.В., Сидорова А.Ю. Оценка энергозатрат при работе установки общего криотерапевтического воздействия. Криотерапия в России. 2009. С. 164-177.
10. Баранов А.Ю., Шестакова О.А., Василёнок А.В. Двадцать лет клинической эксплуатации отечественных аппаратов для общего криотерапевтического воздействия. Холодильная техника. 2018. № 5. С. 30-35.
11. Бурков И.А., Жердев А.А., Пушкарев А.В., Шакуров А.В., Пушкарев А.В. Теплофизические параметры гипотермии. Медицинский вестник Башкортостана. 2014. Т. 9. № 6. С. 119-123.
12. Жердев А.А., Сергеева А.А. Взаимосвязь механизмов теплообмена и терморегуляции человека в низкотемпературных камерах // Холодильная техника. 2007. № 6. С. 44-47.
13. Жердев А.А., Шакуров А.В., Щелчков А.А. Способы реализации общей криотерапевтической процедуры. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5 (5). С. 14.
14. Исмаилов Т.А., Рагимова Т.А., Хазамова М. А. Криотермоаппликационная терапия в неврологии с использованием термоэлектрических преобразователей энергии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. №3. С. 73-82.
15. Криотерапевтическое устройство [Текст] : пат. 130836U1 Рос. Федерация : МПК А61В 18/02 А61F 7/00.
16. ООО «Мед-Крионика». История проектов российских аэрокриотерапевтических комплексов. Сопоставительный анализ. URL: cryomed.ru.
17. Пушкарев А.В., Цыганов Д.И., Шакуров А.В., Шафранов В.В. Экспериментальное исследование малогабаритного криодеструктора для детской хирургии. Детская хирургия. 2016. Т. 20. № 5. С. 259-263.
18. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. Москва: САЙНС-ПРЕСС, 2011. С. 304.
19. Bouzigon, R., Grappe, F., Ravier, G., Dugue, B. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications (2016) Journal of Thermal Biology, 61, pp. 67-81.
20. Leonov V.P., Kolishkin L.M., Voronov V.A., Shakurov A.V. Experimental and computational study of the vertical axis temperature gradient of the liquid nitrogen individual cryo-cabin.
21. Shakurov A.V., Pushkarev A.V., Pushkarev V.A., Tsiganov D.I. Prerequisites for developing new generation cryosurgical devices (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2017; 9(2): 178-189, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.2.23>.
22. Strnad, Petr, Lenka Forýtková and Wieslaww Brojek. The Liquid Air Cryochambers for Whole-Body Cryotherapy. In Proceedings 10th Cryogenics 2008 International Conference. 2008. ISBN 978-2-913149-62-5.

References:

1. Baranov A.YU., Vasilenok A.V., Sokolova Ye.V., Shestakova O.A. Teplofizicheskiye osnovy proizvodstva effektivnoy apparatury dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2018. №3. S. 39-57. [Baranov A. Yu., Vasilenok A.V., Sokolova E. V., Shestakova O. A. Thermophysical bases of production of effective equipment for General cryotherapy. Herald of Dagestan state technical University. Technical science. 2018. No. 3. pp. 39-57. (In Russ)]
2. Baranov A.YU., Osina A.A., Sin'kova V.A. Energeticheskkiye i konstruktivnyye usloviya effektivnosti apparatov dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. №4. S. 25-33. [Baranov A. Yu., Osina A. A., Sinkova V. A. Energy and design conditions for the effectiveness of devices for General cryotherapy. Herald of Dagestan state technical University. Technical science. 2016. No. 4. Pp. 25-33. (In Russ)]
3. Baranov A.YU. Iskustvennyy kholod na sluzhbe zdorov'ya. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. 2006. № 1. S. 12-14. [Baranov A. Yu. Artificial cold in the service of health. Bulletin of the International Academy of cold. 2006. No. 1. pp. 12-14. (In Russ)]
4. Baranov A.YU. Krioterapiya v sporte: tekhnologii kommentarii prognozy. Meditsina i sport. 2006. № 5. S. 38. [Baranov A.Yu. Cryotherapy in sports: technologies and forecasts. Medicine and sports. 2006. No. 5. p. 38. (In Russ)]
5. Baranov A.YU. Nauchnyye osnovy razrabotki apparatury dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.04.03 / Baranov Aleksandr Yur'yevich // Sankt-Peterburg, 2014. [Baranov A.Yu. Scientific bases of development of equipment for General cryotherapy: dis.... doctor of technical Sciences: 05.04.03 / Baranov Alexander Yurievich // Saint Petersburg, 2014. (In Russ)]
6. Baranov A.YU. Projektu «Krioterapiya v Rossii 30 let». V sbornike: Krioterapiya v Rossii Materialy IKH Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2017. S. 5-19. [Baranov A.Yu. The project "Cryotherapy in Russia for 30 years". In the collection: Cryotherapy in Russia Materials of the IX International scientific and practical conference. 2017. pp. 5-19. (In Russ)]
7. Baranov A.YU. Razrabotka tekhniki i tekhnologii kriogennoy terapii. Kholodil'naya tekhnika. 2006. № 12. S. 34-39. [Baranov A.Yu. Development of cryogenic therapy techniques and technologies. Refrigeration equipment. 2006. No. 12. pp. 34-39. (In Russ)]
8. Baranov A.YU. 25 let nauchno-issledovatel'skoy raboty v oblasti tekhniki i tekhnologii obshchey krioterapii // Sbornik dokladov IV mezhdunarodnoy konferentsii «Krioterapiya v rossii». SPB. 2011. S. 3-10. [Baranov A.Yu. 25 years of research work in the field of General cryotherapy technique and technology // Collection of reports of the IV international conference "Cryotherapy in Russia". SPB. 2011. pp. 3-10. (In Russ)]
9. Baranov A.YU., Savel'yeva A.V., Sidorova A.YU. Otsenka energozatrat pri rabote ustanovki obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. Krioterapiya v Rossii. 2009. S. 164-177. [Baranov A.Yu., Saveleva A.V., Sidorova A.Yu. Assessment of energy consumption during the operation of the General cryotherapy unit. Cryotherapy in Russia. 2009. pp. 164-177. (In Russ)]
10. Baranov A.YU., Shestakova O.A., Vasilonok A.V. Dvadsat' let klinicheskoy ekspluatatsii otechestvennykh apparatov dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya. Kholodil'naya tekhnika. 2018. № 5. S. 30-35. [Baranov A. Yu., Shestakova O. A., Vasilenok A.V. Twenty years of clinical operation of domestic devices for General cryotherapy. Refrigeration equipment. 2018. No. 5. pp. 30-35. (In Russ)]
11. Burkov I.A., Zherdev A.A., Pushkarev A.V., Shakurov A.V., Pushkarev A.V. Teplofizicheskiye parametry gipotermii. Meditsinskiy vestnik Bashkortostana. 2014. T. 9. № 6. S. 119-123. [Burkov I. A., Zherdev A. A., Pushkarev A.V., Shakurov A.V., Pushkarev A.V. Thermophysical parameters of hypothermia. Medical Bulletin of Bashkortostan. 2014. Vol. 9. No. 6. pp. 119-123. (In Russ)]
12. Zherdev A.A., Sergeeva A.A. Vzaimosvyaz' mekhanizmov teploobmena i termoregulyatsii cheloveka v nizkotemperaturnykh kamerakh // Kholodil'naya tekhnika. 2007. № 6. S. 44 -47. [Zherdev A. A., Sergeeva A. A. Interrelation of mechanisms of heat exchange and human thermoregulation in low-temperature chambers // Refrigerating equipment. 2007. No. 6. pp. 44-47. (In Russ)]
13. Zherdev A.A., Shakurov A.V., Shchelchikov A.A. Sposoby realizatsii obshchey krioterapevticheskoy protsedury. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. 2012. № 5 (5). S. 14. [Zherdev A. A., Shakurov A.V., Shchelchikov A. A. Ways to implement a General cryotherapy procedure. Bulletin of the Bauman Moscow state technical University. 2012. No. 5 (5). P. 14. (In Russ)]
14. Ismailov T.A., Ragimova T.A., Khazamova M. A. Kriotermaapplikatsionnaya terapiya v nevrologii s ispol'zovaniyem termoelektricheskikh preobrazovateley energii. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. №3. S. 73-82. [Ismailov T. A., Ragimova T. A., Khazamova M. A. Cryo thermo application therapy in neurology using thermoelectric energy converters. Herald of Dagestan state technical University. Technical science. 2016. No. 3. pp. 73-82. (In Russ)]
15. Krioterapevticheskoye ustroystvo [Tekst] : pat. 130836U1 Ros. Federatsiya : MPK A61B 18/02 A61F 7/00. [Cryotherapy device [Text]: Pat. 130836U1 ROS. Federation: IPC A61B 18/02 A61F 7/00. (In Russ)]

16. ООО «Med-Krionika». Istoriya proyektov rossiyskikh aerokrioterapevticheskikh kompleksov. Sopostavitel'nyy analiz. URL: cryomed.ru. [Med-Cryonics LLC. Project history of the Russian cryotherapeutic systems. Comparative analysis. URL: cryomed.ru. (In Russ)]
17. Pushkarev A.V., Tsyganov D.I., Shakurov A.V., Shafranov V.V. Eksperimental'noye issledovaniye malogabaritnogo kriodestruktora dlya detskoй khirurgii. Detskaya khirurgiya. 2016. T. 20. № 5. S. 259-263. [Pushkarev A.V., Tsyganov D. I., Shakurov A.V., Shafranov V. V. Experimental study of a small-size cryodestructor for pediatric surgery. Pediatric surgery. 2016. Vol. 20. No. 5. pp. 259-263. (In Russ)]
18. Tsyganov D.I. Kriomeditsina: protsessy i apparaty. Moskva: SAYNS-PRESS, 2011. С. 304. [Tsyganov D. I. Cryomedicine: processes and devices. Moscow: SCIENCE PRESS, 2011. С. 304. (In Russ)]
19. Bouzigon, R., Grappe, F., Ravier, G., Dugue, B. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications (2016) Journal of Thermal Biology, 61, pp. 67-81.
20. Leonov V.P., Kolishkin L.M., Voronov V.A., Shakurov A.V. Experimental and computational study of the vertical axis temperature gradient of the liquid nitrogen individual cryo-cabin.
21. Shakurov A.V., Pushkarev A.V., Pushkarev V.A., Tsiganov D.I. Prerequisites for developing new generation cryosurgical devices (review). Sovremennyye tehnologii v medicine 2017; 9(2): 178–189, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.2.23>.
22. Strnad, Petr, Lenka Forýtková and Wieslaw Brojek. The Liquid Air Cryochambers for Whole-Body Cryotherapy. In Proceedings 10th Cryogenics 2008 International Conference. 2008. ISBN 978-2-913149-62-5.

Сведения об авторах:

Шакуров Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, заведующий отделом 3.1 НИИ ЭМ,
e-mai: shakurov@bmstu.ru

Кольшшин Леонид Михайлович, аспирант, e-mai: leonid-kn@mail.ru

Андреев Николай Алексеевич, студент, e-mai: al-nikoly@yandex.ru

Information about the authors:

Aleksey V. Shakurov, Cand. Sci., (Technical) Head of Department 3.1 Research Institute of EM,
e-mai: shakurov@bmstu.ru

Leonid M. Kolyshkin, graduate student, e-mai: leonid-kn@mail.ru

Nikolay A. Andreev student, e-mai: al-nikoly@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.08.2020.

Принята в печать 10.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.08.2020.

Accepted for publication 10.09.2020.

Для цитирования: А.Р. Абзалов, И.И. Кашапов, А.Ю. Орлов, И.Р. Мамлеев. Аутентификация пользователей на основе трехступенчатой модели клавиатурного почерка. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 39-48. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-39-48

For citation: A.R. Abzalov, I.I. Kashapov, A.Yu. Orlov, I.R. Mamleev. User authentication based on the three-stage keyboarding model. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 39-48. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-39-48

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.059

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-39-48

АУТЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ МОДЕЛИ КЛАВИАТУРНОГО ПОЧЕРКА

А.Р. Абзалов, И.И. Кашапов, А.Ю. Орлов, И.Р. Мамлеев

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева,

420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10, Россия

Резюме. Цель. В статье предложена трехступенчатая модель, которая позволяет увеличить эффективность аутентификации при реализации систем дистанционного обучения, не только в системах автоматического прокторинга, но и в сложных информационных системах критически важных объектов. **Метод.** Увеличение эффективности аутентификации пользователей происходит за счёт увеличения точности аутентификации по клавиатурному почерку. **Результат.** Предложенная модель поможет осуществить процесс разграничения доступа для мошенников и легальных пользователей, путём приспособления к малейшим изменениям параметров клавиатурного почерка, что позволяет увеличить точность аутентификации. Во время тестирования один из тестируемых пользователей был аутентифицирован при помощи сравнения девиаций, в то время как другие три пользователя были аутентифицированы при помощи критерия χ^2 . Оставшиеся пользователи не смогли пройти процедуру аутентификацию на всех этапах системы. **Вывод.** Проведено экспериментальное исследование, результаты которого показали высокую способность предложенной модели разграничения доступа для легальных пользователей и злоумышленников с учетом незначительных изменений параметров динамики нажатия клавиши, и повысить точность аутентификации пользователей. Достоверность аутентификации пользователей на практике составила 97,5%.

Ключевые слова: дистанционное обучение, клавиатурный почерк, биометрия, аутентификация, автоматический прокторинг

USER AUTHENTICATION BASED ON THE THREE-STAGE KEYBOARDING MODEL

A. R. Abzalov, I.I. Kashapov, A.Yu. Orlov, I.R. Mamleev

A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,

10 Karl Marx St., Kazan 420111, Russia

Abstract. Objective. The article offers a three-stage model that allows increasing the effectiveness of authentication in the implementation of distance learning systems, not only in automatic proctoring systems but also in complex information systems of critical objects. **Methods.** Increasing the effectiveness of user authentication is achieved by increasing the accuracy of authentication using keyboarding. **Results.** The proposed model will help to implement the process of access differentiation for fraudsters and legal users, by adapting to the slightest changes in the keyboarding parameters, which allows increasing the authentication accuracy. During testing, one of the tested users was authenticated using a deviation comparison, while the other three users were authenticated using the χ^2

criterion. The remaining users were not able to complete the authentication procedure at all stages of the system. Conclusion. The results of an experimental study showed the high ability of the proposed model of access control for legitimate users and attackers with some minor changes in the parameters of the keystrokes dynamics, improving the accuracy of user authentication. The user authentication reliability in practice was 97.5%.

Keywords: *distance learning, keyboarding, biometrics, authentication, automatic proctoring*

Введение. Несмотря на то, что задачи аутентификации и идентификации пользователей при работе в информационных системах, в том числе дистанционного обучения, достаточно изучены, они все еще остаются актуальными. Ранее созданные решения основываются на ограниченном количестве средств и методов, таких как: электронные замки, а также технологии биометрической аутентификации и идентификации. Не так давно широкое распространение получил метод аутентификации, основанный на клавиатурном почерке, иначе говоря, характерном наборе произвольного текста или парольной фразы на клавиатуре.

Данный принцип аутентификации пользователей заключается в возможности анализа временных промежутков между нажатиями клавиш при вводе пароля. Эффект клавиатурного почерка создается благодаря осуществлению большинства манипуляций с клавиатурой на бессознательном уровне. У каждого подготовленного пользователя, при многократном вводе одного и того же пароля, формируется автоматический стереотип действий.

Анализируемыми параметрами клавиатурного ввода являются: временные интервалы между нажатиями соседних клавиш, а также время нажатия каждой клавиши. В работах [1-5] приведены результаты исследований идентификации пользователей по клавиатурному почерку. Точность идентификации составляет более 97%. Помимо того, существует множество иностранных исследований.

Примером может служить работа Е. Флиора и К. Ковальского и разработанная ими система идентификации, основанная на клавиатурном почерке. В результате их работы только 3 из 8 пользователей были идентифицированы верно. А вероятность распознавания соответственно равна 37,5%. В то же время, Н. Д'Лим и Дж. Миталл получили результат в 12,5%, что соответствует лишь 1 распознанному пользователю из 8.

Постановка задачи. Большинство современных систем аутентификации позволяют весьма точно определить конкретного пользователя, однако достигается это простой связкой логин и пароль. Аутентификация же пользователей по клавиатурному почерку не требует дополнительных привязок к пользователю, однако имеет при этом существенным недостатком – низкую точность. В работе представлена трехступенчатая модель увеличения точности аутентификации по клавиатурному почерку, чьей основной задачей, помимо прочих, также является увеличение эффективности аутентификации в том числе и на сложных критически важных системах.

Методы исследования.

1. **Исследование современных решений аутентификации пользователей с использованием систем автоматизированного прокторинга**

1.1 Автоматизированный прокторинг.

Центр тестирования – реальное место в физическом мире, где проходит первичная аутентификация пользователей, а затем и текущая, промежуточная или итоговая аттестация с применением технических средств тестирования. В центре тестирования проводится компьютерное тестирование, в процессе которого специальные средства наблюдения фиксируют местоположение и действия пользователя.

Существуют автоматизированные контрольные системы онлайн тестирования, которые позволяют выявлять так называемый «маскарад» или подмену тестируемого (ProctorEdu, Экзамус и др.). В таких системах обязательно присутствие человека – проктора, в чьи обязанности входит слежение за процессом и выявление нарушений в режиме реального времени.

Пользователей верифицируют в два этапа: система сверяет фотографию, которую поль-

зователь загружал во время подачи заявки на онлайн тестирование, с пользователем, находящимся перед камерой. Система делает фотографию пользователя непосредственно перед онлайн тестированием и сравнивает её с эталоном. Однако данные системы прокторинга имеют недостатки: производительность зависит от количества прокторов, которые находятся онлайн или просматривают видеозаписи, при оценивании результатов тестирования происходит задержка по времени (нужно время, чтобы просмотреть видеозаписи, в случае асинхронного прокторинга.), сложно организовать работу большого количества прокторов, также проктор может оказаться недобросовестным или необязательным, что может сказаться на качестве процесса. Стоит отметить, что, несмотря на указанные недостатки, подобные системы, в настоящее время, применяются в комплексных системах прокторинга, в частности, большинством американских вузов.

Данное решение очень эффективно, но для его использования требуются материальные затраты на технические средства, для найма административного персонала, затраты на помещение, в которых будут организовываться центры тестирования. Также данное решение не позволяет принимать участие в работе путём дистанционного метода и дает возможность для «подтасовки» результатов самого тестирования.

В европейских странах, в связи с европейским менталитетом, законодательством и т.п., вопросы аутентификации пользователей в системах тестирования специалистами предметной области подробно не рассматриваются по причине отсутствия понимания возможного сговора о подмене легитимного пользователя для сдачи экзаменов (зачетов).

1.2 Физиологическая биометрия.

Данное решение позволяет аутентифицировать пользователей на основе их физиологических данных (отпечатки пальцев, радужная оболочка, структура лица, и др.) с учетом развития систем искусственного интеллекта, нанотехнологий и т.п. Надежность такого решения заметна только на методах идентификации пользователей, которые берут за основу распознавание радужной оболочки глаз [5-8], иные способы по мнению авторов работ Е. Флиорома и К. Ковальского, а также Н. Д'Лима и Дж. Миталла не подтвердили своей надежности.

1.3 Поведенческая биометрия.

Приведенное решение дает возможность аутентифицировать пользователей на основе их уникальных поведенческих характеристик (клавиатурный почерк, голосовой ритм, походка, характер подписи). В работах К. Ковальского, Е. Флиорома, Шарипова Р.Р. и Катасёва А.С. [9] был предложен метод на основе коэффициента корреляции (1), для сравнения напечатанных данных.

$$r = \sum_{i=1}^n (k_i * t_i) / \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 * \sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (1)$$

k_i - вектор длины $i = \underline{1, n}$, отражает разницу между отпусканием предыдущей и последующим нажатием следующей клавиши в эталонной подписи; t_i - вектор длины $i = \underline{1, n}$, в нем сохраняются интервалы времени между нажатиями клавиш. Стоит отметить, что приведенное решение эффективно только при работе с небольшими объемами данных.

Авторами работ [4, 8, 10] была предложена модель, основывающаяся на нейронной сети, которая учитывает частоту нажатия клавиш, движение мыши, время задержки нажатия клавиш и скорость набора текста [11].

По результатам исследований было выявлено, что пользователи были успешно аутентифицированы в тех случаях, когда различие между текущими данными и сохраненным шаблоном было менее 10%. Данная модель содержит в себе модуль, обновляющий шаблон, каждый раз, в случае, если аутентификация была пройдена успешно.

Пользователь в момент прохождения аутентификации может находиться в разном физическом и психологическом состоянии, и это может серьезно повлиять на ее результаты. В рабо-

те предполагается, что клавиатурный почерк человека – фактор достаточно стабильный, ограничения не рассматривались.

Одной из будущих задач ставится разработка метода, который, для повышения точности, будет основываться на уровне логического сравнения. Его назначение заключается в создании более качественного эталона, в котором бы могли учитываться индивидуальные особенности пользователей и отклонения, возникающие в связи с эмоциональным фоном пользователей. Именно такой метод позволит в будущем разработать непрерывную систему аутентификации пользователей, отслеживающую в том числе, и эмоциональный фон сотрудников критически важных объектов.

В работе представлена трехступенчатая модель увеличения точности аутентификации, заключающаяся в трех последовательных этапах:

- 1) Аутентификация на базе эталонных и текущих параметров пользователя;
- 2) Аутентификация с помощью сопоставления параметров пользователя с соответствующими классами: легальные и нелегальные пользователи;
- 3) Постоянная автоматическая адаптация критериев класса легального пользователя на базе рекуррентных вычислений.

2. Трехступенчатая модель аутентификации пользователей по клавиатурному почерку.

В информационных системах, находящихся в режиме онлайн, предлагается следующая трехступенчатая модель аутентификации. На рис.1 представлена схема трехступенчатой модели системы аутентификации пользователей.



Рис. 1. Трехступенчатая модель аутентификации пользователей
Fig. 1. Three-step user authentication model

Перед тем, как начать пользоваться системой автоматического прокторинга, пользователь должен авторизоваться в системе (ввести логин, пароль и другие параметры). Далее, успешно пройдя авторизацию, пользователь должен пройти аутентификацию, для чего измеряются клавиатурные параметры пользователя, формируются эталоны по данным измерениям и выполняется процесс сравнения данных параметров пользователя по критерию сравнения центров распределения двух совокупностей при условии, что распределение параметров клавиатурного почерка будет подчиняться нормальному гауссовскому закону (стандартное отклонение) и проверке соответствия на критерий Хи-квадрат (χ^2). В случае если на первом этапе пользователю не удалось пройти аутентификацию, то на втором этапе происходит решение классовой задачи, чтобы сравнить текущие данные с данными классов пользователей.

На третьем этапе данные пользователя обновляются на основе рекуррентного процесса. На рис. 2 приведена структурная схема трехступенчатой модели аутентификации пользователей.



Рис. 2. Детализация трехступенчатой модели аутентификации пользователей
Fig.2. Detailing a three-step user authentication model

Обсуждение результатов. Рассмотрим каждый уровень разработанной модели подробнее. На статистическом этапе измеряются временные параметры клавиатурного почерка у пользователей, а также формируются эталоны для каждого пользователя. Они представляют из себя измерение среднеквадратических отклонений (СКО) и средних значений. После этого анализируются стандартные отклонения между эталонными значениями и входными данными. По формуле (2) вычисляется стандартное отклонение временных параметров работы пользователей на клавиатуре.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2} \quad (2)$$

N - размер выборки временных параметров, S - стандартное отклонение, x_i - текущее значение выборки, а \bar{x}_j - среднее значение параметров.

Полученное значение S сравнивается с ранее сохраненным стандартным отклонением, рассчитанным на основе собранных данных каждого конкретного пользователя. В случае, когда разница между этими значениями незначительна, пользователь проходит проверку, иначе осуществляется проверка критерия χ^2 .

Прохождение теста χ^2 используется для опровержения или подтверждения гипотезы. В качестве гипотезы для теста в предлагаемой системе принимается предположение о том, что «Пользователь легальный». В данном тесте предполагается одна степень свободы, так как возможны только два результата: пользователь либо легален, либо нелегален. Степень свободы используется при выборе критических значений в статистической таблице [12]. Значение выбирается исходя из желаемой точности. Для предложенной системы было выбрано значение, при котором уровень достоверности составлял 97,5%. Данный уровень показывает вероятность то-

го, что решение об отклонении или принятии гипотезы верно.

Для доказательства верности гипотезы необходимо сохраненное среднее значение атрибута передавать как ожидаемое значение, а среднее значение входного атрибута – как наблюдаемое. Целью теста будет определение того, является разница между входным и сохраненным средними значениями следствием случайности или же она получена в результате иных особен-

ностей. Ниже приведена формула (3) [12], где χ^2 – критерий Хи-квадрат, \bar{x}_j – наблюдаемое среднее значение времени, а L_i – ожидаемое значение (среднее эталонное значение):

$$\chi^2 = \sum \frac{(\bar{x}_j - L_i)^2}{L_i} \quad (3)$$

Для принятия гипотезы, значение χ^2 должно быть меньше или равно критического значения, выбранному из статистической таблицы [2]. Если значение χ^2 больше критического значения, то пользователь отклоняется. В ином случае, пользователь принимается с вероятностью 97,5%. Начинается следующая ступень модели аутентификации.

На этапе классификации, фиксируется последовательность классифицируемых признаков пользователей в процессе формирования априорного словаря классов. При этом самым основным в этом процессе остается выбор адекватного правила классификации характеристик. Эти правила должны соответствовать требованиям, предъявляемым к системе распознавания, зависящих от возможных решений, принимаемых системой управления при распознавании неизвестных ранее характеристик. После этого происходит определение параметров классов посредством разделения характеристик почерка на классы L_1, \dots, L_m . В пространстве наборных необходимо определить характеристик области $S_i, i=1, \dots, m$, эквивалентные классам. Рассмотренный выше пример представлен на рис. 3.

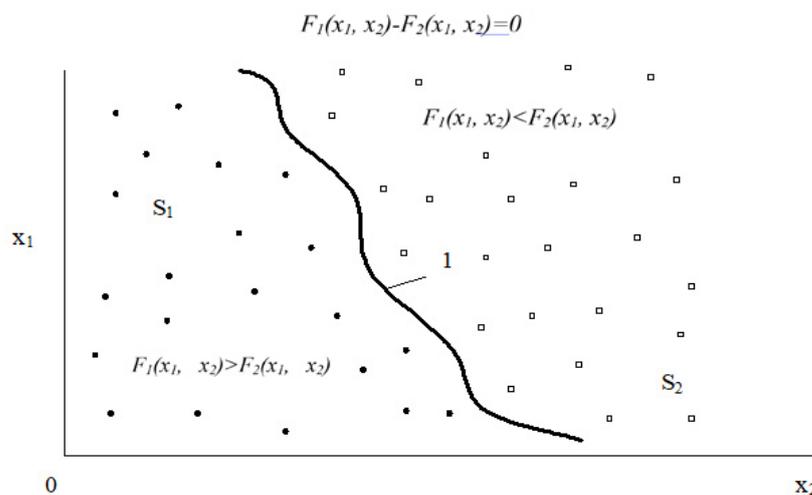


Рис. 3. Разбиение классов пользователей
Fig. 3. Classification of user classes

Таким образом, становится возможным определение границ областей S_i , соответствующих классам L_i , по которым принимается решение.

На рис. 3 представлено соответствующего разбиения. Легальные пользователи находятся в области, параметры незарегистрированных или случайных пользователей – в области S2. 1 – решающая граница. Задав разделяющие функции, можно проверить выполнения условий:

Если $F_1(x_1, x_2) > F_2(x_1, x_2)$ – то пользователь идентифицируется, как легальный, и если $F_1(x_1, x_2) < F_2(x_1, x_2)$ – то это параметры пользователя, который распознается как «чужой» и будет игнорироваться системой. Иначе, если пользователь распознается, как «свой», параметры и S обновляются, в соответствии с рекуррентными отношениями (4) (5):

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4),$$

где N – количество наблюдений, \bar{x}_j – среднее значение параметров конкретного пользователя, x_i – текущее значение параметров конкретного пользователя.

$$S = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}_j| \quad (5),$$

где S – среднеквадратичное отклонение (новое).

Экспериментальная часть. В качестве проверки трехступенчатой модели, были проведены статистические расчеты и экспериментальное исследование. Была выбрана экспериментальная группа из 8 студентов ИКТЗИ (институт компьютерных технологий и защиты информации) КНИТУ-КАИ, все из них владеют десятипальцевым слепым набором на клавиатуре. Первым этапом испытуемым предлагалось авторизоваться на web-сайт, созданный под цели эксперимента. В результате чего были сформированы эталоны данных пользователей. При авторизации студенты вводили свои ФИО, специальность, год обучения, направление их подготовки, после чего перенаправлялись на другую страницу. Далее студентами осуществлялся ввод готовых текстов, которые представляли собой заранее подготовленные предложения, заранее не известные тестируемой группе.

После чего, введенные данные тестируемой группы были собраны на стороне клиента из web-формы: при печати символов на клавиатуре студентами, программа-обработчик обрабатывала любое нажатие и отпускание любой клавиш. Программа написана на языке JavaScript и для обработки применялись встроенные функции Keydown, т.е. событие «нажатие клавиши» и Keyup – событие «отпускание клавиши».

```
public static void KeyDUP(string[] args)
{
    Form1.KeyDown += KeyDownOrUp;
    Form1.KeyUp += KeyDownOrUp;
    Form1.KeyPress += KeyDownOrUp;
    string text;
    protected void KeyDownOrUp(Object sender, KeyEventArgs e)
    {
        text = e.GetType() + " key=" + (e.GetType() == "KeyPress" ? e.KeyChar :
e.KeyCode) + DateTime.Now;
    }
}
```

Алгоритм программы устанавливал первую временную метку при нажатии клавиши и вторую временную метку при ее отпускании. Далее вычисляется разница во времени между метками, и, соответственно, определяется время удержания клавиши. Также алгоритм с помощью встроенных функций фиксирует код нажатой клавиши в кодировке ASCII и её значение. В результате все полученные данные: код клавиши, ее имя, время задержки и время отпускания клавиши передается на сервер, где происходит дальнейшая обработка данных. Передача информации происходит с помощью JS-функции, использующей AJAX запросы.

Сбор информации на сервере является следующим этапом работы системы. Web сервер был организован на базе Apache HTTP Server 2.2, а также OS Linux Mint. При передаче данных, скрипт, на языке PHP, на стороне сервера запрашивал базу данных, которая была реализована на MySQL, для проверки, не были ли сохранены какие-либо предыдущие данные, такие как

нажатые клавиши, для текущего пользователя. В случае если такие данные уже были в базе данных, то обработчик выбирал из них последние три и использовал их временные метки, чтобы рассчитать временные интервалы диграфов, триграфов и квадграфов, путём разности значений временных меток.

Во время эксперимента статистические данные были поделены на две группы:

1. Эталонные данные;
2. Данные для обработки.

Был выбран такой параметр, как время удержания клавиш студентами, потому что этот параметр был наиболее информативен в нашем случае. Но данное утверждение при работе с большим объёмом данных может быть неверно.

По результатам тестов [19 – 21] для каждого из студентов были рассчитаны и построены стандартные девиации эталонных и текущих данных. В табл. 1 представлены результаты всех 8 тестируемых пользователей. Также был рассчитан критерий χ^2 для отдельно взятого тестируемого пользователя. По данным таблицы видно, что пользователь №6 был аутентифицирован при помощи сравнения стандартных девиаций его эталона и данных, потому что разница в этой девиации составила меньше 3-х, что и было в процессе аутентификации первым шагом.

Таблица 1. Значение девиации и критерий хи-квадрат
Table 1. The value of deviation and the chi-square criterion

Студент Student	Данные Facts		
	Значение девиации (эталонные данные) Deviation value (reference data)	Значение девиации (измеренные) Deviation value (measured)	Критерий Хи-квадра Criterion Chi-square
1	86	32	28.7
2	169	41	31.42
3	63	9	5.95
4	62	48	51.41
5	162	35	11.84
6	39	38	13.86
7	42	12	4.82
8	105	118	63.31

Пользователи под номерами № 3, 5 и 7 были аутентифицированы посредством критерия χ^2 : значения критерия оказались меньше критического значение 12,71. Исходя из результатов, можно сделать вывод, что с уверенностью в 97,5% пользователи аутентифицировались верно. Результаты расчётов показывают также, что на этапе сопоставления статистических значений параметров клавиатурного почерка проверку подлинности прошли 50% пользователей.

Первоначальной целью было убедиться в том, что предложенная модель аутентификации способна разграничить доступ легальных и нелегальных пользователей с учетом постоянных адаптаций к изменениям параметров клавиатурного почерка. Такие адаптации должны позволить повысить точность аутентификации.

В итоге сравнением методом девиаций был аутентифицирован один из пользователей, трое других - методом подсчета критерия χ^2 . Все остальные тестируемые не были аутентифицированы ни на одном из этапов системы. Это может быть объяснено недостаточным количеством исходных данных для идентификации. Для доказательства принципиальной работоспособности модели представленной выборки достаточно, и есть все основания предполагать, что при увеличении объема выборки процент успешного распознавания будет увеличиваться.

Вывод. В результате проделанного исследования была получена информация о том, что решение в половине случаев было принято уже на статистическом этапе трехступенчатой модели аутентификации, вероятность точности которой выше, по сравнению с некоторыми известными решениями.

При создании больших информационных систем проблемы с эффективностью достаточно быстро оптимизируются путем увеличения количества исходных данных, при этом простота алгоритмов легко может позволить снизить нагрузки на вычислительные мощности крупномасштабных систем. Помимо прочего, важным дополнением к сравнению наборных характеристик оказалось применение критерия χ^2 , ввиду возможности анализировать статистические вариации. Это, в том числе отражается и в результате эксперимента, в котором трое из восьми пользователей были аутентифицированы уже на первом этапе, с использованием оценки критерия χ^2 .

Библиографический список:

1. Глова В.И., Катасев А.С., Абзалов А.Р. Модель локализации искажений и подтверждения авторства исходных текстов программ // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2008. № 3. С. 84-87.
2. Добровинский Д.С., Ловецкий И.В., Попов М.А. Прокторинг как инструмент развития дистанционного образования // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. С. 27-32.
3. Тумбинская М.В. Поддержка принятия решений и моделирование обеспечения защиты информации в информационных системах интернет-банкинга // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. №7 (133). С. 33-39.
4. Тумбинская М.В., Баянов Б.И., Рахимов Р.Ж., Кормильцев Н.В., Уваров А.Д. Анализ и прогнозирование вредоносного сетевого трафика в облачных сервисах // Бизнес-информатика. 2019. № 1. С. 71-81.
5. R.R. Sharipov, M.V. Tumbinskaya, A.R. Abzalov Analysis of users keyboard handwriting based on Gaussian reference signals // International Russian Automation Conference. RusAutoCon. 2019.
6. Тумбинская М.В. Системный подход к обеспечению защиты от нежелательной информации в социальных сетях // Вопросы кибербезопасности. 2017. №2 (20). С. 30-44.
7. Тумбинская М.В. Модель защищенной информационной системы интернет-банкинга // Прикладная информатика. 2015. № 5 (59). С. 62-72.
8. Шарипов Р.Р., Сафиуллин Н.З. Аппаратурный анализ клавиатурного почерка с использованием эталонных гауссовских сигналов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, 2006. № 2. С. 21-23.
9. Шарипов Р.Р., Катасёв А.С. Система распознавания клавиатурного почерка пользователей на основе полигауссового алгоритма // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 4 (32). С. 45-59.
10. Тумбинская М.В. Обеспечение защиты от нежелательной информации в социальных сетях // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27. № 2. С. 264-288.
11. Мухаматханов Р.М., Михайлов А.А., Баянов Б.И., Тумбинская М.В. Классификация DDos-атак на основе нейросетевой модели // Прикладная информатика. 2019. № 1 (79). С. 96-103.
12. Берман Г.Н. Сборник задач по курсу математического анализа. Москва: Наука, 1977 416 с.

References:

1. Glova V.I., Katasev A.S., Abzalov A.R. Model' lokalizatsii iskazheniy i podtverzhdeniya avtorstva iskhodnykh tekstov programm // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva. 2008. № 3. S. 84-87. [Glova V.I., Katasev A.S., Abzalov A.R. Model for localization of distortions and confirmation of authorship of source codes of programs // Bulletin of Kazan State Technical University. A.N. Tupolev. 2008. No. 3. S. 84-87.(In Russ)]
2. Dobrovinskiy D.S., Lovetskiy I.V., Popov M.A. Proktoring kak instrument razvitiya distantsionnogo obrazovaniya // Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke. 2018. S. 27-32. [Dobrovinsky D.S., Lovetsky I.V., Popov M.A. Proctoring as a tool for the development of distance education // Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century. 2018.S. 27-32. (In Russ)]
3. Tumbinskaya M.V. Podderzhka prinyatiya resheniy i modelirovaniye obespecheniya zashchity informatsii v informatsionnykh sistemakh internet-bankinga // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. 2015. №7 (133). S. 33-39. [Tumbinskaya M.V. Decision support and modeling of information security in information systems of Internet banking // Bulletin of computer and information technologies. 2015. No. 7 (133). S. 33-39. (In Russ)]
4. Tumbinskaya M.V., Bayanov B.I., Rakhimov R.ZH., Kormil'tsev N.V., Uvarov A.D. Analiz i prognozirovaniye vredonosnogo setevogo trafika v oblachnykh servisakh // Biznes-informatika. 2019. № 1. S. 71-81. [Tumbinskaya M.V., Bayanov B.I., Rakhimov R.Zh., Kormiltsev N.V., Uvarov A.D. Analysis and prediction of malicious network traffic in cloud services // Business Informatics. 2019.No. 1.P. 71-81. (In Russ)]

5. R.R. Sharipov, M.V. Tumbinskaya, A.R. Abzalov Analysis of users keyboard handwriting based on Gaussian reference signals // International Russian Automation Conference. RusAutoCon. 2019.
6. Tumbinskaya M.V. Cistemnyy podkhod k obespecheniyu zashchity ot nezhelatel'noy informatsii v sotsial'nykh setyakh // Voprosy kiberbezopasnosti. 2017. №2 (20). S. 30-44. [Tumbinskaya M.V. A systematic approach to ensuring protection against unwanted information in social networks // Cybersecurity Issues. 2017. No. 2 (20). S. 30-44. (In Russ)]
7. Tumbinskaya M.V. Model' zashchishchennoy informatsionnoy sistemy internet-bankinga // Prikladnaya informatika. 2015. № 5 (59). S. 62-72. [Tumbinskaya M.V. Model of a secure information system for Internet banking // Applied Informatics. 2015. No. 5 (59). S. 62-72. (In Russ)]
8. Sharipov R.R., Safiullin N.Z. Apparaturnyy analiz klaviaturnogo pocherka s ispol'zovaniye etalonnykh gaussovskikh signallov // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva, 2006. № 2. S. 21-23. [Sharipov R.R., Safiullin N.Z. Instrumental analysis of keyboard handwriting using standard Gaussian signals. Bulletin of Kazan State Technical University. A.N. Tupolev, 2006. No. 2. S. 21-23. (In Russ)]
9. Sharipov R.R., Katasov A.S. Sistema raspoznavaniya klaviaturnogo pocherka pol'zovateley na osnove poligaussovogo algoritma // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2016. № 4 (32). S. 45-59. [Sharipov R.R., Katasev A.S. A system for recognizing the keyboard handwriting of users based on the poly-Gaussian algorithm // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2016. No. 4 (32). S. 45-59. (In Russ)]
10. Tumbinskaya M.V. Obespecheniye zashchity ot nezhelatel'noy informatsii v sotsial'nykh setyakh // Vestnik Mordovskogo universiteta. 2017. T. 27. № 2. S. 264-288. [Tumbinskaya M.V. Providing protection against unwanted information in social networks // Bulletin of the Mordovian University. 2017. Vol. 27. No. 2. P. 264-288. (In Russ)]
11. Mukhamatkhanov R.M., Mikhaylov A.A., Bayanov B.I., Tumbinskaya M.V. Klassifikatsiya DDos-atak na osnove neyrosetevoy modeli // Prikladnaya informatika. 2019. № 1 (79). S. 96-103. [Mukhamatkhanov R.M., Mikhailov A.A., Bayanov B.I., Tumbinskaya M.V. Classification of DDos attacks based on a neural network model // Applied Informatics. 2019. No. 1 (79). S. 96-103. (In Russ)]
12. Berman G.N. Sbornik zadach po kursu matematicheskogo analiza. Moskva: Nauka, 1977 416с. [Berman G.N. Collection of problems for the course of mathematical analysis. Moscow: Nauka, 1977 416с. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Абзалов Айрат Ринатович, старший преподаватель, кафедра систем информационной безопасности, e-mail: kai.abzalov@mail.ru, ORCID 0000-0002-2832-2840

Кашапов Ильназ Ильгизович, студент, e-mail: exkashapov@mail.ru, ORCID 0000-0002-2352-6545

Орлов Артемий Юрьевич, студент, e-mail: tyoomsday@gmail.com, ORCID 0000-0002-1041-4499

Мамлеев Искандер Раушанович, студент, e-mail: iskandr3567@mail.ru, ORCID 0000-0003-2364-8507

Information about the authors:

Airat R. Abzalov, Senior Lecturer, Department of Information Security Systems, e-mail: kai.abzalov@mail.ru, ORCID 0000-0002-2832-2840

Ilnaz I. Kashapov, student, e-mail: exkashapov@mail.ru, ORCID 0000-0002-2352-6545

Artemy Yu. Orlov, student, e-mail: tyoomsday@gmail.com, ORCID 0000-0002-1041-4499

Iskander R. Mamleev, student, e-mail: iskandr3567@mail.ru, ORCID 0000-0003-2364-8507

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.05.2020.

Принята в печать 18.07.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.05.2020.

Accepted for publication 18.07.2020.

Для цитирования: А.А. Горбунов, А.Д. Припадчев. Формирование облика магистрального воздушного судна на этапе разработки технического предложения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 49-59. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-49-59

For citation: A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev. Shaping the appearance of a long-range aircraft at the stage of developing a technical proposal. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 49-59. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-49-59

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.9:629.734

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-49-59

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ЭТАПЕ
РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

А.А. Горбунов, А.Д. Припадчев

Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, Россия

Резюме. Цель. Процесс проектирования магистрального воздушного судна (ВС), в частности на этапе предварительного проектирования, предполагает сравнение и анализ большого количества проектных альтернатив при заданных критериях эффективности. При этом решается задача выбора состава рациональных проектно-конструкторских параметров, что является актуальной проблемой этапа предварительного проектирования ВС. **Метод.** Разработанный метод, позволяет определить вектор параметров, обеспечивающий рациональные характеристики при заданном критерии эффективности. В связи с чем, предлагаем ввести глобальный критерий эффективности — взлетная масса ВС, а частными критериями выступают аэродинамическое качество на крейсерском режиме полета и величина топливной эффективности. **Результат.** В такой постановке задачи проектирования приходится решать ряд взаимосвязанных задач, причем, одни являются формализованными, а для других пока не существует математического аппарата и ПО, позволяющего автоматизировать процесс. Отличительной особенностью предлагаемого подхода к поиску рационального проектного решения является применение методов статистического анализа в сочетании с методами высокоточного математического моделирования, программно-реализованные в единой информационной среде с применением языков Фортран V и C++. **Вывод.** Предлагаемый метод выбора состава рациональных проектно-конструкторских параметров позволяет на ранних стадиях и этапах проектирования магистрального ВС, сформировать облик и обеспечить заданные характеристики для его составных элементов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках стипендии Президента РФ № СП-3606.2018.1 от 29.12.2017 г., для молодых ученых и аспирантов на выполнение научного исследования по теме «Методология автоматизированного синтеза проектных и конструкторских параметров транспортной техники нового поколения».

Ключевые слова: воздушное судно; выбор параметров; облик воздушного судна; параметрический синтез; вектор параметров; многопараметрический подход; концептуальная модель

SHAPING THE APPEARANCE OF A LONG-RANGE AIRCRAFT AT THE STAGE OF DEVELOPING A TECHNICAL PROPOSAL

A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev

Orenburg State University,
13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia

Abstract. Objective. The process of designing a long-range aircraft, in particular at the preliminary design stage, involves comparing and analyzing a large number of design alternatives with specified performance criteria. At the same time, the problem of choosing the composition of rational design parameters is solved, which is an actual problem of the preliminary design stage of a long-range aircraft. **Methods.** The developed method allows determining the vector of parameters that provides rational characteristics for a given efficiency criterion. In this regard, the authors propose to introduce a global efficiency criterion – the takeoff weight of the long-range aircraft, and the specific criteria are the aerodynamic quality in cruise and the value of fuel efficiency. **Results.** In this formulation of the design problem, it is necessary to solve several interrelated problems,

some of which are formalized, while others do not yet have a mathematical construct and software that allows automating the process. A distinctive feature of the proposed approach to finding a rational design solution is the use of statistical analysis methods in combination with methods of high-precision mathematical modeling, software-implemented in a single information environment using the Fortran V and C++ languages. **Conclusion.** The proposed method for selecting the composition of rational design parameters allows forming the appearance and providing the specified characteristics for its component elements at the early stages and stages of designing the long-range aircraft.

Acknowledgement. The work was carried out within the framework of the scholarship of the President of the Russian Federation No. SP-3606.2018.1 dated December 29, 2017, for young scientists and graduate students to carry out scientific research on the topic "Methodology of automated synthesis of design and design parameters of new generation transport equipment."

Keywords: aircraft; parameter selection; aircraft appearance; parametric synthesis; parameter vector; multiparametric approach; conceptual model

Введение. Согласно государственной Программе Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы», к 2025 году (относительно 2017 года) планируется увеличить выпуск авиационной техники военного и гражданского назначения на 46 %, поднять производительность труда на промышленных предприятиях авиационной промышленности на 34,9 %, [1, 2].

Проводимые экспериментальные исследования, основанные на численном моделировании и физических экспериментах, позволяют с потребной степенью точности определить характеристики проектируемой продукции. Однако их проведение невозможно без ряда предшествующих этапов (предварительного и эскизного проектирования), на которых принимается ряд важных решений, определяющих облик проектируемой системы элементов — магистральных ВС. Общими тенденциями перспективного проектирования является решение частных оптимизационных задач и совершенствование аэродинамических характеристик ВС. Вопрос совершенствования аэродинамических характеристик магистральных ВС непосредственно связан с обликом ВС и системой несущих поверхностей, в частности.

Основное отличие предлагаемого подхода от существующих заключается в разработанном научно-методическом обеспечении, позволяющем совершенствовать процесс проектирования магистрального ВС на основе выбранного критерия эффективности на одном иерархическом этапе проектирования. Для достижения заданных показателей на множестве возможных решений, изменяя угол стреловидности, сужение и удлинение крыла, площадь, геометрическую крутку, а также форму поперечного сечения вдоль размаха крыла (аэродинамическая крутка), осуществляем поиск рационального варианта проектного решения.

Традиционный процесс проектирования ВС предполагает эскизную прорисовку будущего объекта — «Первый рисунок ВС» и оценку его пригодности для реализации поставленной цели. Отличительная особенность данной стадии проектирования — сравнение и анализ большого количества проектных альтернатив (плановых проекций ВС, сочетание элементов и т. д.) [3-6]. Сравнение проектных альтернатив и выбор рационального решения производятся на основе сопоставления характеристик, которыми обладает та или другая проектная альтернатива, в различных условиях ее функционирования (скорость ВС, высота полета, дальность полета и др.). В этой связи появляется необходимость в анализе большого числа статистических данных в некотором доверительном интервале.

При проектировании ВС применяется специальный математический аппарат, ПО для анализа и систематизация результатов специальных летных испытаний, технологии концептуального проектирования, опирающиеся на последовательно наращиваемый научно-технический задел, а также методы статистического анализа, но комплексно задача поиска оптимального проектного решения в виде прикладного ПО — не реализована [7-9].

Предлагаемый в работе метод включает в себя традиционные принципы проектирования, программно-реализованные в единой информационной среде сочетающиеся с авторской методикой, построенной на применении методов статистической обработки информации, поз-

воляющий найти вектор параметров при выбранном критерии эффективности на этапе предварительного проектирования.

Постановка задачи. Задача формирования облика на этапе разработки технического предложения может быть сформулирована в следующей постановке: найти такой вектор параметров, характеризующих форму, структуру и размеры ВС, который бы обеспечивал удовлетворение требований и ограничений, предъявляемых к ВС и достижения минимума (максимума) целевой функции.

Процесс проектирования начинается исходя из условий физической реализуемости и удовлетворения системы фундаментальных соотношений уравнений весового баланса, гравитационного баланса, энергетического баланса, устойчивости и балансировки ВС.

$$\sum m_i - 1 = 0; n_y m_q - Y = 0; \quad (1)$$

$$P - X - m \frac{dV}{dt} = 0; \bar{x}_T - \bar{x}_F + m_z^c y = 0; m_z = 0.$$

В качестве глобального критерия эффективности выбираем взлетную массу ВС, m_0 , т.к. значения дальности полета, крейсерской скорости, полезной нагрузки, стоимости и ресурса частей, а также заданная длина ВПП соизмеримы, (рис. 1.).

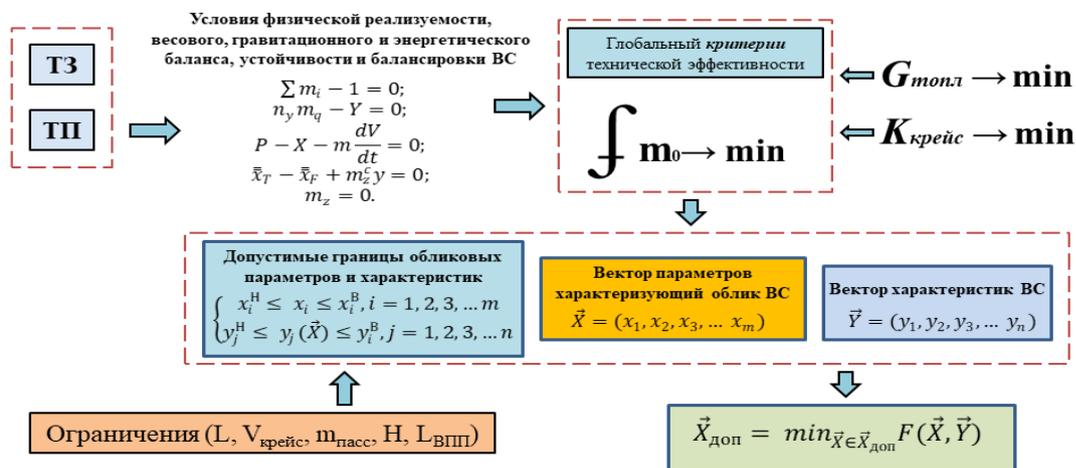


Рис. 1. Традиционный подход к задаче формирования облика магистрального ВС на этапе разработки технического предложения

Fig. 1. Traditional approach to the task of forming the appearance of the main aircraft at the stage of developing a «feasibility stage»

Частными критериями технической эффективности выступают аэродинамическое качество на крейсерском режиме полета $K_{крейс}$ и величина топливной эффективности $G_{топл}$.

Совокупность параметров, подлежащих вычислению и оптимизации, образуют вектор параметров, характеризующий облик ВС

$$\vec{X} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (2)$$

Характеристики ВС, зависящие от параметров $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$, образуют вектор характеристик ВС

$$\vec{Y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad (3)$$

Параметры, задающие облик и характеристики, связаны между собой некоторыми зависимостями.

При математической формулировке задачи удовлетворение требованиям системы равенств 1, выполняется системой ограничений, состоящей из вектора параметров \vec{X} и вектора \vec{Y} , записываемой в виде системы неравенств

$$\begin{cases} x_i^H \leq x_i \leq x_i^B, i = 1, 2, 3, \dots, m \\ y_j^H \leq y_j(\vec{X}) \leq y_j^B, j = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

где x_i^H – нижняя допустимая граница обликвого параметра; x_i^B – верхняя допустимая граница обликвого параметра; y_j^H – нижняя допустимая граница характеристики; y_j^B – верхняя допустимая граница характеристики.

Вектор \vec{X} , принадлежащий области допустимых решений ($\vec{X} \in \vec{X}_{\text{доп}}$), определяет возможную проектную альтернативу.

Тогда при выбранном критерии эффективности m_0 , среди допустимых вариантов, может существовать такой вектор параметров \vec{X} , доставляющий экстремум величины критерия оптимальности, при котором $m_0 \rightarrow \min$ с сохранением вектора характеристик \vec{Y} , удовлетворяющего требованиям в пределах выбранных ограничений [10, 11, 12, 13], приобретает вид

$$\vec{X}_{\text{доп}} = \min_{\vec{X} \in \vec{X}_{\text{доп}}} F(\vec{X}, \vec{Y}) \quad (5)$$

В сложившихся условиях появляется необходимость в разработке нового подхода и разработке методики, принципы построения которой не были бы жестко привязаны к эмпирическим зависимостям и существующим расчетным формулам.

Методы исследования. В исследовании использованы методы статистического анализа, математического моделирования, экспериментального исследования и численный метод. Безусловно, и современные подходы в области автоматизированного проектирования ВС, отраслевые обзорно-аналитические материалы, принцип системного анализа, математической логики, технологии объектно-ориентированного программирования.

Обсуждение результатов. Рассматриваемое множество альтернативных векторов схемных решений, с учетом выражения (2), параметры, описывающие облик, образуют матрицу векторов схемных решений

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} x_{11}, & x_{12}, & x_{13}, & \dots & x_{1m} \\ x_{21}, & x_{22}, & x_{23}, & \dots & x_{2m} \\ x_{31}, & x_{32}, & x_{33}, & \dots & x_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1}, & x_{i2}, & x_{i3}, & \dots & x_{im} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Характеристики, зависящие от параметров для выражения (6), образуют матрицу характеристик, зависящих от векторов параметров \vec{X} . Ограничения представляют собой набор характеристик, заданных техническим заданием. Для магистрального ВС выполняющего функцию «тонна–километр» к таким характеристикам относят L , $V_{\text{крейс}}$, $m_{\text{пасс}}$, H , $L_{\text{ВПП}}$ и т.д.

$$\vec{Y} = \begin{pmatrix} y_{11}, & y_{12}, & y_{13}, & \dots & y_{1n} \\ y_{21}, & y_{22}, & y_{23}, & \dots & y_{2n} \\ y_{31}, & y_{32}, & y_{33}, & \dots & y_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{i1}, & y_{i2}, & y_{i3}, & \dots & y_{in} \end{pmatrix} \quad (7)$$

С учетом выражения (5), проведем преобразования выражений (6, 7) и, исходя из предположения, что каждая альтернативная схема вектора проектных решений \vec{X} , описывают отдельно взятую проектную альтернативу (8), (рис. 2.).

В качестве альтернативных схем проектных решений возьмем параметры среднемагистральных ВС [14-17].

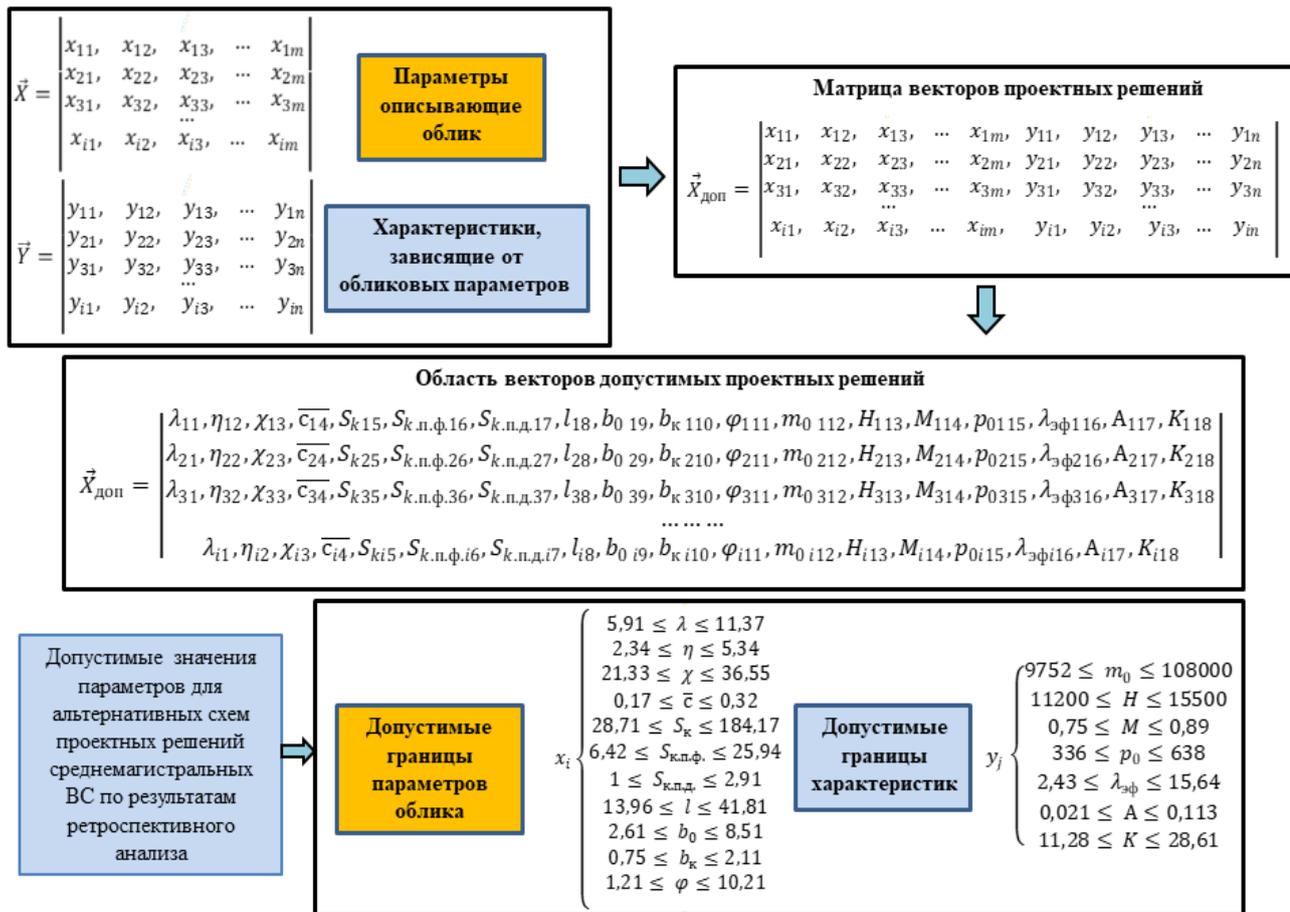


Рис. 2. Альтернативные вектора схемных решений
 Fig. 2. Alternative vectors of circuit solutions

$$\vec{X}_{\text{доп}} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} & y_{11} & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} & y_{21} & y_{22} & y_{23} & \dots & y_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3m} & y_{31} & y_{32} & y_{33} & \dots & y_{3n} \\ \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{im} & y_{i1} & y_{i2} & y_{i3} & \dots & y_{in} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Рассматривалась группа параметров, характеризующая плановые проекции, соотношение площадей, режимные характеристики, массовые характеристик, удельные величины и аэродинамические характеристики.

Допустимые границы обликовых параметров для выборки среднемагистральных ВС лежат в следующих пределах (9), границы характеристик (10). Применяя разработанное прикладное ПО, осуществляем идентификацию параметров, в наибольшей степени, характеризующих облик и характеристики ВС в заданном конструктивном и обливовом базисе — базовые параметры, (рис. 3.). Зная базовые параметры, можно провести прогнозирование для остальных параметров. При заданных ограничениях ($L, V_{\text{крейс}}, m_{\text{пасс}}, H, L_{\text{ВПП}}$), параметрах характеризующих облик ВС ($X_i^H \leq X_i \leq X_i^B$) и характеристик, зависящих от вектора параметров ($Y_i^H \leq Y_i \leq Y_i^B$) осуществляем исследование параметрической модели, прогнозируя поведения целевой функции (5) в окрестностях оптимума при выбранных частных критериях технической эффективности.

$$x_i \left\{ \begin{array}{l} 5,91 \leq \lambda \leq 11,37 \\ 2,34 \leq \eta \leq 5,34 \\ 21,33 \leq \chi \leq 36,55 \\ 0,17 \leq \bar{c} \leq 0,32 \\ 28,71 \leq S_k \leq 184,17 \\ 6,42 \leq S_{к.п.ф.} \leq 25,94 \\ 1 \leq S_{к.п.д.} \leq 2,91 \\ 13,96 \leq l \leq 41,81 \\ 2,61 \leq b_0 \leq 8,51 \\ 0,75 \leq b_k \leq 2,11 \\ 1,21 \leq \varphi \leq 10,21 \end{array} \right. \quad (9)$$

$$y_j \left\{ \begin{array}{l} 9752 \leq m_0 \leq 108000 \\ 11200 \leq H \leq 15500 \\ 0,75 \leq M \leq 0,89 \\ 336 \leq p_0 \leq 638 \\ 2,43 \leq \lambda_{эф} \leq 15,64 \\ 0,021 \leq A \leq 0,113 \\ 11,28 \leq K \leq 28,61 \end{array} \right. \quad (10)$$



Рис. 3. Определение параметров в наибольшей степени, характеризующих облик и характеристики ВС
Fig. 3. Determination of the parameters to the greatest extent characterizing the appearance and characteristics of the aircraft

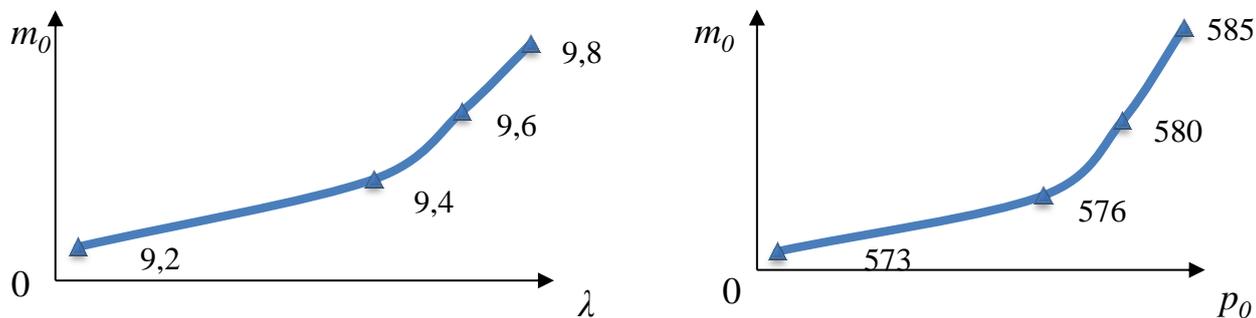
Задавая значения величин базовых параметров, в пределах накладываемых ограничений по верхним и нижним допустимым границам, выражения (9) и (10) получаем точные прогнозируемые значения для остальных параметров, заданных пользователем в ПО.

Например, регрессионная модель для определения площади крыла S_k , представляется выражением (11). Точность модели составляет 0,0000000048690833.

$$y(i,j5)=+(-0,24027074428336e1)*(x(i,j1))^{*3}+(-0,64993340925421e2)*(x(i,j1))^{*2}+(-0,56252961254156e3)*(x(i,j1))^{*1}+(0,15675099196579e2)*(x(i,j2))^{*3}+(-0,16829976851017e3)*(x(i,j2))^{*2}+(0,56567791075881e3)*(x(i,j2))^{*1}+(0,22553122128366e4)*(x(i,j4))^{*3}+(0,52855350089931e4)*(x(i,j4))^{*2}+(-0,27296074533104e4)*(x(i,j4))^{*1}+(-0,24303434620509e-1)*(x(i,j6))^{*3}+(0,12167554502326e1)*(x(i,j6))^{*2}+(-0,13848148105156e2)*(x(i,j6))^{*1}+(0,15253265223630e4)*(x(i,j14))^{*3}+(-0,44474298172343e4)*(x(i,j14))^{*2}+(0,41947538627132e4)*(x(i,j14))^{*1}+(-0,17895797513960e-1)*(x(i,j18))^{*3}+(0,93225827308657e0)*(x(i,j18))^{*2}+(-0,12696418649272e2)*(x(i,j18))^{*1}+(0,10769019126818e3)$$

где * – умножение; ** – возведение в степень.

Совокупность регрессионных моделей для каждого параметра выступает математическим аппаратом, алгоритмом, в решение оптимизационной задачи по выбору состава вектора рациональных параметров. На рис. 4. представлено влияние величины удлинения крыла на взлетную массу ВС и влияние величины удельной нагрузки на крыло.



m_0 – взлетная масса ВС; λ – удлинение крыла; p_0 – удельная нагрузка на крыло
 m_0 - aircraft takeoff weight; λ - wing elongation; p_0 is the specific wing loading

Рис. 4. Зависимость взлетной массы ВС от величин удлинения крыла и удельной нагрузки

Fig. 4. The dependence of the take-off weight of the aircraft on the values of wing elongation and specific load

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- путем применения прикладного ПО при расчете элементов ВС, с погрешностью расхождения от результатов физического и математического моделирования в пределах 7 %;
- использованием аттестованного и поверенного измерительного оборудования;
- применением сертифицированного программного обеспечения ANSYS Fluent и открытой интегральной платформы SALOME, верифицированного на задачах расчета по методу стандартных блоков.

В современной практике проектирования относительная масса крыла находится в следующих допустимых значениях, (рис. 5).

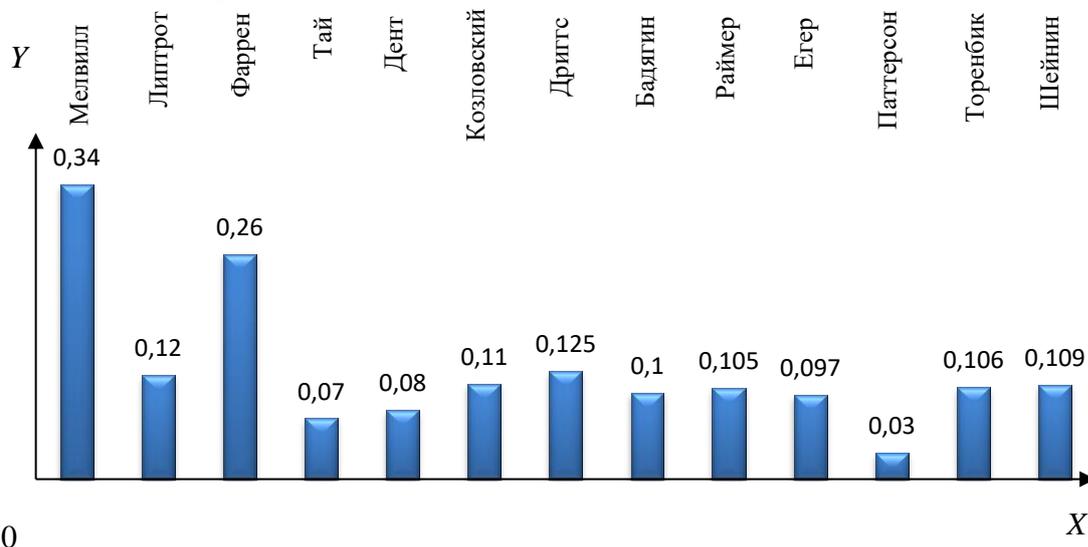


Рис. 5. Диапазон доверительных относительных масс крыла для магистральных ВС, вычисленных по различным методикам проектирования

Fig. 5. Confidence range of relative wing weight for aircraft calculated according to various design methods

В случае если величина относительной массы крыла находится в доверительных пределах, можно переходить к следующим стадиям проектирования. Для определения значений исследуемых параметров магистрального ВС с учетом накладываемых ограничений необходимо провести прогноз по построенным полиномиальным моделям на базовых параметрах. В качестве примера представлено решение задачи по определению рационального состава параметров крыла среднемагистрального ВС и компоновки элементов «Крыло+дополнительная аэродинамическая поверхность (ДАП)», (рис. 6.).

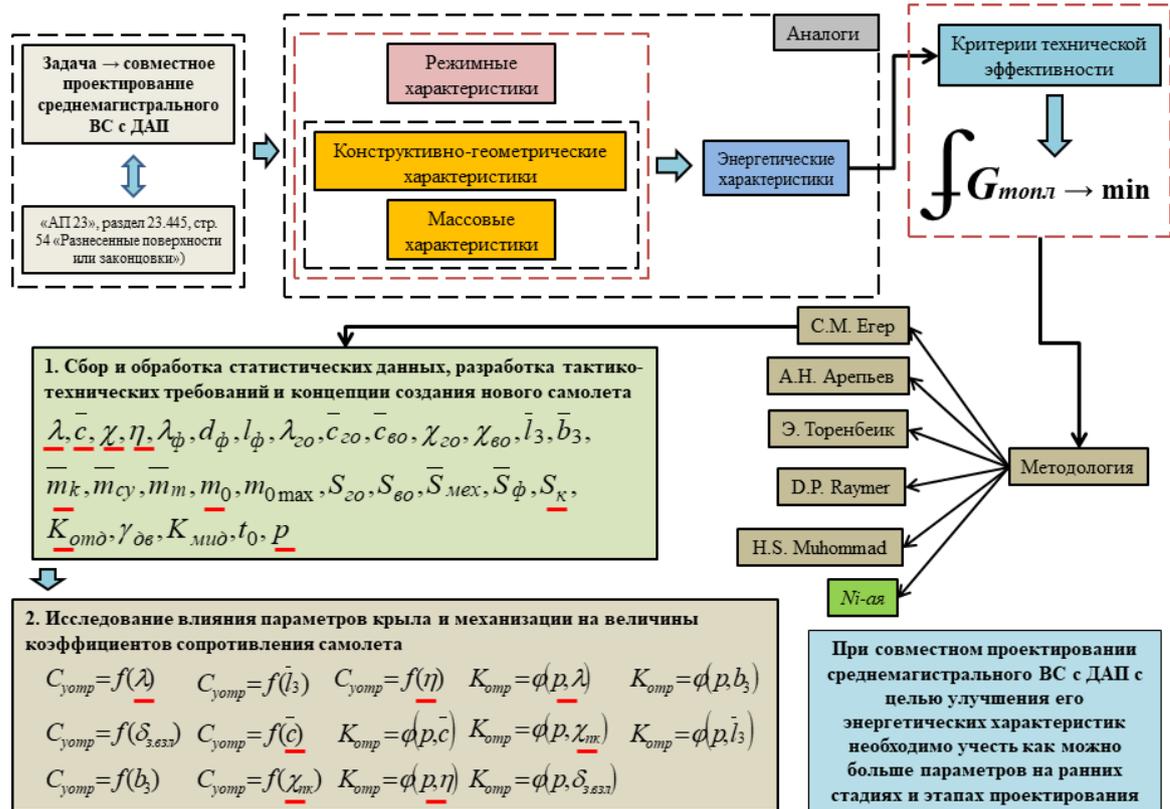


Рис. 6. Постановка оптимизационной задачи по определению рационального состава параметров крыла ВС
 Fig. 6. Formulation of the optimization problem to determine the rational composition of the aircraft wing parameters

Предложенная в рамках НИР методика на примере элементов магистрального ВС в сочетании с прикладным ПО, реализующие выбор параметров и поиск рационального состава параметров на ранних стадиях и этапах проектирования магистрального ВС, позволяют обеспечить искомые характеристики для проектируемого ВС и его составных элементов.

В классическом подходе учет наличия в составе облика ВС законцовки, начинается при определении массы ВС в первом приближении. Оптимизация проектных параметров, влияющих на аэродинамические характеристики, осуществляется непосредственно после определения взлетной массы, тогда как оценка аэродинамических характеристик проводится после составления компоновочных чертежей и центровочных ведомостей. Т.е. учет влияния законцовки на аэродинамические характеристики ВС происходит на слишком поздних стадиях проектирования, когда ряд важных решений уже принят.

Предлагаемый подход к процессу совместного проектирования магистрального ВС и законцовки позволяет провести анализ и выбор состава проектно-конструкторских параметров на стадиях, предшествующих расчету взлетной массы, учитывает значительный объем исходной информации (рис. 7.).

Центральным ядром модели является проектируемое ВС, для проектирования которого предлагается применять совокупность разработанных методов. Комплекс средств автоматизации проектирования (КСАП) позволяет реализовывать процесс выбора состава проектно-конструкторских параметров магистрального ВС на различных иерархических уровнях в единой информационной среде по предлагаемым методам (рис. 8.). Предлагаемый метод на примере элементов магистрального ВС позволяет на ранних стадиях и этапах проектирования обеспечить искомые характеристики при наложенных ограничениях.

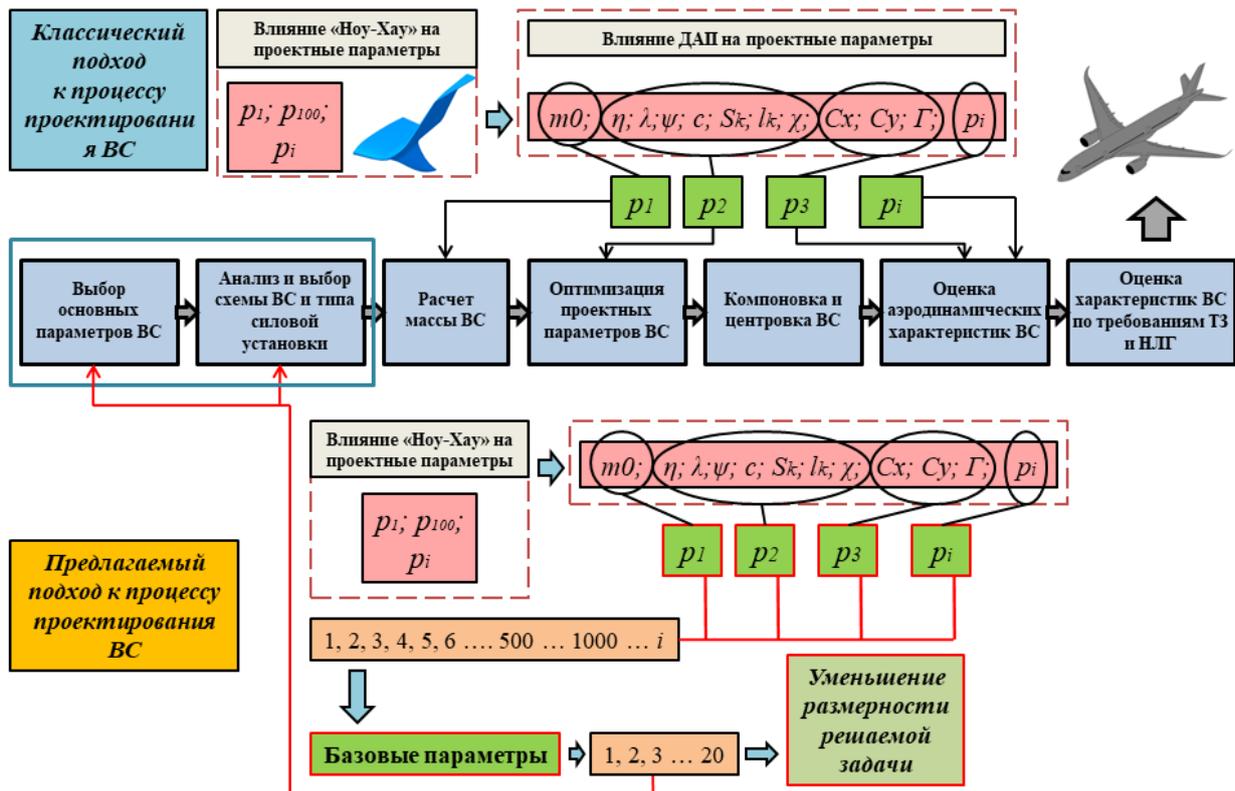


Рис. 7. Предлагаемый подход к процессу формирования облика магистрального ВС
 Fig. 7. The proposed approach to the process of forming the appearance of the main aircraft

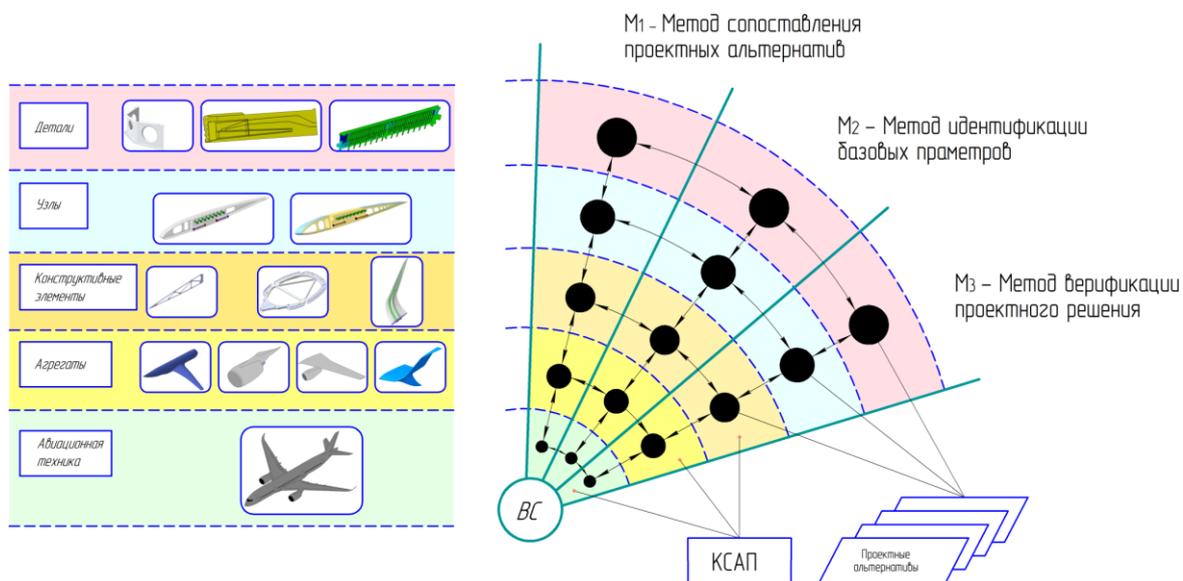


Рис. 8. Модель взаимосвязи разработанных методов выбора состава проектно-конструкторских параметров магистрального ВС

Fig. 8. A model of the relationship between the developed methods for selecting the composition of aircraft design parameters

Результаты приняты в проектную и конструкторскую деятельность АО ПО «Стрела», филиал АО ВПК «НПО машиностроение» – КБ «Орион», а также в АО Государственная корпорация «Ростех», «РТ-Техприемка». Проектные альтернативы в предлагаемой модели в соответствии с заложенным принципом проектирования передают соответствующие параметры на последующие иерархические уровни, а в пределах одного иерархического уровня реализуется возможность обмена между параметрами проектных альтернатив для решения той или иной задачи по разработанным методам.

Общение (связь) между орбитами реализуется за счет передачи файла модели, который содержит информацию о геометрических элементах, атрибутах, свойствах и характеристиках, которые рассматриваются как единое целое, представляя собой набор параметров упорядоченных и связанных в систему, обладающую некоторыми свойствами (характеристиками). Отдельно взятый сектор представляет собой область допустимых решений для проектной альтернативы.

Вывод. Представленные результаты НИР легли в основу концепции формирования облика, математического и прикладного ПО реализующего методику выбора состава рациональных проектно-конструкторских параметров, что позволило комплексно учитывать параметры прямо или косвенно влияющие на характеристики ВС в целом при одинаковых условиях выполнения показателей эффективности на иерархическом уровне, применительно к различным типам ВС и отдельным составным элементам.

Язык программирования C++ позволил гибко интегрировать разработанное ПО на предприятия авиационного и оборонно-промышленного кластера.

Благодарности. Работа выполнена в рамках стипендии Президента РФ № СП-3606.2018.1 от 29.12.2017 г., для молодых ученых и аспирантов на выполнение научного исследования по теме «Методология автоматизированного синтеза проектных и конструкторских параметров транспортной техники нового поколения».

Библиографический список:

1. Федеральная целевая программа «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы». СПС «Консультант +».
2. Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолётов : учеб. пособие для студентов авиационных специальностей вузов. М. : Машиностроение, 1986. 232 с.
3. Белоцерковский А.С. Создание и применение математических моделей самолетов. М.: Наука, 1984, 144 с.
4. Концептуальное проектирование самолёта : учеб. пособие / В.А. Комаров [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 120 с.
5. Халиулин В.И. Анализ характеристик вертолета нетрадиционной компоновки / В.И. Халиулин, А.М. Гирфанов, Н.В. Левшонков // *Авиационная промышленность*, 2019. № 2. С. 16-19. 4 с.
6. Raymer D.P. Aircraft Design: A Conceptual Approach. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
7. Gorbunov A.A. Implementation of the functional simulator of aircraft elements design procedures at the stage of the life limit / A.A.Gorbunov, A.D. Pripadchev, I.S. Bykova // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 1, No. 13. pp. 4019-4026.
8. Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение/гл. ред. А.Г. Братухин. М. : ОАО «НИЦ АСК», 2015. 608 с.
9. Бурнаев Е.В., Зайцев А.А. Суррогатное моделирование разноточных данных в случае выборок большого размера // *Информационные процессы*. 2015. Т. 15, № 1. С. 97–109.
10. Lakshmi S.V. A Study on a Common Fixed Point Theorem / S.V. Lakshmi // *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*. 2016. Vol 8. № 1pp. 67-71.
11. Choudhary R. Fixed Point Results in Parametric Metric Space / R. Choudhary, A.K. Garg // *International Journal on Emerging Technologies*. 2019. Vol 10. No. 2b. pp. 100-104.
12. Khan S.S. Soft Computing- A Journey from Statistics / S.S. Khan // *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*. 2017. Vol 9. № 2. pp. 260-268.
13. Sathiyakumari K. Overlapping Community Structure Detection using Twitter Data / K. Sathiyakumari, M.S. Vijaya // *International Journal on Emerging Technologies*. 2020. Vol 11. No 1. pp. 101-107.
14. Garg U.K. Optimization of Process Parameters for Metal Ion Remediation using Agricultural Waste materials / U.K. Garg, H.K. Garg // *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*. 2016. Vol 8. No. 1. pp. 17-24.
15. Brandon B. Developing Mathematical Models for Computer Control, USA Journal, 1959, V.S, No 7.
16. Khan S. Analysis of Cloud Computing for Security Issues and Approaches / S. Khan, S. Sharma // *International Journal on Emerging Technologies*. 2019. Vol 10. No. 1. pp. 68-73.
17. Gorbunov A.A. Identification of the basic parameters of the aircraft wing / A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev, V.I. Chepasov // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 5. pp. 415 – 418. DOI: 10.3103/S1068798X18050076

References:

1. Federal'naya celevaya programma «Razvitie aviacionnoj promyshlennosti na 2013–2025 gody». – SPS «Kon-sul'tant +» [Federal target program "Development of the aviation industry for 2013–2025". SPS "Consultant +". (In Russ)]

2. Eger S.M., Lisejcev N.K., Samojlovich O.S. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya samolyotov : ucheb. posobie dlya studentov aviacionnyh special'nostej vuzov.* – М. : Mashinostroenie, 1986. 232 s.[Eger S.M., Lisey-tsev N.K., Samoilovich O.S. *Basics of computer-aided aircraft design: textbook. manual for students of aviation specialties of universities.* M.: Mechanical Engineering, 1986. 232 p. (In Russ)]
3. Belotserkovskij A.S. *Sozдание i primeneniye matematicheskikh modelej samoletov.* М. : Nauka, 1984. 144 s.[Belotserkovsky A.S. *Creation and application of mathematical aircraft models.* Moscow: Nauka, 1984, 144 p. (In Russ)]
4. *Konceptual'noe proektirovaniye samolyota : ucheb. posobie / V.A. Komarov [i dr.]. – 2-e izd., pererab. i dop.* – Samara : Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2013. – 120 s.[*Conceptual aircraft design: textbook. allowance / V.A. Komarov [and others]. 2nd ed., Rev. and add.* Samara: Publishing house Samar. state aerospace. un-ta, 2013.120 p. (In Russ)]
5. Haliulin V.I. *Analiz harakteristik vertoleta netradicionnoj komponovki / V.I. Haliulin, A.M. Girfanov, N.V. Levshonkov // Aviacionnaya promyshlennost', 2019. № 2. S. 16-19. 4 s.*[Khaliulin V.I. *Analysis of the characteristics of an unconventional helicopter / V.I. Khaliulin, A.M. Girfanov, N.V. Levshonkov // Aviation Industry, 2019. No. 2. pp. 16-19. 4 sec.* (In Russ)]
6. Raymer D.P. *Aircraft Design: A Conceptual Approach.* Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
7. Gorbunov A.A. *Implementation of the functional simulator of aircraft elements design procedures at the stage of the life limit / A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev, I.S. Bykova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. 13. pp. 4019-4026.*
8. *Mezhdunarodnaya enciklopediya CALS. Aviacionno-kosmicheskoe mashinostroenie / gl. red. A.G. Bratuhin. – М. : OAO «NIC ASK», 2015. – 608 s. [. International encyclopedia CALS. Aerospace engineering / Ch. ed. A.G. Bratukhin. M.: JSC "NIC ASK", 2015. 608 p. (In Russ)]*
9. Burnaev E.V., Zajcev A.A. *Surrogatnoe modelirovaniye raznotochnykh dannykh v sluchae vyborok bol'shogo razmera // Informacionnye processy. 2015. T. 15, № 1. S. 97–109.*[Burnaev E.V., Zaitsev A.A. *Surrogate modeling of multi-precision data in the case of large samples // Information processes. 2015.Vol. 15, No. 1.pp. 97–109.* (In Russ)]
10. Lakshmi S.V. *A Study on a Common Fixed Point Theorem / S.V. Lakshmi // International Journal of Theoretical & Applied Sciences. 2016. Vol 8. No. 1. pp. 67-71.*
11. Choudhary R. *Fixed Point Results in Parametric Metric Space / R. Choudhary, A.K. Garg // International Journal on Emerging Technologies. 2019. Vol 10. No. 2b. pp. 100-104.*
12. Khan S.S. *Soft Computing- A Journey from Statistics / S.S. Khan // International Journal of Theoretical & Applied Sciences. 2017. Vol 9. No. 2. pp. 260-268.*
13. Sathiyakumari K. *Overlapping Community Structure Detection using Twitter Data / K. Sathiyakumari, M.S. Vijaya // International Journal on Emerging Technologies. 2020. Vol 11. No. 1. pp. 101-107.*
14. Garg U.K. *Optimization of Process Parameters for Metal Ion Remediation using Agricultural Waste materials / U.K. Garg, H.K. Garg // International Journal of Theoretical & Applied Sciences. – 2016. – Vol 8. – № 1.– P. 17-24.*
15. Brandon B. *Developing Mathematical Models for Computer Control, USA Journal, 1959, V.S, N 7.*
16. Khan S. *Analysis of Cloud Computing for Security Issues and Approaches / S. Khan, S. Sharma // International Journal on Emerging Technologies. 2019. Vol 10. No. 1. pp. 68-73.*
17. Gorbunov A.A. *Identification of the basic parameters of the aircraft wing / A.A. Gorbunov, A.D. Pripadchev, V.I. Chepasov // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No.5. pp. 415 – 418. DOI: 10.3103/S1068798X18050076.*

Сведения об авторах:

Горбунов Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов; e-mail: gorbynovaleks@mail.ru

Припадчев Алексей Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры летательных аппаратов; e-mail: apripadchev@mail.ru

Information about the authors:

Aleksandr A. Gorbunov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Aircraft; e-mail: gorbynovaleks@mail.ru

Aleksey A. Pripadchev, Doctor. Sci. (Technical), Prof., Prof. Department of Aircraft; e-mail: apripadchev@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.08.2020.

Принята в печать 14.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.08.2020.

Accepted for publication 14.09.2020.

Для цитирования: Д.А. Гура, Н.М. Кирюникова, Э.Д. Лесовая, Н.И. Хушит, А.П. Павлюкова. Программное обеспечение системы наблюдений за состоянием объектов инфраструктуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 60-70. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-60-70
For citation: D.A. Gura, N.M. Kiryunikova, E.D. Lesovaya, N.I. Husht, A.P. Pavlyukova. Software for monitoring the state of infrastructure facilities. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 60-70. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-60-70

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

УДК 303.732.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-60-70

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ
ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Д.А. Гура, Н.М. Кирюникова, Э.Д. Лесовая, Н.И. Хушит, А.П. Павлюкова
Кубанский государственный технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Россия

Резюме. Цель. Целью данной работы является разработка концепции системы наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры с применением технологии трёхмерного лазерного сканирования и обработки полученных данных с помощью специализированного программного обеспечения. **Метод.** Основополагающими методами при проведении исследования являются аналитический метод, заключающийся в обзоре и системном анализе существующих способов мониторинга зданий и сооружений и разработке на их основе технологической схемы наблюдения за объектами инфраструктуры; метод эмпирического системного анализа; инструментальный метод, представленный проведением полевой съемки в рамках периодического деформационного геодезического мониторинга с помощью наземного лазерного сканера Leica ScanStation C10 для получения исходной пространственной информации. Объектом исследования является искусственное дорожно-транспортное сооружение в г. Краснодаре (Тургеневский мост). Предмет исследования - целесообразность применения периодического деформационного геодезического мониторинга и базирующейся на его основе системы наблюдений за состоянием объектов инфраструктуры. **Результат.** Результатом исследования является разработка концепции системы периодического мониторинга за состоянием инфраструктурных объектов с выявлением характера и степени протекающих в них в процессе эксплуатации деформационных процессов, базирующейся на применении технологии трехмерного наземного лазерного сканирования. **Вывод.** Применение системы наземного лазерного сканирования за счет своего быстродействия и высокой точности обеспечивает получение максимально полной информации о контроле характера и видах деформационных изменений сканируемых объектов с целью автоматизации процесса мониторинга в рамках обеспечения их безопасности.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-233020 «Исследование возможности использования комплекса трехмерного лазерного сканирования для мониторинга и обеспечения безопасности инфраструктурных объектов в городе Краснодаре и Краснодарском крае».

Ключевые слова: система наблюдения за состоянием объектов, геодезический мониторинг, объекты инфраструктуры, виды деформаций, наземное лазерное сканирование

SOFTWARE FOR MONITORING THE STATE OF INFRASTRUCTURE FACILITIES

D.A. Gura, N.M. Kiryunikova, E.D. Lesovaya, N.I. Husht, A.P. Pavlyukova

Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this work is to develop the concept of a system for monitoring the state of infrastructure facilities using 3D laser scanning technology and processing the obtained data using specialized software. **Methods.** The primary methods used in this study are the analytical method, which consists in reviewing and system analysis of existing methods for monitoring buildings and structures and developing a technological scheme for monitoring infrastructure objects based on them, the method of empirical system analysis, and the instrumental method presented by conducting field surveys in the framework of periodic strain geodetic monitoring using a Leica ScanStation C10 ground laser scanner to obtain initial spatial information. The object of research is an artificial road transport structure in Krasnodar (Turgenevsky bridge). The subject of the study is the feasibility of using periodic strain geodetic monitoring and the system monitoring the state of infrastructure facilities. **Results.** The research result is the development of a concept for a system for the periodic state monitoring of infrastructure facilities with the identification of the nature and degree of strain processes occurring in them during operation, based on the use of 3D ground laser scanning technology. **Conclusion.** The use of a ground laser scanning system, due to its speed and high accuracy, provides the complete information about the control of the nature and types of strain changes of scanned objects in order to automate the monitoring process to ensure their safety.

Acknowledgement. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Administration of the Krasnodar Region of the Russian Federation within the framework of the scientific project No. 19-48-233020 "Study of the possibility of using a three-dimensional laser scanning complex for monitoring and ensuring the safety of infrastructure facilities in the city of Krasnodar and Krasnodar Territory."

Key words: facility condition monitoring system, geodetic monitoring, infrastructure facilities, strain types, ground laser scanning

Введение. Основное назначение системы наблюдений за состоянием объектов инфраструктуры состоит в исключении рисков обрушения и обеспечении безопасной эксплуатации инфраструктурного объекта. В целом, анализ технического состояния объектов инфраструктуры позволяет своевременно определить зарождающийся и развивающийся процесс деформации, выявить причины его появления и спрогнозировать процесс развития с целью принятия превентивных мер [1].

Организация системы наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры – одна из наиболее важных и наукоемких задач в строительстве. Причиной этому являются сложности, связанные с проведением натурного и инструментального обследования отдельных труднодоступных конструктивных элементов, в том числе в составе аварийно опасных объектов инфраструктуры при необходимости прогнозирования оставшегося срока его эксплуатации до частичного или полного обрушения с исключением вероятности возникновения опасности для жизни и здоровья людей. Необходимо отметить, что объекты инфраструктуры обеспечивают нормальное функционирование и эксплуатацию населением жизненно необходимых объектов, которые можно классифицировать следующим образом: жилые дома; дошкольные образовательные учреждения; высшие учебные заведения; розничные предприятия (магазины, супермаркеты); заведения общественного питания; медицинские учреждения; финансовые учреждения; строительные и транспортные сооружения (мосты, тоннели, объекты метрополитена); социально-культурные объекты (театры, культурные центры) и др. [2].

Постановка задачи. Для обеспечения безопасной эксплуатации вышеперечисленных объектов необходима система наблюдений за их состоянием. В настоящее время, классическая технология мониторинга базируется на применении геодезических приборов, таких как электронные тахеометры. Методика их использования заключается в фиксации большого количе-

ства точек на объекте и в последовательном наведении на каждую из них с попутным выполнением измерений вручную или в автоматизированном режиме в случае, если прибор роботизирован. Необходимо отметить, что существенными недостатками электронного тахеометра как инструмента проведения периодического мониторинга объектов инфраструктуры является значительное влияние погодных условий (дождь, освещенность и т.п.), длительность проведения цикла мониторинга и невозможность получения информации о деформационных процессах в тех участках, где не планировалось устанавливать марки для наблюдения изначально [3].

С целью устранения указанных недостатков, в данном исследовании предлагается использование технологии наземного лазерного сканирования, позволяющего в автоматизированном режиме обеспечить выявление деформационных процессов на исследуемом объекте (изменение геометрических параметров объекта в процессе эксплуатации) [4].

Контроль над состоянием и развитием деформационных процессов может быть достигнут путем решения следующих задач:

- обеспечение безопасного и своевременного обнаружения на ранней стадии изменений состояния конструкций, которые могут привести к переходу объектов в ограниченное эксплуатационное или аварийное состояние (в том числе за счет применения технологии трехмерного лазерного сканирования);
- отслеживание степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятие экстренных мер по предотвращению его обрушения в случае необходимости (периодический мониторинг), в том числе путем принятия мер по устранению возникающих факторов, приводящих к ухудшению технического состояния объектов инфраструктуры [5].

Возвращаясь к технологии трехмерного лазерного сканирования в составе системы наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры, необходимо отметить, что она будет иметь следующий общий концептуальный вид (рис.1).

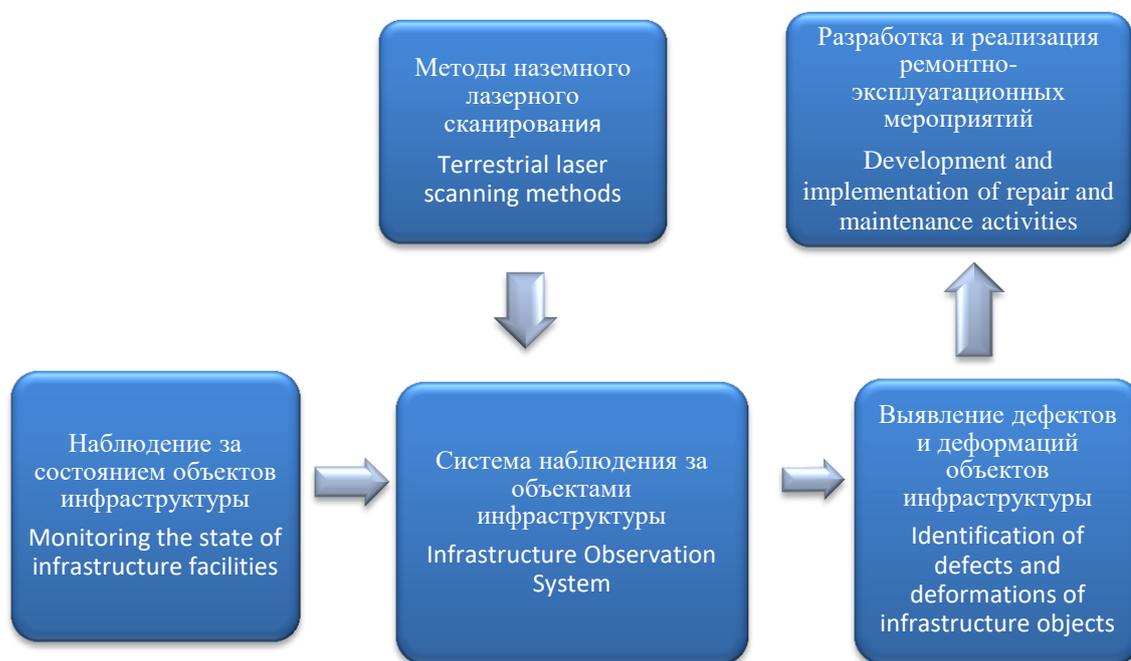


Рис.1. Структура системы наблюдения за объектами инфраструктуры
Fig. 1. Structure of the infrastructure monitoring system

Такая система наблюдений за состоянием зданий и сооружений будет направлена на решение следующих задач:

- обеспечение сохранности объектов инфраструктуры при эксплуатации и проведении ремонтных работ;

- устранение риска разрушения и обрушения здания при строительстве и его дальнейшей эксплуатации;
- оценка и анализ текущего состояния объектов инфраструктуры;
- предотвращение незапланированных расходов при реконструкции объекта;
- анализ состояния не только наблюдаемого инфраструктурного объекта, но и объектов, которые находятся в непосредственной близости от данного объекта, и информация о котором получена в ходе наблюдений за исследуемым объектом [6].

Этапы проведения наблюдений за объектами инфраструктуры:

Функционирование классической системы наблюдения за объектами инфраструктуры состоит из двух этапов – подготовительного и рабочего.

Подготовительный этап включает в себя:

- анализ исходной информации по результатам обследования объектов инфраструктуры;
- установку маяков и датчиков обнаружения трещин;
- определение степени и вида деформаций объектов инфраструктуры;
- установку геодезических отметок на цоколе с привязкой к геодезической сети [7].

Рабочий этап включает в себя:

- контроль состояния маяков и датчиков на трещинах;
- геодезические измерения деформаций объектов инфраструктуры [8].

Система наблюдения за объектами инфраструктуры проводится для:

- предотвращения ухудшения состояния объекта;
- своевременного выявления изменения состояния объекта;
- обеспечения безопасной эксплуатации объекта, выражающегося своевременным выявлением деформаций и/или дефектов;
- контроля степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятия при необходимости экстренных мер по предотвращению его обрушения [9].

На каждом этапе функционирования системы наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры проводятся следующие работы:

- 1) определяются текущие динамические параметры объекта инфраструктуры и сравниваются с параметрами, измеренными на предыдущем этапе;
- 2) фиксируется степень изменения ранее выявленных и вновь появившихся дефектов и повреждений конструкций объекта;
- 3) проводятся повторные измерения деформаций, кренов, прогибов и т.д. и сравниваются со значениями аналогичных величин, полученных на предыдущем цикле;
- 4) анализируется полученная на предыдущих этапах информация о параметрах инфраструктурного объекта и делается вывод о его текущем техническом состоянии;
- 5) анализируется степень и характер протекающих в инфраструктурном объекте во время эксплуатации деформационных процессов, а также необходимость принятия тех или иных мер по предотвращению их дальнейшего развития [10].

Необходимо отметить, что в настоящее время экспертным путем выработаны следующие сроки периодичности проведения мониторинга объектов на основании текущих параметров их технического состояния:

- 1) если по результатам предварительной оценки категория технического состояния объекта соответствует исправному или работоспособному, то повторные измерения статических и динамических параметров проводятся через два года;
- 2) если по результатам повторных измерений изменения статических и динамических параметров не превышают 10%, то следующее измерение проводится еще через два года;
- 3) если по результатам предварительной оценки категория технического состояния объекта соответствует ограниченному эксплуатационному или аварийному состоянию, либо при повторном измерении статических и динамических параметров объекта результаты из-

мерений отличаются более чем на 10 %, то техническое состояние такого объекта подлежит обязательной внеплановой проверке [11-13].

Методы исследования. Предлагаемая к использованию для целей мониторинга технология трехмерного наземного лазерного сканирования обладает рядом преимуществ, по сравнению с классической системой мониторинга (рис.2).



Рис.2. Преимущества наземного лазерного сканирования

Fig. 2. Advantages of ground-based laser scanning

Наряду с приведенными преимуществами (рис.2), наземное лазерное сканирование на данный момент обладает следующими существенными недостатками: специальное техническое обслуживание; дорогостоящее программное обеспечение; высокая стоимость геодезического прибора; необходимость привлечения к работам квалифицированного специалиста [14].

Тем не менее, несмотря на указанный перечень недостатков, по отношению к конструктивно сложным и социально значимым объектам инфраструктуры, таким как мосты, тоннели, уникальные спортивные сооружения, использование лазерного сканирования оправдано за счет получаемого в короткие сроки колоссального объема данных для дальнейшего анализа состояния указанных объектов и обеспечения надежности и безопасности их эксплуатации [15].

Принцип действия системы наземного лазерного сканирования заключается в получении информации об окружающих объектах (в том числе о видах деформаций и дефектов) в форме облаков точек. Полученные облака точек на следующем этапе сшиваются при помощи специализированного программного обеспечения (например, например, Leica Cyclone Register), затем по полученной трехмерной модели объекта инфраструктуры вычисляются параметры, необходимые для выявления мест локализации и степени распространения протекающих в объекте деформационных процессов.

Так же, как и классическая система мониторинга объектов инфраструктуры с применением электронного тахеометра, технология наблюдения за состоянием инфраструктурных объектов путем использования наземного лазерного сканирования подразделяется на два этапа: полевой и камеральный [16, 17].

Полевой этап заключается в работе на станции сканирования и состоит из следующих действий:

- установка сканера в проекционной точке на штатив, высота которого устанавливается таким образом, чтобы обеспечить максимальный охват интересующей области (объекта) на одном сканировании;

- размещение вокруг сканера специальных марок, являющихся точками рабочей съемки обоснования;
- сканирование местности и объектов вокруг точки стояния сканера (если сканер оснащен цифровой камерой, то выполняется также цифровая фотосъемка);
- сканирование специальных марок с максимальным разрешением;
- перемещение сканера в следующую точку сканирования и повтор указанных выше пунктов [18].

Камеральный этап заключается в обработке данных, полученных в ходе лазерного сканирования, в том числе путем устранения «шумов» и так называемого «мусора» для формирования с помощью специализированного программного обеспечения высокоточной трехмерной модели.

В целом, метод наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры с использованием системы трёхмерного лазерного сканирования значительно эффективнее классического, так как лазерное сканирование делает возможным выполнение сплошной съемки с высокой скоростью и, как уже было отмечено ранее, позволяет за малое время осуществлять большой объем работ по анализу состояния различных инфраструктурных объектов.

Рассмотрим этап полевой съёмки на примере проведения периодического деформационного геодезического мониторинга с помощью наземного лазерного сканера Тургеневского моста (рис.3) в г. Краснодаре. Задача исследования состояла в выявлении отклонений текущих геометрических параметров моста в процессе эксплуатации от их изначальных проектных значений.



Рис.3. Выполнение измерений сканером Leica ScanStation C10

Fig. 3. Performing measurements with the Leica ScanStation C10 scanner

Для сканирования на этапе полевой съемки использовался наземный лазерный сканер Leica ScanStation C10. В начале работы было произведено визуальное обследование объекта и рекогносцировка прилегающей к нему территории для планирования размещения станций стояния сканера (в данном случае сканирование моста было произведено с семи станций) и связующих марок (количество связующих марок было равно трем).

Применяемые в процессе сканирования шестидюймовые (15,24 см) круглые марки представляли собой мишени со специальным светоотражающим покрытием. На каждой станции осуществлялись следующие сопутствующие сканированию процедуры, такие как: установка сканера, его нивелирование, тестирование, создание при необходимости панорамной фотографии объекта и прилегающей местности, непосредственно само сканирование и распознавание марок.

По времени весь процесс сканирования на каждой станции стояния занимал от 5 минут до 30 минут в зависимости от заданной величины дискретности производимой съемки и ширины области охвата сканирования. Так, при сканировании моста научно-исследовательской группой Кубанского государственного технологического университета была задана дискрет-

ность 5x5 см, выдержка – 64 с., разрешение 1920 x 1920 пикселей, область охвата сканирования составляла 360°x270°.

Обсуждение результатов. Результатом производства полевого этапа наземного лазерного сканирования Тургеневского моста стало облако точек (рис.4).

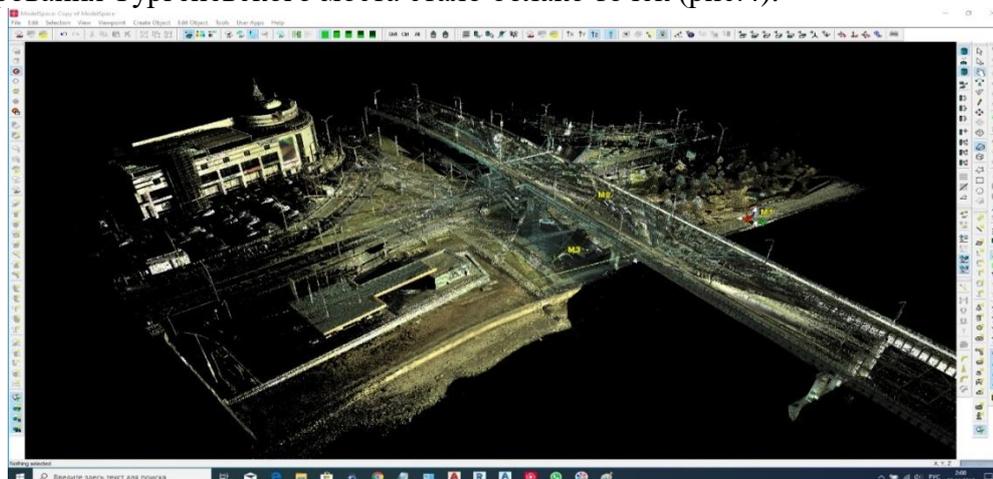


Рис.4. Облако точек, полученное в результате сканирования Тургеневского моста в г. Краснодаре

Fig. 4. Point cloud obtained from scanning the Turgenev bridge in Krasnodar

С использованием полученной пространственной информации, представленной в виде облаков точек, был реализован второй этап лазерного сканирования, заключающийся в сшивке в специализированном программном обеспечении Leica Cyclone облаков точек и последующем создании трехмерной модели моста для решения прикладных задач. В частности, в качестве одной из таких задач выступило измерение значений отклонений отдельных геометрических параметров указанного сооружения на предмет их колебаний в диапазонах допустимых значений, гарантирующих безопасность моста в процессе его эксплуатации.

В рамках указанного исследования были определены значения прогибов 4-х несущих балок моста, представленных на рис. 5.

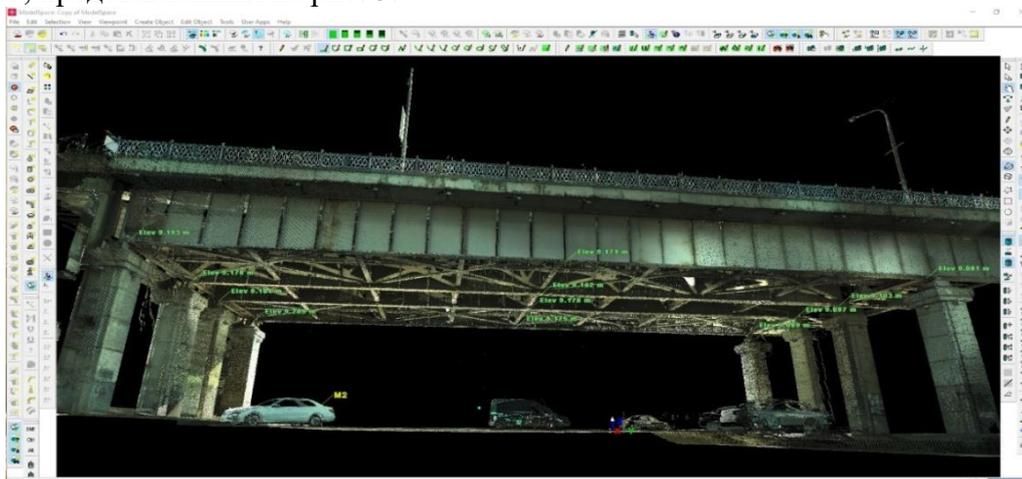


Рис. 5. Измерение высот балок по принципу трех измерений
Fig.5. Measurement of beam heights according to the principle of three dimensions

Для расчета прогибов балок по трехмерной модели моста были взяты измерения высот их расположения над поверхностью земли в местах стыка балок с несущими колоннами моста и в середине пролета между ними. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Измерение значений прогибов балок Тургеневского моста
Table 1. Measurement of the deflection values of the beams of the Turgenevsky bridge

№ балки Beam No.	Начало Start	Середина Mid	Конец End	Величина прогиба Deflection Amount
1	9,193	9,171	9,081	-0,034
2	9,178	9,162	9,103	-0,022
3	9,184	9,178	9,097	-0,038
4	9,205	9,175	9,089	-0,028

Исходя из представленных значений, прогибы несущих балок моста колеблются в пределах значений 2-4 см.

В соответствии с пунктом 5.43 СП 35.13330.2011. «Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84» вертикальные упругие прогибы пролетных строений, вычисленные при действии подвижной временной вертикальной нагрузки для автодорожных мостов не должны превышать значения $\frac{1}{400}l$, где l – расчетная длина пролета, м.

Рассчитаем предельно допустимое значение прогиба для пролета Тургеневского моста, при условии, что расчетная длина пролета $l = 48$ м и произведем сравнение полученных значений прогибов балок с допустимым значением.

$$\rho = \frac{1}{400}l = \frac{1}{400} \cdot 4800 = 12 \text{ см}$$

$$\rho_1 = 3,4 \text{ см} < \rho$$

$$\rho_2 = 2,2 \text{ см} < \rho$$

$$\rho_3 = 3,8 \text{ см} < \rho$$

$$\rho_4 = 2,8 \text{ см} < \rho$$

Опираясь на произведенные расчеты, можно сделать вывод о том, что по такому геометрическому параметру, как прогиб несущих балок, мост удовлетворяет требованиям безопасности.

Вывод. Выполненное исследование позволяет сделать вывод, что метод анализа состояния объектов инфраструктуры с помощью трехмерного лазерного наземного сканирования является достаточно перспективным и эффективным. Сканирование делает возможной сплошную съемку различных объектов инфраструктуры со значительной скоростью и позволяет за малое время осуществлять значительный объем измерений с высокой точностью и информативностью. Рассмотрено использование системы наземного лазерного сканирования, как одного из методов наблюдения за деформациями и дефектами, описаны этапы работ, выполняющиеся в процессе мониторинга, допустимые параметры для контроля состояния объекта инфраструктуры, преимущества лазерного сканирования, процесс проведения полевой съемки на примере Тургеневского моста в г. Краснодаре и выполнение обработки данных трехмерного лазерного сканирования в специализированном программном обеспечении.

Можно отметить несколько преимуществ системы наземного лазерного сканирования:

1. Мгновенная трехмерная визуализация;
2. Технология процесса выполнения работ интуитивно понятна;
3. Высокая точность;
4. Быстрый сбор данных;
5. Выявление деформаций на ранних стадиях эксплуатации объекта;
6. Информативность [19].

Материальные затраты по сбору данных и моделированию объектов инфраструктуры методами наземного лазерного сканирования на небольших участках и объектах значительно

превышают классические методы съемки. На сегодняшний день преимущества НЛС позволяют избежать дополнительных расходов на этапах проектирования и эксплуатации объектов инфраструктуры [20].

Более того, ввиду постоянного развития научно-технического прогресса, ожидается снижение стоимости оборудования для сканирования, что в ближайшие годы сделает его более применимым даже для менее значимых инфраструктурных объектов. Важно следить за состоянием объектов инфраструктуры, так как анализ технического состояния природных и искусственных сооружений в наши дни является необходимостью и неотъемлемой частью системы обеспечения безопасности. Регулярное сканирование (объектов инфраструктуры) позволит выявить деформации на ранних стадиях эксплуатации, что способствует предотвращению аварийных ситуаций на инфраструктурных объектах.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-233020 «Исследование возможности использования комплекса трехмерного лазерного сканирования для мониторинга и обеспечения безопасности инфраструктурных объектов в городе Краснодаре и Краснодарском крае».

Библиографический список:

1. Гура Д.А., Дубенко В.Ю., Бучацкий П.Ю., Марковский И.Г., Хушт Н.И. Мониторинг сложных объектов инфраструктуры // Вестник Адыгейского государственного университета. Раздел «Технические науки». Выпуск 4 (251) 2019.
2. Хашпакиязц Н.О., Грибкова И.С. Применение лазерного сканирования в землеустройстве и кадастрах. Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2017. №9. С. 27-35.
3. Шевченко, Г. Г. Анализ способов проведения геодезического мониторинга зданий и сооружений [Текст] / Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура // Современные исследования основных направлений гуманитарных и естественных наук: сборник научных трудов международной научно-теоретической конференции / Под ред. И. Т. Насретдинова; Казанский кооперативный институт (филиал) АНО ОВО ЦС РФ «Российский университет кооперации». Казань, 2017. С. 150–153.
4. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure / С. Koch, K. Georgieva, V. Kasireddy, B. Akinci, P. Fieguth // *Advanced Engineering Informatics*. 2015. Vol. 29, No. 2. pp. 196–210.
5. Емельянов М.В. Информационная технология проектирования систем мониторинга зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019.- Т.46, №1. – С. 123-131.
6. Эркал Б.Г., Джером Ф.Хаджар Обнаружение и количественное определение поверхностных повреждений на основе лазера с использованием предсказанных свойств поверхности // Автоматизация в строительстве. 2017. Т.83. С.285-302.
7. Kong E, Achikgoz S., Pendry S., Riley E., Deyong M. displaying deformations and displaying movements of masonry arch bridges using point cloud data // *Artificial structures*. Vol. 173. 2018. pp. 530-545.
8. Kim B., Cho S. Automated vision-based detection of cracks on concrete surfaces using a deep learning technique // *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 10. pp. 3452.
9. Сидоренко Ю.А., Цветкова Н.Ю. Проблемы мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры // Интерактивная наука. 2016. №2. С.151-154.
10. Дерюгин П.В. Богачёва Л.А. Перспективное развитие систем диагностики, мониторинга и обслуживания объектов транспортной инфраструктуры // Материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. 2016. С. 14-16.
11. Feng D., Feng M.Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 156. pp. 105–117.
12. Шевченко А.А., Буртасова А.Н., Глазков Р.Е. О необходимости выполнения постоянного геодезического мониторинга // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2016. №10. С.39-48.
13. Lutovinov A.A. Providing information connectivity over Russian territory using remote sensing systems of the earth / A.A. Lutovinov, E.A. Lupyay, M.A. Pogosyan, A.O.Shemyakov // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2019. Vol. 89, № 2. pp. 190-195. DOI: 10.1134/S1019331619020114.
14. Spencer B., Hoskere V., Narazaki Y. *Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring*. 2019. Vol. 5, No. 2. pp. 199–222.
15. Акопян Г.Т., Кирюникова Н.М., Лесовая Э.Д., Гура Д.А. Опыт использования ПО «Cyclone» для моделирования и определения смещения объекта в пространстве // Девелопмент и инновации в строительстве/ Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ» 2020 г.
16. Грибкова Л.А., Морозов А.А. Особенности применения современных геодезических приборов и технологий при строительстве зданий и сооружений // Научные труды кубанского государственного технологического университета. 2016. №5. С. 59-69.
17. Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., Мозжухин Д.А. Способ мониторинга технического состояния строительных объектов и система мониторинга технического состояния строительных объектов // Патент.
18. Дубенко Ю.В., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Дышкант Е.Е., Хушт Н.И. Three-dimensional laser scanning for safety of transport infrastructure with application of neural network algorithms and methods of artificial intelligence // Транспортное

строительство в холодных регионах (TRANSOILCOLD 2019) : сб. тр. междунар. науч.-технич. конф. – Санкт-Петербург: Федеральное агентство железнодорожного транспорта; ФГБОУ ВО "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I", 2019. С. 185-190.

19. Ерасыл К.К. Возможности, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. С.27-30.

20. Дручинин С.С. О мониторинге объектов недвижимости: история вопроса, предлагаемая технология ведения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. С. 78–81.

References:

1. Gura D.A., Dubenko V.YU., Buchatskiy P.YU., Markovskiy I.G., Khusht N.I. Monitoring slozhnykh ob"yektov infrastruktury//Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Razdel «Tekhnicheskiye nauki». Vypusk 4 (251) 2019. [Gura D.A., Dubenko V. Yu., Buchatskiy P. J., Markovskiy, I. G., Khusht N. I. Monitoring a complex infrastructure//Bulletin of the Adygeya state University. Section "Technical Sciences". Issue 4 (251) 2019.(In Russ)]

2. Khashpakyants N.O., Gribkova I.S. Primeneniye lazernogo skanirvaniya v zemleustroytve i kadastrakh. Elektronnyy setevoy politematicheskyy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU». 2017. №9. S. 27-35. [Khashpakyants N. O., Gribkova I. S. Application of laser scanning in land management and cadastre. Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU", 2017, No. 9, pp. 27-35 (In Russ)]

3. Shevchenko, G. G. Analiz sposobov provedeniya geodezicheskogo monitoringa zdaniy i sooruzheniy [Tekst] / G. G. Shevchenko, D. A. Gura // Sovremennyye issledovaniya osnovnykh napravleniy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno teoreticheskoy konferentsii / Pod red. I. T. Nasretidinova; Kazanskiy kooperativnyy institut (filial) ANO OVO TSS RF «Rossiyskiy universitet kooperatsii». Kazan', 2017 – S. 150–153. [Shevchenko, G. G. Analysis of methods for conducting geodetic monitoring of buildings and structures [Text] / G. G. Shevchenko, D. A. Gura // Modern research of the main directions of the Humanities and natural Sciences: collection of scientific papers of the international scientific and theoretical conference / edited by I. T. Nasretidinova; Kazan cooperative Institute (branch) ANO OVO CA RF "Russian University of cooperation". Kazan: [b. I.], 2017. pp. 150-153.(In Russ)]

4. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure / C. Koch, K. Georgieva, V. Kasireddy, B. Akinci, P. Fieguth // Advanced Engineering Informatics. 2015. Vol. 29, No. 2. pp. 196–210.

5. Yemel'yanov M.V. Informatsionnaya tekhnologiya proyektirovaniya sistem monitoringa zdaniy i sooruzheniy // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019.T.46, №1. S. 123-131. [Emelyanov M. V. Information technology for designing monitoring systems for buildings and structures // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences, 2019, Vol. 46, No. 1, pp. 123-131(In Russ)]

6. Erkal B.G., Dzherom F.Khadzhar Obnaruzheniye i kolichestvennoye opredeleniye poverkhnostnykh povrezhdeniy na osnove lazera s ispol'zovaniem predskazannykh svoystv poverkhnosti // Avtomatizatsiya v stroitel'stve. – 2017. T.83. S.285-302. [Erkal B. G., Jerome F.Hajar Detection and quantification of surface damage based on a laser using predicted surface properties // Automation in construction. 2017. Vol. 83. pp. 285-302 (In Russ)]

7. Kong E, Achikgoz S., Pendry S., Riley E., Deyong M. displaying deformations and displaying movements of masonry arch bridges using point cloud data // Artificial structures. Vol. 173. 2018. pp. 530-545.

8. Kim B., Cho S. Automated vision-based detection of cracks on concrete surfaces using a deep learning technique // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 10. pp. 3452.

9. Sidorenko YU.A., Tsvetkova N.YU. Problemy monitoringa sostoyaniya ob"yektov transportnoy infrastruktury // Interaktivnaya nauka. 2016. №2. S.151-154. [Sidorenko Yu. A., Tsvetkova N. Yu. Problems of monitoring the state of transport infrastructure facilities // Interactive science, 2016, No. 2, pp. 151-154. (In Russ)]

10. Deryugin P.V. Bogachova L.A. Perspektivnoye razvitiye sistem diagnostiki, monitoringa i obsluzhivaniya ob"yektov transportnoy infrastruktury // Materialy IV Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2016. S. 14-16. [Deryugin P. V. Bogacheva L. A. Perspective development of systems of diagnostics, monitoring and maintenance of transport infrastructure objects // Materials of the IV International student scientific and practical conference. 2016. pp. 14-16. (In Russ)]

11. Feng D., Feng M.Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review // Engineering Structures. 2018. Vol. 156. pp. 105–117.

12. Shevchenko A.A., Burtasova A. N., Glazkov R.Ye. O neobkhodimosti vypolneniya postoyannogo geodezicheskogo monitoringa // Elektronnyy setevoy politematicheskyy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU». 2016. №10. – S.39-48. [Shevchenko A. A., Burtasova A. N., Glazkov R. E. on the need to perform constant geodetic monitoring // Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU". 2016. №10. pp. 39-48.(In Russ)]

13. Lutovinov A.A. Providing information connectivity over Russian territory using remote sensing systems of the earth / A.A. Lutovinov, E.A. Lupyan, M.A. Pogosyan, A.O.Shemyakov // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2019. Vol. 89, No 2. pp. 190-195. DOI: 10.1134/S1019331619020114.

14. Spencer B., Hoskere V., Narazaki Y. Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. 2019. Vol. 5, No. 2. pp. 199–222.

15. Akopyan G.T., Kiryunikova N.M., Lesovaya E.D., Gura D.A. Opyt ispol'zovaniya PO «Syclone» dlya modelirovaniya i opredeleniya smeshcheniya ob"yektov v prostranstve // Development i innovatsii v stroitel'stve/ Elektronnyy setevoy politematicheskyy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU» 2020 g. [Akopyan G. T., Kiryunikova N. M., Lesovaya E. D., Gura D. A. Experience of using the "Cyclone" SOFTWARE for modeling and determining the displacement of an object in space // Development and innovation in construction/ polythematic network Electronic magazine "Scientific works of the Kuban state University" 2020.(In Russ)]

16. Gribkova L.A., Morozov A.A. Osobennosti primeneniya sovremennykh geodezicheskikh priborov i tekhnologiy pri stroitel'stve zdaniy i sooruzheniy//Nauchnyye trudy kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2016. №5. S. 59-69. [Gribkova L. A., Morozov A. A. Features of application of modern geodetic devices and technologies in the construction of buildings and structures//Scientific works of Kuban state technological University, 2016, no. 5, pp. 59-69.

17. Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev YU.A., Mozzhukhin D.A. Sposob monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh ob"yektov i sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh ob"yektov // Patent. [Shakhramanyan M. A.,

Kolomoitsev J. A., D. A. Mozhukhin Method of monitoring technical state of construction projects and monitoring the technical condition of building facilities // Patent. (In Russ)]

18. Dubenko YU.V., Gura D.A., Shevchenko G.G., Dyshkant Ye.Ye., Khusht N.I. Three-dimensional laser scanning for safety of transport infrastructure with application of neural network algorithms and methods of artificial intelligence // Transportnoye stroitel'stvo v kholodnykh regionakh (TRANSOILCOLD 2019) : sb. tr. mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. – Sankt-Peterburg: Federal'noye agentstvo zheleznodorozhnogo transporta; FGBOU VO "Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I", 2019. S. 185-190. [Dubenko Yu. V., Gura D. A., Shevchenko G. G., Dyshkant E. E., Khusht N. I. Three-dimensional laser scanning for safety of transport infrastructure with application of neural network algorithms and methods of artificial intelligence // Transport construction in cold regions (TRANSOILCOLD 2019): SB. Tr.mezhdunar. scientific and technical Conf. - Saint Petersburg: Federal Agency of railway transport; Saint Petersburg state University of Railways of Emperor Alexander I, 2019, pp. 185-190. (In Russ)]

19. Yerasyl K.K. Vozmozhnosti, preimushchestva i nedostatki nazemnogo lazernogo skanirovaniya // Interexpo Geo-Sibir. 2017. S.27-30. Erasyk K. K. Opportunities, advantages and disadvantages of ground-based laser scanning // Interexpo Geo-Siberia. 2017. pp. 27-30. (In Russ)]

20. Druchinin S.S. O monitoringe ob'yektov nedvizhimosti: istoriya voprosa, predlagayemaya tekhnologiya vedeniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka. 2016. S. 78–81. [Druchinin S. S. about monitoring of real estate objects: the history of the issue, the proposed technology of conducting // News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography. 2016. pp. 78-81. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Дмитрий Андреевич Гура, кандидат технических наук, доцент, кафедра кадастра и геоинженерии; e-mail:gda-kuban@mail.ru

Надежда Максимовна Кирюникова, студентка, кафедра кадастра и геоинженерии; e-mail:kiryunikovaa2001@yandex.ru

Элина Дмитриевна Лесовая, студентка кафедра кадастра и геоинженерии; e-mail:elyaaa_129102000@mail.ru

Нафсет Инвербиевна Хушт, магистрант, кафедра кадастра и геоинженерии; e-mail:nafset-khusht@yandex.ru

Алина Петровна Павлюкова, магистрант, кафедра кадастра и геоинженерии; e-mail:pavlukova190397@mail.ru

Information about the authors:

Dmitry A. Gura, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Cadastre and Geoengineering; e-mail:gda-kuban@mail.ru

Nadezhda M.Kiryunikova, Student, Department of Cadastre and Geoengineering; e-mail:kiryunikovaa2001@yandex.ru

Elina D. Lesovaya, Student, Department of Cadastre and Geoengineering; e-mail:elyaaa_129102000@mail.ru

Nafset I.Khusht, Master Student, Department of Cadastre and Geoengineering; e-mail:nafset-khusht@yandex.ru

Alina P.Pavlyukova, Master Student, Department of Cadastre and Geoengineering; e-mail:pavlukova190397@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.06.2020.

Принята в печать 10.08.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.06.2020.

Accepted for publication 10.08.2020.

Для цитирования: П.А. Кадиев, И.П. Кадиев. Формирование ортогональных латинских квадратов методом индексной структуризации таблиц умножения n - множеств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 71-80. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-71-80

For citation: P.A. Kadiev, I.P. Kadiev. Formation of orthogonal latin squares by index structuring of n -set multiplication tables. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 71-80. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-71-81

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

УДК 519.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-71-80

**ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЛАТИНСКИХ КВАДРАТОВ МЕТОДОМ
ИНДЕКСНОЙ СТРУКТУРИЗАЦИИ ТАБЛИЦ УМНОЖЕНИЯ n - МНОЖЕСТВ**

П.А. Кадиев, И.П. Кадиев

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

Резюме. Цель. Целью исследования является формирование структурно совершенных ортогональных латинских квадратов (ОЛК) методом индексно упорядоченного расположения элементов таблицы умножения n -множеств на основе таблицы умножения. **Метод.** Формирование ортогональных латинских квадратов произведено методом индексной структуризации таблиц умножения n – множеств. **Результат.** Предлагается метод построения структурно совершенных ортогональных латинских квадратов пар индексированных конечных множеств нечетной размерности, на основе индексного упорядочения $n \times n$ - массива элементов таблицы умножения. Отличительная особенность предлагаемого метода построения структурно совершенных ортогональных квадратов из элементов двух индексированных множеств, одинаковой размерности, заключается в использовании авторами, разработанного ими метода перестановок элементов исходных $n \times n$ - матричных конфигураций, с формированием индексно упорядоченных или индексно структурированных комбинаторных конфигураций. **Вывод.** Использование метода построения семейства ортогональных латинских квадратов для пар индексированных конечных множеств одинаковой нечетной размерности по элементам, образующим их таблицу умножения, методом индексной структуризации по принципу функциональных зависимостей значений индексов пар элементов множеств и значений индексов пар элементов её окружения позволяет формировать ортогональные конфигурации определенного класса, в которых, оперируя индексами элементов, легко демонстрируется их ортогональность.

Ключевые слова: ортогональные латинские квадраты, таблица умножения, комбинаторные конфигурации, индексная структуризация

**FORMATION OF ORTHOGONAL LATIN SQUARES BY INDEX STRUCTURING
OF N-SET MULTIPLICATION TABLES**

P.A. Kadiev, I. P. Kadiev

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

Abstract. Objective. Formation of structurally perfect orthogonal Latin squares by the method of index ordering of the multiplication table elements of n -sets based on the multiplication table. **Methods.** Orthogonal Latin squares are formed by the method of index structuring of n -set multiplication tables. **Results.** A method is proposed for constructing structurally perfect orthogonal Latin squares of pairs of indexed finite sets of odd dimension, based on the index ordering of an $n \times n$ -array

of elements in the multiplication table. A distinctive feature of the proposed method for constructing structurally perfect orthogonal squares from elements of two indexed sets of the same dimension is the use by the authors of the method of permutations of elements of the original $n \times n$ -matrix configurations, with the formation of index-ordered or index-structured combinatorial configurations. **Conclusion.** The use of the method for constructing a family of orthogonal Latin squares for pairs of indexed finite sets of the same odd dimension by the elements forming their multiplication table by the method of index structuring based on the principle of functional dependency of the index values on pairs of set elements and index values on pairs of elements from its environment allows creating a specific class orthogonal configuration, which, in terms of element indices, easily demonstrates their orthogonality.

Keywords: orthogonal Latin squares, multiplication table, combinatorial configurations, index structuring

Введение. Для последних десятилетий характерно быстрое повышение интереса к дискретной математике, в том числе разделу – комбинаторике. Это объяснимо тем, что одной из центральных задач комбинаторики является исследование возможности различных вариантов формирования комбинаторных конфигураций из элементов конечных множеств, обладающих теми или иными свойствами. Если учесть, что при системном подходе все объекты – это системы, состоящие из компонентов, абстрактными моделями которых часто выступают множества и структуры, формируемых из их элементов конфигураций, возможные варианты расположения элементов, среди которых есть лучшие и наилучшие. Задача отбора варианта из числа возможных является одним из этапов принятия управленческого решения. Таким образом, методы комбинаторики – это основа выработки предложений по решению поставленных задач, один из факторов, обуславливающих интерес использования и рост внимания к методам комбинаторики.

Среди других проблем в век информационных технологий невозможно обойти вниманием вопросы требования к информации, представляемой для принятия решений: необходимость обеспечения оперативности ее доставки, полноты и достоверности информации, обеспечение конфиденциальности. И здесь, значительна роль методов комбинаторики при решении этих задач.

Так, известны комбинаторная ветвь теории информации, предлагающая меры количества информации, как количество разнообразий и связанных с ними неопределенности; меры оценки избыточности и методы сжатия информации, методы построения помехоустойчивых кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки при передаче и хранении информации; отдельная группа комбинаторных методов шифрования, для обеспечения конфиденциальности. Не остались без внимания и ранее решаемые задачи комбинаторикой задачи, такие как составление расписаний, календарное планирование, планирование экспериментов. Практически при решении большинства задач в указанных выше областях применения методов, в комбинаторике отведено определенное место конфигурациям, известным как латинские и греко-латинские квадраты, а также и вопросам их ортогонализации.

По определению «латинским квадратом» называется комбинаторная конфигурация $n \times n$ - размерности, строки и столбцы которых образованы элементами одного и того же множества, и содержат все его элементы [1,2]. Конфигурация была предложена Леонардом Эйлером в 1872 году, её строки и столбцы содержали все элементы латинского алфавита. Позже Эйлером была предложена конфигурация, получившая название греко-римского квадрата, строки и столбцы которой, образованы всеми упорядоченными парами символов греческого и латинского алфавитов. Обобщением этих открытий, особенно греко – римского квадрата, в комбинаторике стало понятие ортогональных латинских квадратов. Этим комбинаторным конфигурациям посвящены отдельные разделы комбинаторного анализа. Понятия «латинский» и «греко-латинский» квадрат сохранилось для комбинаторных конфигураций, строки и столбцы которых образованы элементами множества или парами элементов двух конечных множеств [3].

Ортогональными называются $n \times n$ -конфигурации в виде таблиц, в каждой ячейке которой расположена одна из возможных пар элементов исходных множеств, представленных латинскими квадратами, если строки и столбцы их содержат все упорядоченные пары элементов исходных конфигураций $a_i b_j$, где i, j принимают значения от 1 до n [4, 5], принадлежащих множествам A и B .

Построение ортогональных квадратов рассматривается в комбинаторике как сложная задача. Общий метод формализации процесса построения этих конфигураций не предложен. Для её решения применяются как алгебраические конструкции, так и комбинаторные (трансверсали, ортогональные массивы, дизайны, блок-схемы, тройки Штейнера и др.) [6-19].

Существует несколько подходов к решению этих задач, их часто сводят в две группы. К первой группе относятся методы, основанные на выборе «базового» латинского квадрата из элементов одного множества, которому отыскиваются ортогональные с ним латинские квадраты, образованные элементами другого множества. Ко второй группе относятся методы, использующие для построения ортогональных латинских квадратов различные комбинаторные объекты (включая сами латинские квадраты) меньших порядков [20-22].

Постановка задачи. Известно, что ортогональный квадрат образует таблица умножения конечных множеств одной размерности [22]. Основанием является то, что таблицу умножения множеств составляют все пары их элементов, каждая из которых занимает отдельную клетку квадрата. Утверждение о том, что полученная таблица это конфигурация, образованная наложением двух латинских квадратов, слабо аргументировано. Особенно лишает конфигурации этих свойств, при использовании в качестве элементов исходных множеств цифр, что чаще всего и используется авторами в приводимых примерах латинских и ортогональных латинских квадратов.

Для обозначения элементов множеств могут использоваться различные символы, требование к ним одно – их различимость. Одним из методов обозначения элементов множеств является использование общего символа, с присвоением ему дополнительного атрибута – индекса, указывающего его местоположение при классической системе индексации. Изменение местоположения элемента, при формировании из них комбинаторных конфигураций, сохраняет его различимость и информацию о предшествующем местоположении. В ряде случаев эта информация важна, так как характеризует изменения структуры множества или их совокупности [13,14].

Для иллюстрации справедливости утверждения о том, что таблицу умножения множеств можно рассматривать как ортогональный квадрат, образованный из элементов этих множеств, предлагается перестановками элементов по алгоритмам метода индексной структуризации представить её в более наглядной форме. Эта форма представления таблицы умножения после перестановок методом индексного упорядочения расположения элементов исходных множеств и их элементов, отражает структуру, сформированную наложением друг на друга двух латинских квадратов, подтверждая приведенное выше утверждение, что таблица содержит все элементы ортогонального латинского квадрата. Предложенный метод формирования ортогональных латинских квадратов можно рассматривать как метод построения ортогональных квадратов двух произвольно взятых индексированных множеств одинаковой размерности с индексной структуризацией их таблиц умножения.

Методы исследования. Для построения ортогональных латинских квадратов из элементов двух n - множеств A и B , необходимо сформировать все пары элементов множеств- $a_i b_j$. Этот процесс представляет собой составление таблицы их умножения.

При заданных n - множествах: $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ указанные пары образуют множество C , являющееся таблицей умножениям: $A \times B = C$. Первым элементов в этих парах является элемент множества A , вторыми – элемент множества B . Множество C содержит все пары символов и представляют собой таблицу умножение множеств A и B . Общее число пар равно $n \times n$: $C = [(a_1 b_1), (a_1 b_2), \dots, (a_1 b_n), (a_2 b_1), (a_2 b_2), \dots, (a_2 b_n), \dots, (a_n b_1), (a_n b_2), \dots, (a_n b_n)]$. В качестве примера приведена табл. 1 умножения множеств A и B , размерности $n = 5$.

позициях формируемых конфигураций, могут быть построены $n \times n$ различных «базовых» индексно структурированных конфигураций.

Система индексации (рис.2), использованная при формировании конфигурации C^* , позволяет различать свойства, характерные для ортогональных латинских квадратов: индексы элементов на одноименных позициях в строках и столбцах принимают значения от 1 до n , свидетельствуя наличие в них «представителей» каждой строки и каждого столбца исходной конфигурации C .

Обсуждение результатов. В результате перестановок по выбранной системе расположения элементов формируется конфигурация C^* с индексно упорядоченной структурой, приведенная для частного случая $n = 7$, на рис. 3 при значениях коэффициента индексной удаленности окружения $k = 1$.

Индексная упорядоченность в сформированной конфигурации заключается в том, что в каждой строке и каждом столбце индексы элементов принимают значения от 1 до n . В каждом из них имеет место «индексное представительство» строк и столбцов исходной матрицы C . Ниже рассмотрен пример выполнения указанных преобразований для исходных множеств $A = \{a_i\}$ и $B = \{b_j\}$ размерности $n=7$. Результат умножения сведен к матрице $C_{7 \times 7}$, приведенной на рис.3.

$$C_{7 \times 7} = \begin{matrix} C_{11}C_{12}C_{13}C_{14}C_{15}C_{16}C_{17} \\ C_{21}C_{22}C_{23}C_{24}C_{25}C_{26}C_{27} \\ C_{31}C_{32}C_{33}C_{34}C_{35}C_{36}C_{37} \\ C_{41}C_{42}C_{43}C_{44}C_{45}C_{46}C_{47} \\ C_{51}C_{52}C_{53}C_{54}C_{55}C_{56}C_{57} \\ C_{61}C_{62}C_{63}C_{64}C_{65}C_{66}C_{67} \\ C_{71}C_{72}C_{73}C_{74}C_{75}C_{76}C_{77} \end{matrix}$$

Рис.3. Конфигурация произведения множеств $A_{7 \times 7} \times B_{7 \times 7}$
 Fig. 3. Configuration of the product of sets $A_{7 \times 7} \times B_{7 \times 7}$

Перестановками по системе индексно - функциональной структуризации окружения элемента, приведенной на рис. 2, при значениях $k = 1$ и выбранном «базовом» элементе C_{11} , местоположение которого сохранили как в исходной конфигурации $C_{7 \times 7}$, приведенные на рис. 3, и расположили элемент его в другой позиции, формируются индексно структурированные конфигурации $C_{7 \times 7}^*$ и $C_{7 \times 7}^{**}$, приведенные на рис.4, которые отличаются структурой строк и столбцов.

$$C_{7 \times 7}^* = \begin{matrix} C_{11}C_{23}C_{35}C_{47}C_{52}C_{64}C_{76} \\ C_{32}C_{44}C_{56}C_{61}C_{73}C_{15}C_{27} \\ C_{53}C_{65}C_{77}C_{12}C_{24}C_{36}C_{41} \\ C_{72}C_{16}C_{21}C_{33}C_{45}C_{57}C_{62} \\ C_{24}C_{37}C_{42}C_{54}C_{66}C_{71}C_{13} \\ C_{46}C_{51}C_{63}C_{75}C_{17}C_{22}C_{34} \\ C_{67}C_{72}C_{14}C_{26}C_{31}C_{73}C_{55} \end{matrix} \quad C_{7 \times 7}^{**} = \begin{matrix} C_{53}C_{65}C_{77}C_{12}C_{24}C_{36}C_{41} \\ C_{72}C_{16}C_{21}C_{33}C_{45}C_{57}C_{62} \\ C_{24}C_{37}C_{42}C_{54}C_{66}C_{71}C_{13} \\ C_{46}C_{51}C_{63}C_{75}C_{17}C_{22}C_{34} \\ C_{67}C_{72}C_{14}C_{26}C_{31}C_{73}C_{55} \\ C_{11}C_{23}C_{35}C_{47}C_{52}C_{64}C_{76} \\ C_{32}C_{44}C_{56}C_{61}C_{73}C_{15}C_{27} \end{matrix}$$

Рис.4. Конфигурации, образованные перестановками элементов методом индексно - функциональной структуризации множества $C_{7 \times 7}$

Fig. 4. Configurations formed by permutations of elements by the method of index-functional structuring of the $C_{7 \times 7}$ set

Индексно-функциональная структура конфигурации $C_{7 \times 7}^*$ отражена в особенности индексации элементов строк и столбцов. В них значения индексов меняются от 1 до n , каждый элемент в строках и столбцах исходного массива C занимает различную позицию.

Конфигурациями этого класса были нами приведены в работе [12,13] и определены нами как конфигурации нового типа - двух индексные латинские квадраты, формируемые из исходной $n \times n$ - совокупности множеств циклическими сдвигами строк и столбцов по заданному алгоритму.

Для исследования свойств полученной конфигурации, как ортогонального латинского квадрата, целесообразно перейти к символике обозначения элементов исходных множеств А и В, обратной заменой соответствий c_{ij} ; $a_i b_j$. При этом формируется конфигурация, приведенная на рис.5.

Конфигурация, приведенная на рис.5 является ортогональным квадратом, образованным парами элементов множеств А и В.

Каждый элемент этой конфигурации представляет пару из элементов произведения множеств А \times В, индексы и элементы которых не повторяются. Все это достаточно наглядно отображено на системе индексации элементов в строках и столбцах конфигурации на рис. 5.

$$A \times B = \begin{matrix} a_1 b_1 & a_2 b_3 & a_3 b_5 & a_4 b_7 & a_5 b_2 & a_6 b_4 & a_7 b_6 \\ a_3 b_2 & a_4 b_4 & a_5 b_6 & a_6 b_1 & a_7 b_3 & a_1 b_5 & a_2 b_7 \\ a_5 b_3 & a_6 b_5 & a_7 b_7 & a_1 b_2 & a_2 b_4 & a_3 b_6 & a_4 b_1 \\ a_7 b_2 & a_1 b_6 & a_2 b_1 & a_3 b_3 & a_4 b_5 & a_5 b_7 & a_6 b_2 \\ a_2 b_4 & a_3 b_7 & a_4 b_2 & a_5 b_4 & a_6 b_6 & a_7 b_1 & a_1 b_3 \\ a_4 b_6 & a_5 b_1 & a_6 b_3 & a_7 b_5 & a_1 b_7 & a_2 b_2 & a_3 b_4 \\ a_6 b_7 & a_7 b_2 & a_1 b_4 & a_2 b_6 & a_3 b_1 & a_7 b_3 & a_5 b_5 \end{matrix}$$

Рис.5. Ортогональный латинский квадрат, образованный элементами таблицы умножения множеств А и В

Fig. 5. Orthogonal Latin square formed by the elements of the multiplication table of sets A and B

Для демонстрации приведенного выше утверждения о том, что таблица умножения множеств одинаковой размерности является ортогональным квадратом, можно провести преобразование полученной конфигурации.

Так, если в полученной конфигурации, приведенной на рис.5, образованной всеми парами элементов произведения множеств – $a_i b_j$; c_{ij} , выполнить операцию удаления первых элементов в парах, являющихся, по условию умножения множеств, элементами множества А, то формируется латинский квадрат, образованный элементами второго множества – В_{лк} (рис.6).

$$B_{лк} = \begin{matrix} b_1 b_3 b_5 b_7 & b_2 b_4 b_6 \\ b_2 b_4 b_6 b_1 & b_3 b_5 b_7 \\ b_3 b_5 b_7 b_2 & b_4 b_6 b_1 \\ b_2 b_6 b_1 b_3 & b_5 b_7 b_2 \\ b_4 b_7 b_2 b_4 & b_6 b_1 b_3 \\ b_6 b_1 b_3 b_5 & b_7 b_2 b_4 \\ b_7 b_2 b_4 b_6 & b_1 b_3 b_5 \end{matrix}$$

Рис.6. Латинский квадрат, образованный из $C_{7 \times 7}^*$ элементами множества В

Fig. 6. Latin square formed from $C_{7 \times 7}^*$ by elements of set B

При удалении вторых элементов в парах, элементов второго множества, формируется латинский квадрат, образованный элементами множества А (рис.7).

$$A_{лк} = \begin{matrix} a_1 a_2 a_3 a_4 & a_5 a_6 a_7 \\ a_3 a_4 a_5 a_6 & a_7 a_1 a_2 \\ a_5 a_6 a_7 a_1 & a_2 a_3 a_4 \\ a_7 a_1 a_2 a_3 & a_4 a_5 a_6 \\ a_2 a_3 a_4 a_5 & a_6 a_7 a_1 \\ a_4 a_5 a_6 a_7 & a_1 a_2 a_3 \\ a_6 a_7 a_1 a_2 & a_3 a_4 a_5 \end{matrix}$$

Рис.7. Латинский квадрат, образованный из $C_{7 \times 7}^*$, элементами множества А

Fig. 7. Latin square formed from $C_{7 \times 7}^*$, elements of set A

Подобное преобразование в таб.1 умножения множеств или матричной конфигурации С, образованной элементами таблицы, приведенное в табл. 2, не позволяет убедиться, что эти конфигурации являются ортогональными конструкциями.

Таблица 2. Таблица умножения при устранении элементов множества А
Table 2. Multiplication table when eliminating elements of set A

a_i/b_j	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_1	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_2	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_3	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_4	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_5	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5

Следовательно, выполненные выше преобразования таблицы умножения множеств, построение массива из элементов произведения, и перестановки элементов методом индексной структуризации, формируют конфигурация С*, которая представляет собой ортогональный латинский квадрат, полученный наложением двух латинских квадратов, образованных сомножителями-множествами.

Её структура, удовлетворяет условиям ортогональности латинских квадратов, которые образованы структуризацией перестановками массива элементов произведения двух множеств.

Кроме того, подтверждением ортогональности является и то, что строки и столбцы конфигурации являются непересекающимися трансверсалими. Это отражает сущность предлагаемого метода: получение ортогональных латинских квадратов из элементов двух конечных множеств одинаковой размерности по приведенному алгоритму последовательности преобразований.

Следует отметить, что в конфигурации С*, как «базовой» конфигурации, подставляя любой из элементов s_{ij} : $a_i b_j$, таблицы умножения последовательно на все $n \times n$ - позиций, может быть сформировано семейство изотопных ортогональных латинских квадратов, образованных парой множеств А и В, которые отличаются изменением местоположения его элементов, различием структуры, но с сохранением свойств индексного представительства в строках и столбцах.

Конфигурации, полученные из «базовой» перестановками строк или столбцов являются изотопными вариантами построения ортогональных латинских квадратов из элементов множеств А и В.

Они являются результатом наложения изотопных латинских квадратов, полученных перестановками элементов строк и столбцов «базовых» латинских квадратов множества А и В.

Наложением изотопных латинских квадратов, образованных «базовыми» латинскими квадратами исходных множеств могут быть сформированы семейства ортогональных латинских квадратов этих множеств.

В итоге может быть сформулировано, практически доказанное приведенным примером, следующее утверждение:

ортогональный латинский квадрат для двух конечных множеств А и В может быть построен из пар элементов $a_i b_j$ таблицы умножения, где i, j принимают значения от 1 до n , если расположить их в клетках $n \times n$ - таблицы по рекуррентным соотношением между индексами любой пары и значениями индексов элементов пар её окружения по функциональным зависимостям между ними вида (1), приведенным на рис. 8, при следующих ограничениях:

- n – число нечетное; k - число простое, не является делителем числа n ;
- значения индексов элементов окружения по суммам, при их значения больших, чем n , определяются по модулю $\text{mod } n$;

- при отрицательных значениях результатов выполнения операций по определению значений индексов пар элементов окружения, равных ($-m$), значения индекса определяется по формуле $(n-m)$, если оно равно нулю, то значение индекса выбирается равным числу n .

$$\begin{aligned} & \dots, a_{i-(k+1)} b_{j-k}, \dots \\ & \dots, a_{i-k} b_{j-(k+1)}, \underline{a_i b_j}, a_{i+k} b_{j+2}, \dots \pmod{n} \quad (1) \\ & \dots, a_{i+(k+1)} b_{j+k}, \dots \end{aligned}$$

Рис.8. Система индексно – функциональной структуризации окружения элемента $\underline{a_i b_j}$
 Fig. 8. System of index - functional structuring of the environment of the element $\underline{a_i b_j}$

Ортогональные латинские квадраты двух множеств могут быть сформированы наложением изотопных латинских квадратов, образованных из «базовых» латинских квадратов исходных множеств.

Сформулированное утверждение может рассматриваться как алгоритм формализации процесса формирования ортогональных латинских квадратов из элементов двух множеств равной конечной размерности, удовлетворяющих приведенным выше ограничениям к размерности и системе индексации.

Вывод. Отличительная особенность предлагаемого метода построения ортогональных квадратов из элементов двух индексированных множеств, одинаковой размерности, заключается в использовании авторами разработанного ими метода перестановок элементов исходных $n \times n$ - матричных конфигураций, с формированием индексно упорядоченных или индексно структурированных комбинаторных конфигураций.

Его использование для формирования ортогональных конфигураций позволяет формировать ортогональные конфигурации определенного класса, в которых, оперируя индексами элементов, легко демонстрируется их ортогональность. Эти конфигурации обладают свойством, которое позволяет их рассматривать как отдельный класс или семейство ортогональных латинских квадратов, а именно структурно совершенных, со свойством индексного «представительства» отдельных пар элементов.

Анализ структуры формируемых комбинаторных конфигураций показал, что характерные для ортогональных конфигураций свойства у них сохраняются при любых перестановках между собой строк и столбцов.

При построении конфигурации любая пара из $n \times n$ элементов, может быть расположена на любой из $n \times n$ -позиции, формируя структурно различные ортогональные латинские квадраты. Это позволяет определить число возможных вариантов построения пар латинских квадратов, образующих «семейство», образованное множествами A и B , как число возможных перестановок строк и столбцов полученной конфигурации.

Полученная перестановками элементов конфигурации C (рис.3) конфигурации C^* и C^{**} (рис.4), могут быть рассмотрены как «базовые». Перестановками строк и столбцов этих матриц могут быть сформированы изотопные конфигурации (C^{**} - изотопна конфигурации C^* , так как получена перестановками ее строк), которые каждая может быть получена определенными операциями перестановок строк и столбцов.

Следует отметить и то обстоятельство, что из элементов множеств A и B могут быть сформированы «базовые» латинские квадраты, перестановками строк и столбцов которых также могут быть сформированы изотопные ортогональные латинские квадраты. Существует понятие семейства латинских квадратов, которое образуют квадраты, любая пара которых взаимно ортогональны.

Каждый латинский квадрат, образованный из «базовых» для множества A (B), является ортогональным с изотопными квадратами, образованными из базовой конфигурации латинского квадрата множества B (A).

Ортогональный латинский квадрат может быть получен наложением изотопных латинских квадратов, образованных базовыми латинскими квадратами из этих множеств, также как из базового ортогонального квадрата C^* , путем изменения её структуры перестановками строк или столбцов и значений индексов $a_{ij} : a_{ji}$.

Предлагаемый метод формирования ортогональных латинских квадратов для любой пары индексированных конечных множеств одинаковой нечетной размерности является более общим, чем построение их на основе подбора к выбранному латинскому квадрату ортогональных с ним, и построение их наложением элементов двух выбранных латинских квадратов друг на друга.

Достоинством метода является и то, что он обладает определенной универсальностью, может рассматриваться как формализованный метод построения ортогональных латинских квадратов для множеств, удовлетворяющих определенным требованиям.

По аналогии с ортогональными греко - латинскими квадратами могут быть составлены конфигурации, содержащие в себе все возможные пары элементов двух информационных массивов, с которыми встречаемся при решении ряда практических задач в криптографии.

Эта задача к криптографии может быть сформулирована как задача «рассеивания» пар элементов информационных массивов с индексным упорядочением структур с целью обеспечения конфиденциальности содержимого.

Метод может быть использован для решения ряда практических задач, таких как шифрование данных в информационных массивах подстановками и перестановками элементов, борьбы с сосредоточенными ошибками большой кратности «пакетами ошибок», рассеивание их по информационному массиву в виде ошибок малой кратности, построение таких комбинаторных систем как системы различных представительств, числовых магических квадратов, решению таких классических задач комбинаторики, как составление расписаний, календарное планирование и планирование экспериментов и др.

Библиографический список:

1. Виленкин Н.Я. Комбинаторика. - М.: «Наука», 1969г., 328с.
2. Тараканов В.Е., Айгнер М. А. Комбинаторная теория. - М.: Мир, 1982, 362с.
3. Холл М. Комбинаторика. / Перевод с английского С.А. Широкова под ред. А.О. Гельфанда А.О. и Тараканова В.Е // М.: Мир, 1970г.
4. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика М.: Мир, 1990г.
5. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ. М.: изд. МГУ, 1994г.
6. [http://www. google/ ru](http://www.google.ru). Алгоритмы индексной сортировки массивов данных.
7. Леонтьев В.К. Избранные задачи комбинаторного анализа. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001
8. Волкова В.Н. Теория систем и системный анализ. Учебник / В. Н. Волкова, А. А. Денисов // М.: Юрайт, 2015.615с.
9. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991.
10. Рыбников К. А. Комбинаторный анализ. Очерки истории. Текст// М.: Изд. Мехмата МГУ, 1996. 124 с.
11. Андерсен Дж.А. Дискретная математика и комбинаторика. Текст //пер. с англ. М.: Вильямс, 2003.
12. Кадиев П.А., Кадиев И.П. Алгоритмы преобразования «классических» матриц в 2-х индексные латинские квадраты. Текст. / П.А Кадиев, И.П. Кадиев, М.З. Зейналов// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т17. 2010. с.93-99
13. Кадиев П.А. Программа преобразования матриц методом латинских квадратов. Текст. / П.А. Кадиев, М.З. Зейналов. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2009616143 от 09.11.2009г.
14. Кадиев И.П. Рассеивание элементов «пакетов ошибок» в информационном массиве методом индексной структуризации. Текст / П.А Кадиев, И.П. Кадиев, Кудаев Р.Б. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 46. №4, 2019. с.81-89
15. Кадиев И.П. Система индексной структуризации комбинаторных конфигураций методом рекуррентных функциональных соотношений для защиты передаваемых по каналам связи данных. Текст./ Кадиев И.П., Мелехин В. Б. // ж. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. № 2, 2019г. с.37- 43
16. Laywine C. F. and Mullen G. L. Discrete mathematics using Latin squares. New York: Wiley, 1998.
17. Chum C.S. and Zhang X. The Latin squares and the secret sharing schemes // Groups Complex. Cryptol. 2010. V. 2. P. 175-202.

18. Laywine C. F. and Mullen G. L. Discrete mathematics using Latin squares. New York: Wiley, 1998.
19. Глухов М. М. О применениях квазигрупп в криптографии. Статья. // Прикладная дискретная математика. 2008. №2(2). С. 28-32.
20. Малых А.Е. Об историческом процессе развития теории латинских квадратов и некоторых их приложениях. Текст/Малых А.Е., Данилова В. И. // Вестник Пермского университета. 2010. Вып. 4(4). С. 95-104.
21. Тришин А.Е. Способ построения ортогональных латинских квадратов на основе подстановочных двучленов конечных полей. Текст.//– М.: ТВП.
22. Тужилин М. Э. Об истории исследований латинских квадратов Текст// Обзорение прикладной и промышленной математики. 2012. Том 19, выпуск 2. С. 226-227.

References:

1. Vilenkin N.YA. Kombinatorika. - М.: «Nauka»,1969g.,328s. [Vilenkin N. Ya. Combinatorics. - М.: "Science", 1969, 328s. (In Russ)]
2. Tarakanov V.Ye., Aigner M. A. Kombinatornaya teoriya.- М.: Mir,1982, 362s. [Tarakanov V.E., Aigner M.A., Combinatorial theory, Moscow: Mir, 1982, 362p. (In Russ)]
3. Khol M. Kombinatorika. / Perevod s angliyskogo S.A. Shirokova pod red. A.O. Gel'fanda A.O.i Tarakanova V.Ye //.- М.: Mir,1970.[Hall M. Combinatorics. / Translated from English by S.A. Shirokova, ed. A.O. Gelfand A.O. and Tarakanova V.E. // М.: Mir, 1970 (In Russ)]
4. Stenli R. Perechislitel'naya kombinatorika. М.: Mir, 1990. [Stanley R. Enumeration combinatorics - М.: Mir, 1990. (In Russ)]
5. Rybnikov K.A. Vvedeniye v kombinatornyy analiz.- М.: izd. MGU, 1994. [Rybnikov K.A. Introduction to combinatorial analysis. Moscow: ed. Moscow State University, 1994. (In Russ)]
6. <http://www.google.ru>. Index sorting algorithms for data arrays.
7. Leont'yev V.K. Izbrannyye zadachi kombinatornogo analiza. - М.: izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2001 [Leontiev V.K. Selected problems of combinatorial analysis. - М.: publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2001 (In Russ)]
8. Volkova V.N. Teoriya sistem i sistemnyy analiz. Uchebnik / V. N. Volkova, A. A. Denisov //– М.: Yurayt, 2015.- 615s. [Volkova V.N. Systems theory and systems analysis. Textbook / V. N. Volkova, A. A. Denisov // - М.: Yurayt, 2015.-615s. (In Russ)]
9. Dénes J. H., Keedwell A. D. Latin squares: New developments in the theory and applications. Annals of Discrete Mathematics vol. 46. Academic Press. Amsterdam. 1991.
10. Rybnikov K. A. Kombinatornyy analiz. Ocherki istorii. Tekst//— М.: Izd. Mekhmata MGU, 1996. — 124 s. [Rybnikov KA Combinatorial analysis. Essays on history. Text // - М.: Ed. Mehmat Moscow State University, 1996. 124 p. (In Russ)]
11. Andersen J.A. Discrete mathematics and combinatorics. Text // lane. from English - М.: Williams, 2003.
12. Kadiyev P.A., Kadiyev I.P. Algoritmy preobrazovaniya «klassicheskikh» matrits v 2-kh indeksnyye latinskiye kvadraty. Tekst. / P.A Kadiyev, I.P. Kadiyev, M.Z. Zeynalov. // Vestnik Dag. Gos. Tekh. Un-ta, T17. 2010. s.93-99 [Kadiev P.A., Kadiev I.P. Algorithms for transforming "classical" matrices into 2-index Latin squares. Text. / P.A. Kadiev, I.P. Kadiev, M.Z. Zeynalov//Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 17. 2010. pp.93-99 (In Russ)]
13. Kadiyev P.A. Programma preobrazovaniya matrits metodom latinskikh kvadratov. Tekst. / P.A. Kadiyev, M.Z. Zeynalov. // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2009616143 ot 09.11.2009g. [Kadiev P.A. A program for converting matrices by the method of Latin squares. Text. / P.A. Kadiev, M.Z. Zeynalov. // Certificate of state registration of computer programs No. 2009616143 dated 09.11.2009. (In Russ)]
14. Kadiyev I.P. Rasseivaniye elementov «paketov oshibok» v informatsionnom massive metodom indeksnoy strukturizatsii. Tekst / P.A Kadiyev, I.P. Kadiyev, Kudayev R.B. // Vestnik DGTU. Tekhnicheskkiye nauki. Tom 46. №4, 2019.- s.81-89 [Kadiev I.P. Scattering of "error packets" elements in the information array by the method of index structuring. Text / P.A. Kadiev, I.P. Kadiev, Kudaev R.B. // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 46. No4, 2019. pp.81-89 (In Russ)]
15. Kadiyev I.P. Sistema indeksnoy strukturizatsii kombinatornykh konfiguratsiy metodom rekurrentnykh funktsional'nykh sootnosheniy dlya zashchity peredavayemykh po kanalam svyazi dannykh. Tekst./ Kadiyev I.P., Melekhin V.B. // zh. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. № 2 ,2019. s.37- 43 [Kadiev I.P. The system of index structuring of combinatorial configurations by the method of recurrent functional relations for the protection of data transmitted over communication channels. Text. / Kadiev I.P., Melekhin V.B. // J. Devices and systems. Management, control, diagnostics. No. 2, 2019 pp. 37-43 (In Russ)]
16. Laywine C. F. and Mullen G. L. Discrete mathematics using Latin squares. New York: Wiley, 1998.
17. Chum C.S. and Zhang X. The Latin squares and the secret sharing schemes // Groups Complex. Cryptol. 2010. Vol. 2. pp. 175-202.
18. Laywine C. F. and Mullen G. L. Discrete mathematics using Latin squares. New York: Wiley, 1998.

19. Glukhov M. M. O primeneniya kh kvazigrupp v kriptografii .Stat'ya. // Prikladnaya diskretnaya matematika. 2008. №2(2). s. 28-32. [Glukhov MM On applications of quasigroups in cryptography. Article. // Applied discrete mathematics. 2008. No. 2 (2). pp. 28-32. (In Russ)]
20. Malykh A.Ye Ob istoricheskom protsesse razvitiya teorii latinskikh kvadratov i nekotorykh ikh prilozheniyakh. Tekst. / Malykh A.Ye., Danilova V. I. // Vestnik Permskogo universiteta. 2010. Vol. 4(4). S. 95-104. [Malykh AE On the historical development of the theory of Latin squares and some of their applications. Text. / Malykh A.E., Danilova V.I. // Bulletin of Perm University. 2010. Issue. 4 (4). pp. 95-104. (In Russ)]
21. Trishin A.Ye. Sposob postroyeniya ortogonal'nykh latinskikh kvadratov na osnove podstanovochnykh dvuchlenov konechnykh poley . Tekst.// M.: TVP. [Trishin A.E. A method for constructing orthogonal Latin squares based on substitutional binomials of finite fields. Text // M. : TVP. (In Russ)]
22. Tuzhilin M. E. Ob istorii issledovaniy latinskikh kvadratov Tekst. // Obozreniye prikladnoy i promyshlennoy matematiki. 2012. Tom 19, vypusk 2. S. 226—227. [Tuzhilin M. E. On the history of studies of Latin squares Text.// Review of Applied and Industrial Mathematics. 2012. Vol. 19, Issue 2. pp. 226-227. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Кадиев Исламудин Пашаевич, соискатель кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Кадиев Пашай Абдулгамидович, кандидат технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Information about the authors:

Islamudin P. Kadiev, Applicant, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Pashay A. Kadiev, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail:islam-kadi@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.07.2020.

Принята в печать 05.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.07.2020.

Accepted for publication 05.09.2020.

Для цитирования: С.И. Короткевич, Ю.В. Минаева. Алгоритм коррекции карты глубины изображения с учетом яркости точек и их удаленности от точки наблюдения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 82-92. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-82-92

For citation: S.I. Korotkevich, Yu.V. Minaeva. Algorithm for correcting the image depth map based on the points brightness and their distance from the observation point. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 82-92. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-82-92

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.021

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-82-92

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ КАРТЫ ГЛУБИНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЯРКОСТИ ТОЧЕК И ИХ УДАЛЕННОСТИ ОТ ТОЧКИ НАБЛЮДЕНИЯ

С.И. Короткевич, Ю.В. Минаева

Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, Россия

Резюме. Цель. Моделирование головы человека является важной проблемой, возникающей в самых разных областях науки и техники. Существующие активные технологии реконструкции и моделирования исследуемого объекта требуют наличия дорогостоящего оборудования и подготовленного персонала. **Метод.** Альтернативой является использование пассивных методов, выполняющих обработку изображений с помощью специальных математически алгоритмов. Одним из таких методов является стереозрение, основанное на использовании парных снимков, сделанных одновременно с помощью нескольких, определенным образом, расположенных и откалиброванных камер. Однако общим недостатком методов стереозрения является возможность получения ошибочных карт глубины изображения из-за некачественных исходных снимков или неправильно установленных параметров камер и освещения. **Результат.** Разработаны процедуры, использующие дополнительные параметры точек изображения, с помощью которых можно проводить коррекцию карт глубины для исключения появления дефектов на них. Для достижения поставленной цели проведен анализ существующего математического обеспечения для обработки фото- и видеоматериалов; предложены методы подавления шумов на изображении, получения контура изображения, а также методика получения трехмерной матрицы объекта, основанная на изменении направленности освещения; апробирована работа алгоритма на тестовом примере. **Вывод.** Разрабатываемая методика должна улучшить качество карты глубины обрабатываемого изображения и, тем самым, сделать процедуры моделирования более эффективными.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, виртуальная модель, моделирование человеческого лица, обработка изображений, стереозрение, карта глубины

ALGORITHM FOR CORRECTING THE IMAGE DEPTH MAP BASED ON THE POINTS BRIGHTNESS AND THEIR DISTANCE FROM THE OBSERVATION POINT

S. I. Korotkevich, Yu. V. Minaeva

Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Ave., Voronezh 14394026, Russia

Abstract. Objective. Modeling the human head is a significant problem that arises in a wide variety of fields of science and technology. Existing active technologies for reconstruction and modeling of the object under study require expensive equipment and trained personnel. **Methods.** An alternative is to use passive methods that perform image processing using special mathematical algorithms. One of these methods is the stereo vision, which is based on the use of paired images taken

*simultaneously with several cameras positioned and calibrated in a certain way. However, a common drawback of stereo vision methods is the possibility of obtaining erroneous depth maps due to poor-quality source images or incorrect camera and lighting settings. **Results.** Procedures were developed that use additional parameters of image points, which can be used to correct depth maps to avoid the appearance of defects. To achieve this objective, the existing mathematical software for processing photo and video materials is analyzed; methods for suppressing noise in the image, obtaining an image contour, as well as a method for obtaining a 3D object matrix based on changing the direction of illumination are proposed; the algorithm is tested on a test example. **Conclusion.** The developed technique should improve the quality of the depth map of the processed image and thus make the modeling procedures more efficient.*

Keywords: 3D modeling, virtual model, human face modeling, image processing, stereo vision, depth map

Введение. В связи с быстрым развитием мультимедиа-технологий на первый план во всех отраслях науки и производства выходят методы визуализации и виртуального исследования объектов. Особенно широко такие методы используются в кино- и видеоиндустрии, архитектуре, строительстве, промышленности, медицине и т.д. Отдельным классом задач моделирования, для которого разработаны специальные методы, является моделирование головы человека.

Существующие технологии реконструкции и моделирования человеческого лица в зависимости от способов получения и обработки изображений можно разделить на два класса – активные и пассивные [1, 2]. Активные системы предполагают использование дорогостоящего оборудования (томографов, трехмерных сканеров, лазерных сканирующих систем и т.д.) и имеют ограничения, связанные с достаточно большими дозами облучения исследуемых объектов. Пассивное моделирование основано на использовании одного или совокупности нескольких фотоснимков, поэтому не является таким трудо- и ресурсозатратным. Наиболее распространенными методами пассивного моделирования является стереозрение.

В технологии стереозрения используются парные снимки (или их последовательность), полученные с помощью двух специальным образом расположенных камер [3-6]. На данных снимках устанавливается расположение одних и тех же точек и по их смещению друг относительно друга определяется расстояние между ними. Такой подход позволяет реконструировать геометрическую форму исследуемого объекта и его расположение относительно других объектов.

Постановка задачи. Ключевым этапом алгоритмов стереозрения является построение карты глубины – матрицы, в которой каждому пикселю присваивается дополнительный параметр – расстояние от плоскости изображения до данного пикселя. Существующие методы по вычислению карты глубины используют принцип «скользящего окна», согласно которому на втором снимке производится поиск области, уже найденной на первом изображении [7-10]. Однако карты глубины, полученные с помощью таких методов, в некоторых случаях могут обладать следующими дефектами:

- случайные шумы на изображении;
- разные величины глубины у точек одного уровня;
- сильные шумы на границах объектов.

Причинами появления дефектов являются неточная калибровка камер, различная освещенность парных снимков или их недостаточное качество.

Для устранения данных недостатков в статье предлагается проводить коррекцию карты глубины с учетом яркости точек изображения и их отдаленности от точки наблюдения. Такой подход позволит вычислить ориентировочные высоты всей поверхности и получить полную трехмерную матрицу объекта.

Методы исследования. 1. Описание методики.

Предлагаемая методика обработки исходных видеоданных состоит из нескольких этапов:

1. Шумоподавляющая фильтрация изображения.
2. Определение карты высот поверхности по световым бликам в узловых точках.
3. Выделение контура объекта (лица).
4. Вычисление карты высот всей поверхности объекта по яркостной картине.
5. Коррекция карты глубины.

1.1 Шумоподавляющая фильтрация изображения.

На первом этапе в системах обработки изображений наиболее значимым фактором является фильтрация изображения от шумов и помех, появляющихся вследствие преобразования сигналов [11-13]. Помехи и шумы на изображении могут оказывать влияние на алгоритмы распознавания объектов за счет уменьшения контрастности и изменения яркостной картины изображения.

Оптимальным является алгоритм пространственной фильтрации изображений, осуществляющий адаптивное, скользящее усреднение сигнала по двумерной апертуре, форма которой определяется характером изображения в прямоугольной окрестности рассматриваемого элемента [12].

Для анализа используется изображение растрового вида, заданное в виде матрицы $P = \{p_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, N$, где p_{ij} – значения яркости элемента изображения; $p_{ij} \in [0, M-1]$; M – число уровней яркости, N – размер матрицы.

Данное изображение представляет собой совокупность областей-изображений объектов и фона, искаженных аддитивным шумом.

Условно алгоритм разбивается на два этапа. На первом этапе для каждого элемента изображения проводится адаптивное усреднение по направлению строки. Для этого рассматриваются все возможные отрезки Δ_k длины L , включающие в себя элемент, в котором производится усреднение:

$$(i, j) \in \Delta_k, \quad k = 1, \dots, L,$$
$$\Delta_k = \{p_{ia}\}, \quad a = j - L + k \dots j + L - 1.$$

Для каждого отрезка Δ_k строки выделяется среднее значение S_k и дисперсия D_k :

$$S_k = \frac{1}{L} \cdot \sum_{(m,l) \in \Delta_k} p_{m,l},$$
$$D_k = \frac{1}{L} \cdot \sum_{(m,l) \in \Delta_k} p_{m,l}^2 - S_k^2.$$

Затем определяется отрезок Δ_d с минимальной дисперсией, где

$$d = \arg \min_{m=1, \dots, L} (D_m).$$

В качестве результата x_{ij} адаптивного усреднения по строке элемента (i, j) изображения используется локальное среднее значение S_d по отрезку Δ_d строки, для которого дисперсия D_d минимальна: $x_{ij} = S_d$.

На втором этапе аналогичная процедура используется для адаптивного усреднения по столбцу полученных на первом этапе значений $X = \{x_{ij}\}$. Для этого рассматриваются отрезки j -го столбца изображения длины L , включающие в себя элемент (i, j) :

$$(i, j) \in Q_k, \quad k = 1, \dots, L.$$

Для каждого отрезка Q_k столбца вычисляется среднее значение \bar{S}_k и дисперсия \bar{D}_k значений его элементов:

$$\bar{S}_k = \frac{1}{L} \cdot \sum_{(m,l) \in Q_k} x_{m,l},$$

$$\bar{D}_k = \frac{1}{L} \sum_{(m,l) \in Q_k} x_{m,l}^2 - \bar{S}_k^2.$$

После этого определяется отрезок Q_d с минимальной дисперсией:

$$d = \arg \min_{m=1, \dots, L} (\bar{D}_m).$$

В качестве результата $y_{ij}^{(1)}$ адаптивного усреднения по столбцу элемента (i, j) изображения используется локальное среднее значение \bar{S}_d по отрезку Δ_d строки, для которого дисперсия \bar{D}_d является минимальной: $y_{ij}^{(1)} = \bar{S}_d$.

В результате для каждого элемента (i, j) изображения результатом z_{ij} адаптивной пространственной фильтрации является среднее значение, рассчитанное по апертуре, содержащей L^2 элементов, форма которой определяется характером исходного изображения в некоторой окрестности элемента (i, j) .

Основными операциями при реализации алгоритма являются вычисления локального среднего и фильтрация. Для сокращения объема вычислений можно использовать рекуррентные ссылки. Такой способ обработки данных позволяет сохранять присутствующие на изображении малоконтрастные объекты.

1.2 Определение карты высот объекта по данным парных снимков.

Вычисление расстояний до поверхности объекта обычно производится по парным кадрам изображения, полученным под разными углами. Для этого используются две фотокамеры, расположенные на некотором расстоянии (200-500 мм) друг от друга (рис.1). Если известны координаты определенной точки на двух (или более) изображениях одного и того же объекта, полученные под разными углами зрения, можно, зная параметры камер, вычислить координаты точки в трехмерном пространстве [14]. Одна из основных проблем в стереорекострукции – найти точное соответствие точек между изображениями, применяемыми для реконструкции.

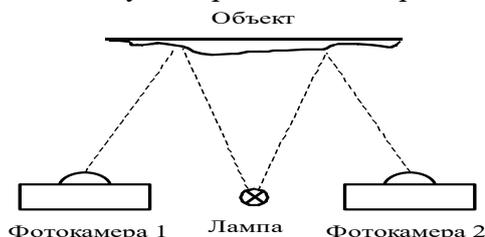


Рис. 1. Получение стереоизображения с помощью двух фотокамер

Fig. 1. Receiving stereo image using two cameras

Для получения математической трехмерной модели необходимо иметь карту высот поверхности объекта, где массиву точек на этой поверхности соответствуют их пространственные координаты x , y и z . Такие данные можно получить также используя эффект изменения направления освещенности объекта при помощи нескольких направленных источников освещения, расположенных в одной плоскости на некотором расстоянии друг от друга. Расстояние между ними определяется удаленностью фотокамеры и лампы освещения от объекта. Вариант взаимного расположения фотокамеры и лампы освещения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Взаимное расположение фотокамеры и лампы для определения карты высот

Fig. 2. The relative position of the camera and lamps to determine the height map

Количество ламп определяется степенью детализации сведений о рельефе поверхности. Для объектов несложной формы достаточно двух ламп освещения.

Съемка кадров ведется поочередно с каждой лампой, в результате чего результатом является два или более последовательных кадра. Расстояние между точкой съемки и точками карты высот определяется по бликам от ламп. Смещение плоскости расположения ламп относительно фотокамеры объясняется тем, что при его отсутствии измерение расстояния от объекта до фотокамеры невозможно, так как в этом случае световые блики будут располагаться в одном месте независимо от удаленности предмета исследования.

На рис. 3 приведена схема расположения средств и объекта съемки для определения карты высот одной фотокамерой. При помощи первой лампы получают карту высот поверхности для левой половины объекта, а второй лампы – правой половины.

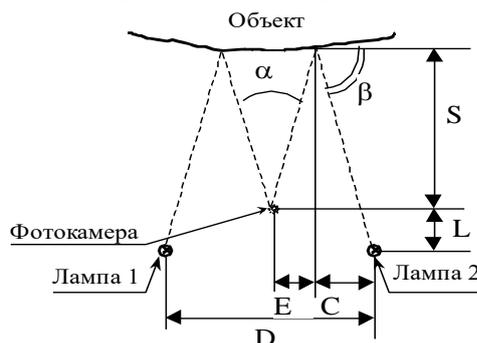


Рис. 3. Определение карты высот с помощью одной фотокамеры

Fig. 3. Determination of the height map using one camera

Определение расстояния от плоскости фотокамеры до поверхности объекта (рис. 3) производится исходя из следующих формул:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{S}{E}, \\ \operatorname{tg} \beta &= \frac{S+L}{C}. \end{aligned}$$

Приравняв правые части данных выражений, получим формулу, по которой будет определяться расстояния от плоскости фотокамеры до поверхности объекта в определенной точке:

$$S = \frac{E \cdot L}{C - E}, \quad (1)$$

Расстояние между плоскостью расположения ламп и фотокамерой L влияет на изменение параметра $S(E)$ (рис. 4). Увеличение L приводит к возрастанию зависимости S от E . Для малорельефной поверхности объектов, к которым можно отнести человеческое лицо (изменение высоты поверхности 1..100 мм), оптимальным является значение L равное 200 мм, так как в результате изменение расстояния до объекта будет колебаться от 1000 до 1100 мм.

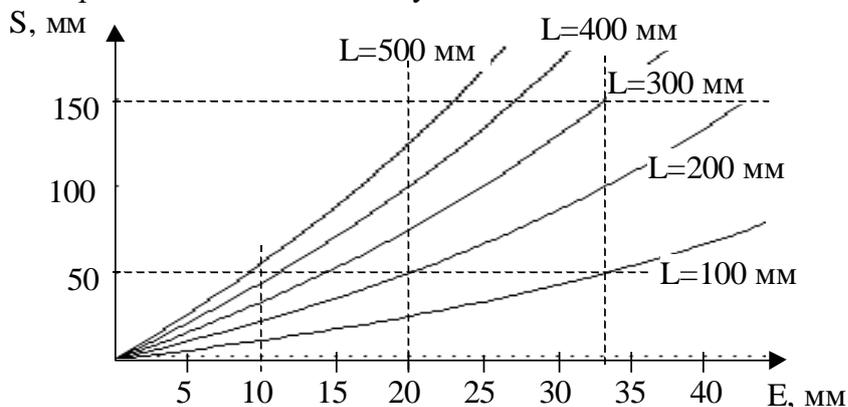


Рис. 4. Влияние расстояния L на изменение параметра $S(E)$

Fig.4. Influence of the distance L on the change in the parameter $S(E)$

Увеличение этого значения приведет к увеличению ошибки вычисления высоты поверхности, а уменьшение зависит от разрешения используемой фотокамеры (при дальности съемки около 1 м). Если дальность съемки необходимо изменить, то L должно быть соответственно увеличено или уменьшено. В результате обработки изображения объекта будет получена карта высот поверхности, в которой координатами X, Y и Z будут заданы точки, расположенные на поверхности предмета перпендикулярной к плоскости фотокамеры.

1.3. Выделение контура объекта.

Различные виды обстановки в помещении, ориентация светового потока, фоновой освещение приводят к дополнительным сложностям при выделении контуров объекта [15-17]. Для более четкого определения контура из-за различных помех и особенностей светового потока необходимо повысить контрастность изображения в 5-20 раз. Повышение или снижение контрастности изображения осуществляется умножением значения каждого цветового канала RGB на некоторый специальным образом подобранный коэффициент, что приводит к изменению соотношений между цветами a , следовательно, и к более четким границам. Для изменения контрастности без потери средней яркости используем формулу [16, 17]:

$$y_{ij}^{(2)} = K \cdot (y_{ij}^{(1)} - \bar{Y}) + \bar{Y},$$

где $y_{ij}^{(2)}$ - новое значение одного из каналов; K - коэффициент контрастности ($0 < K < 1$ - снижение, $K > 1$ - повышение контрастности); $y_{ij}^{(1)}$ - текущее значение яркости канала; \bar{Y} - среднее значение яркости канала по всему изображению.

Яркость точки находится по формуле, коэффициенты которой определяются свойствами человеческого зрения [18]:

$$y_{ij}^{(2)} = 0.3 \cdot R + 0.59 \cdot G + 0.11 \cdot B,$$

где R, G, B – яркость изображения по красной, зеленой и голубой составляющим

В результате изменения контрастности изображение объекта приобретает более четкий вид. Дальнейшая обработка производится по методу Собела [18-20], использующего двухмерную апертуру 3 на 3 вида:

1	2	3
8		4
7	6	5

$$X = (A3 + 2 \cdot A4 + A5) - (A1 + 2 \cdot A8 + A7),$$

$$Y = (A1 + 2 \cdot A2 + A3) - (A7 + 2 \cdot A6 + A5).$$

Значение центрального элемента F находится по формуле:

$$F' = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

Окончательное значение F' помещается вместо элемента F , после чего рабочее окно сдвигается на один элемент влево (далее - слева направо и сверху вниз).

1.4. Коррекция рельефа поверхности по яркостной картине.

Получение карты высот поверхности является недостаточной информацией для построения матрицы всего объекта. Для ее получения необходимо откорректировать полученные высоты, а также ввести недостающую информацию о провалах в рельефе. Это можно осуществить, получив яркостную картину изображения, на основании которой вычислить ориентировочные высоты всей поверхности. Информация, полученная в комплексе при обработке данных обоими методами, дает нам полную трехмерную матрицу объекта.

При визуализации трехмерных объектов яркость точки поверхности вычисляется с использованием математических моделей освещения и отражения света от поверхности. В общем случае яркость точки зависит от таких характеристик, как свойства источников света, характеристики поверхности, ориентации поверхности относительно падающего света, точки зрения наблюдателя и т.д. Недостатком существующих моделей является их существенная некорректность, т.к. неизвестных переменных гораздо больше, чем исходных данных. Но поскольку в решаемой задаче исследуемый объект (лицо человека) находится на неизменном расстоянии от точки наблюдения и освещено равномерными источниками света, то будем учитывать только коэффициент отражения и цвет. Получим по карте высот поверхности параметры соответствия яркости точки и ее отдаленности от точки наблюдения.

Обсуждение результатов. Предлагаемый метод основан на специфической форме головы человека. Данный метод предполагает, что голова, при виде сверху, имеет форму вытянутого эллипса [21, 22] (рис. 5).

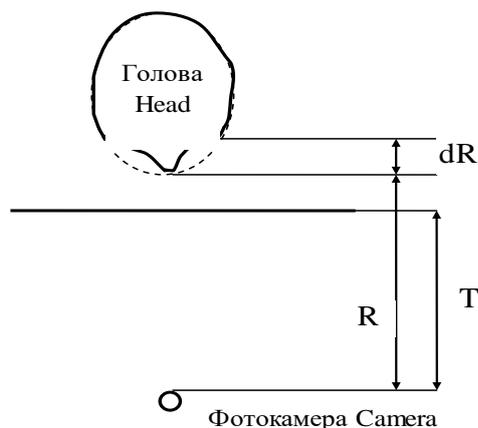


Рис.5. Определение карты высот поверхности лица
Fig. 5. Determination of the elevation map of the face surface

Расстояние от точки наблюдения до поверхности эллипса определяется на основании яркости точек на изображении, представляющего собой плоскость.

При вычислении оно определяется как разность расстояний между плоскостью изображения ($R(x, y)$) и поверхностью эллипса ($T(x, y)$):

$$H(x, y) = R(x, y) - T(x, y). \quad (2)$$

Так как яркости точек вносят дополнительные изменения расстояний (2), в результате мы получаем карту высот всей поверхности объекта (3).

$$K(x, y) = G / R^2, \quad (2)$$

$$P(x, y) = H(x, y) \cdot K(x, y). \quad (3)$$

Имея яркостную карту высот поверхности (формулы (1) и (3) можно определить коэффициент, учитывающий коэффициент отражения и цвет поверхности в узловых точках, полученных по формуле (1):

$$N = P(x, y) / S(x, y).$$

На конечном этапе можно откорректировать карту глубины, умножив яркостную карту высот поверхности на этот коэффициент, и получить в результате пространственную модель объекта в виде трехмерной матрицы.

Экспериментальное исследование разработанного алгоритма проверим на трехмерных моделях головы человека, взятых с сайта <https://open3dmodel.com>. Примеры тестовых моделей приведены на рис. 6. Использование моделей в этом случае позволяет легко получить стереофотографии, а также определить степень отклонения от реальных карт глубины, полученных с помощью специализированного программного обеспечения на основе трехмерной математической модели.



Рис. 6. Примеры тестовых моделей головы для проверки работы алгоритма
Fig.6.Examples of test head models to check the algorithm

Карты глубины лица для тестовых изображений после обработки алгоритмом Depth Transfer [5] и с помощью разработанного алгоритма представлены на рис. 6 – 8.



Рис. 7. Карты глубины тестовых изображений, полученные методом Depth Transfer
Fig. 7. Depth maps of test images obtained by the Depth Transfer method



Рис. 8. Карты глубины тестовых изображений, полученные после выполнения процедуры коррекции яркости

Fig. 8. Depth maps of test images obtained after performing the brightness correction procedure

Визуальный анализ позволяет сделать вывод, что карты глубины для первого фото, не содержащего значимых бликов, для методов Depth Transfer и разработанного метода практически не отличаются. Для второй фотографии, содержащей выраженные блики, разработанный метод позволяет уменьшить влияние бликов на карту глубины.

В табл. 1 представлены значения погрешности для тестовых изображений. Критерием эффективности оценки выступает значение среднеквадратического отклонения разности между оценкой и ее истинной моделью:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (Y_{i,j}^{(D)} - \bar{Y}_{i,j}^{(D)})^2}{N \cdot M}},$$

где $Y_{i,j}^{(D)}$ - модель карты глубины, полученная с помощью специализированного программного обеспечения на основании тестовых трехмерных моделей, $\bar{Y}_{i,j}^{(D)}$ - оценка карты глубины, полученная с помощью предлагаемого метода.

Таблица 1. Значения погрешности для тестовых изображений
Table 1. Values of error for test images

№ тестового изображения Test Image No.	Погрешность для метода Depth Transfer, %	Погрешность для разрабо- танного метода, % The error for the developed method, %
1	10,9	12,4
2	15,5	11,6
3	12,3	10,5
4	14,8	11,2
5	9,7	9,1
6	10,4	10,2

Анализ результатов обработки изображений показывает, что для рассмотренных тестовых изображений значение среднеквадратической ошибки для предложенного метода меньше в среднем на 5-10%, чем для метода Depth Transfer.

Вывод. Для эффективного исследования челюстно-лицевого отдела головы человека необходимо построить ее виртуальную модель. Существующие методы активного получения и обработки изображения требуют использования дорогостоящего оборудования.

Наиболее перспективным методом пассивного исследования является стереозрение, основанное на построении карты глубины по двум снимкам, сделанным с различных камер. Однако исходные фотоснимки могут обладать дефектами, из-за которых получение качественной математической модели исследуемого объекта может быть затруднено.

Предложенная методика коррекции карты глубины позволяет использовать яркость точки для исправления найденных дефектов и получения пространственной модели, которая в дальнейшем может быть использована для виртуального исследования или визуализации. Работа методики была успешно проверена на тестовых изображениях. На практике использование разработанной методики позволяет значительно сократить затраты на моделирование, так как требует наличия только двух фотокамер без другого дополнительного оборудования.

Библиографический список:

1. Бацева Д.А. Пассивные технологии моделирования головы человека / Д.А. Бацева, Ю.С. Белов // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 11-14.
2. Бацева Д.А. Активные технологии моделирования головы человека / Д.А. Бацева, Ю.С. Белов //Международный студенческий научный вестник. 2017. № 3. Режим доступа: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17296>. (Дата обращения: 21.11.2017).
3. Форсайт Д. А. Компьютерное зрение: современный подход / Д. А. Форсайт, Ж. Понс. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
4. Ульянов С.В. Разработка системы стереозрения для мобильного робота / С.В. Ульянов, А.Г. Решетников, К.В. Кошелев // Программные продукты и системы. 2017. Т. 3, № 30. С. 435–438.
5. Scharstein D. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // Int. Journal of Computer Vision. 2002. Vol. 47, No 1-3. pp. 7–42.
6. Вахитов А.Т. Обзор алгоритмов стереозрения / А.Т. Вахитов, Л.С. Гуревич, Д.В. Павленко // Стохастическая оптимизация в информатике. 2008. № 4. С. 151-169.
7. Котюжанский Л.А. Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени / Л.А. Котюжанский // Фундаментальные исследования. 2012. № 6-2. С. 444-449.
8. Воронин В.В. Восстановление карты глубины на основе комбинированной обработки многоканального изображения / В.В. Воронин // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16360>. (Дата обращения: 11.01.2019).
9. Ковалев О.Ф. Повышение качества карт глубины по дальности / О.Ф. Ковалев // Информационные системы и технологии: материалы международного научного конгресса. Минск, 2016. - Минск: Изд-во Белорусского государственного университета. 2016. С. 942-946.
10. Gordon G.G. Face Recognition Based on DepthMaps and Surface Curvature / G.G. Gordon // Proceedings of the SPIE, Geometric Methods in Computer Vision, 1991. Vol. 1570. pp. 108–110.
11. Фурман Я.А. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман - М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. 592 с.
12. Новаковский С.В. Новые системы телевидения. Цифровые методы обработки видеосигналов / С.В. Новаковский - М.: Радио и связь. 1992. 88с.

13. Старовойтов В.В. Метрический базис цифровой обработки изображений / В.В. Старовойтов // Автоматизация обработки и распознавания изображений: сб. науч. тр. / Минск. 1995. С. 7-14.
14. Казанский Н.Л. Сравнение объекта и эталона по отклонению контуров / Н.Л. Казанский, Р.В. Хмелев // Компьютерная оптика. 2000. Вып. 20. С. 128-133.
15. Абламейко С.В. Выделение контуров объектов полутонового изображения на основе локальной бинаризации / С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский // Распознавание образов и анализ изображений: тез. докл. конф. Минск. 1993. С. 193-195.
16. Абламейко С.В. Векторное представление границ объектов полутонового изображения и их обработка в высокопроизводительных системах: инструкт.-метод. материалы / С.В. Абламейко, М.А. Самошкин, А.Я. Кулешов. Минск: ИТК АНБ. 1993. 123 с.
17. Zhang Yu-Jin. Advances in Image and Video Segmentation / Yu-Jin Zhang, Hershey: IRM Press. 2006. 473 с.
18. Senthilkumar N.A. Study on Edge Detection Methods for Image Segmentation / N.A. Senthilkumar, R. Rajesh // Proceedings of the International Conference on Mathematics and Computer Science (ICMCS-2009). 2009. Vol. 1. pp. 255-259.
19. Буй Т.Т.Ч. Анализ методов выделения краев на цифровых изображениях / Т.Т.Ч. Буй, В.Г. Спицын // Доклады ТУСУР. 2010. № 2 (22), ч. 2. С. 221-223.
20. Chellappa R. Statistical Methods and Models for Video-Based Tracking, Modeling, and Recognition / R. Chellappa и [др.] // Foundations and Trends in Signal Processing. 2010. No. 1-2. pp. 128-151.
21. Reyad Y.A. Image Thresholding Using Split and Merge Techniques with Log-Normal Distribution / Y.A. Reyad, A. El-Zaart, H. Mathkour // Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision. 2010. Vol.1, no.3. pp. 36-45.
22. Calderero F. Region Merging Techniques Using Information Theory Statistical Measures / F. Calderero, F. Marques // IEEE Transactions on Image Processing. 2010. Vol. 19, No. 6. pp. 1567-1586.

References:

1. Batseva D.A. Passivnyye tekhnologii modelirovaniya golovy cheloveka / D.A. Batseva, YU.S. Belov // Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki. 2017. № 2. S. 11-14. [Batseva D.A. Passive technologies for modeling the human head / D.A. Batseva, Yu.S. Belov // Scientific Review. Technical science. 2017. No. 2. S. 11-14. (In Russ)]
2. Batseva D.A. Aktivnyye tekhnologii modelirovaniya golovy cheloveka / D.A. Batseva, YU.S. Belov // Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik. 2017. № 3. Rezhim dostupa: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17296>. - (Data obrashcheniya: 21.11.2017). [Batseva D.A. Active technologies for modeling the human head. Batseva, Yu.S. Belov // International student scientific bulletin. 2017. No. 3. Access mode: <https://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17296>. (Date of access: 21.11.2017) (In Russ)]
3. Forsayt D. A. Komp'yuternoye zreniye: sovremennyy podkhod / D. A. Forsayt, ZH. Pons. - M.: Vil'yams, 2004. 928 s. [Forsight D.A. Computer vision: a modern approach / DA Forsyth, J. Pons. M.: Williams, 2004.928 p. (In Russ)]
4. Ulyanov S.V. Razrabotka sistemy stereozreniya dlya mobil'nogo robota / S.V. Ulyanov, A.G. Reshetnikov, K.V. Koshelev // Programnyye produkty i sistemy. 2017. T. 3, № 30. S. 435-438. [Ulyanov S.V. Development of a stereo vision system for a mobile robot / S.V. Ulyanov, A.G. Reshetnikov, K.V. Koshelev // Software products and systems. 2017. T. 3, No. 30. pp. 435-438. (In Russ)]
5. Scharstein D. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // Int. Journal of Computer Vision. 2002. Vol. 47, No 1-3. pp. 7-42.
6. Vakhitov A.T. Obzor algoritmov stereozreniya / A.T. Vakhitov, L.C. Gurevich, D.V. Pavlenko // Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike. 2008. № 4. S. 151-169. [Vakhitov A.T. Review of stereovision algorithms / A.T. Vakhitov, L. S. Gurevich, D.V. Pavlenko // Stochastic optimization in computer science. 2008. No. 4. pp. 151-169. (In Russ)]
7. Kotyuzhanskii L.A. Vychisleniye karty glubiny stereoizobrazheniya na graficheskom protsessore v real'nom vremeni / L.A. Kotyuzhanskii // Fundamental'nyye issledovaniya. 2012. № 6-2. S. 444-449. [Kotyuzhansky L.A. Calculation of the depth map of a stereo image on a graphics processor in real time / L.A. Kotyuzhansky // Fundamental Research. 2012. No. 6-2. pp. 444-449. (In Russ)]
8. Voronin V.V. Vosstanovleniye karty glubiny na osnove kombinirovannoy obrabotki mnogokanal'nogo izobrazheniya / V.V. Voronin // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 6. Rezhim dostupa: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16360>. (Data obrashcheniya: 11.01.2019). [Voronin V.V. Reconstruction of the depth map based on combined processing of a multichannel image / V.V. Voronin // Modern problems of science and education. 2014. No. 6. Access mode: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16360>. (Date of access: 11.01.2019) (In Russ)]
9. Kovalev O.F. Povysheniye kachestva kart glubiny po dal'nosti / O.F. Kovalev // Informatsionnyye sistemy i tekhnologii: materialy mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa. Minsk, 2016. - Minsk: Izd-vo Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. - 2016. - S. 942-946. [Kovalev O.F. Improving the quality of depth maps by range / O.F. Kovalev // Information systems and technologies: materials of the international scientific congress. Minsk, 2016. Minsk: Publishing house of the Belarusian State University. 2016. pp. 942-946. (In Russ)]
10. Gordon G.G. Face Recognition Based on DepthMaps and Surface Curvature / G.G. Gordon // Proceedings of the SPIE, Geometric Methods in Computer Vision, 1991. Vol. 1570. pp. 108-110.
11. Furman YA.A. Vvedeniye v konturnyy analiz i yego prilozheniya k obrabotke izobrazheniy i signalov / YA.A. Furman - M.: FIZMATLIT. 2002. 592 s. [Furman Ya.A. Introduction to contour analysis and its applications to image and signal processing / Ya.A. Furman M.: FIZMATLIT. 2002. 592 p. (In Russ)]
12. Novakovskiy S.V. Novyye sistemy televideniya. Tsifrovyye metody obrabotki videosignalov / S.V. Novakovskiy - M.: Radio i svyaz'. 1992. 88s. [Novakovsky S.V. New television systems. Digital methods of video signal processing / S.V. Novakovsky - M.: Radio and communication. 1992. 88p. (In Russ)]
13. Starovoitov V.V. Metric basis for digital image processing / V.V. Starovoitov // Automation of image processing and recognition: collection of articles. scientific. tr. / Minsk. 1995. pp. 7-14.

14. Kazanskiy N.L. Sravneniye ob"yekta i etalona po otkloneniyu konturov / N.L. Kazanskiy, R.V. Khmelev // Komp'yuternaya optika. 2000. Вып. 20. S. 128-133. [Kazansky N.L. Comparison of the object and the standard by the deviation of the contours / N.L. Kazansky, R.V. Khmelev // Computer Optics. 2000. Iss. 20. pp. 128-133. (In Russ)]
15. Ablameyko S.V. Selection of contours of objects of a halftone image based on local binarization / S.V. Ablameiko, D.M. Lagunovsky // Pattern recognition and image analysis: abstracts. report conf. Minsk. 1993 . p. 193-195.
16. Ablameyko S.V. Vector representation of the boundaries of grayscale objects and their processing in high-performance systems: instructional method. materials / S.V. Ablameiko, M.A. Samoshkin, A. Ya. Kuleshov - Minsk: ITK NSA. 1993 .123 p.
17. Zhang Yu-Jin. Advances in Image and Video Segmentation / Yu-Jin Zhang. Hershey: IRM Press. 2006 . 473 p.
18. Senthilkumaran N.A. Study on Edge Detection Methods for Image Segmentation / N.A. Senthilkumaran, R. Rajesh // Proceedings of the International Conference on Mathematics and Computer Science (ICMCS-2009). 2009. Vol. 1. pp. 255–259.
19. Buy T.T.CH. Analiz metodov vydeleniya krayev na tsifrovyykh izobrazheniyakh / T.T.CH. Buy, V.G. Spitsyn // Doklady TUSUR. 2010. № 2 (22), ch. 2. S. 221-223. [Bui T.T.Ch. Analysis of edge detection methods on digital images / T.T.Ch. Bui, V.G. Spitsyn // Reports of TUSUR. 2010. No. 2 (22), part 2. pp. 221-223 (In Russ)]
20. Chellappa R. Statistical Methods and Models for Video-Based Tracking, Modeling, and Recognition / R. Chellappa et [others] // Foundations and Trends in Signal Processing. 2010. No. 1-2. pp. 128-151.
21. Reyad Y.A. Image Thresholding Using Split and Merge Techniques with Log-Normal Distribution / Y.A. Reyad, A. El-Zaart, H. Mathkour // Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision. 2010. Vol.1, No.3. pp. 36-45.
22. Calderero F. Region Merging Techniques Using Information Theory Statistical Measures / F. Calderero, F. Marques // IEEE Transactions on Image Processing. 2010. Vol. 19, No. 6. pp. 1567-1586.

Сведения об авторах:

Короткевич Светлана Ивановна, старший преподаватель, кафедра систем автоматизированного проектирования и информационных систем; e-mail: sapris@vorstu.ru

Минаева Юлия Васильевна, старший преподаватель, кафедра систем автоматизированного проектирования и информационных систем; e-mail: myuvs@yandex.ru

Information about the authors:

Svetlana I. Korotkevich, Senior lecturer, Department of Computer-Aided Design and Information Systems; e-mail: sapris@vorstu.ru

Yulia V. Minaeva, Senior lecturer, Department of Computer-Aided Design and Information Systems;; e-mail: myuvs@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.08.2020.

Принята в печать 16.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.08.2020.

Accepted for publication 16.09.2020.

Для цитирования: В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов. Устойчивые дескрипторы в задачах распознавания изображений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3): 93-100. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-93-100

For citation: V.B. Melekhin, V.M. Khachumov. Stable descriptors in image recognition tasks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (3): 93-100. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-93-100

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.93.11

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-93-100

УСТОЙЧИВЫЕ ДЕСКРИПТОРЫ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Б. Мелехин¹, В.М. Хачумов^{2,3,4}

¹ Дагестанский государственный технический университет,

² Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН,

³ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,

⁴ Российский университет дружбы народов,

¹ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² 152021, Ярославская область, Переславский район, с.Веськово, ул.Петра Первого, 4а, Россия

³ 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2, Россия,

⁴ 117198, ЮЗАО, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение различных устойчивых характеристик изображений (полуинварианты и инварианты) как дескрипторы, необходимые для формирования признакового пространства эталонов, предназначенных для распознавания образов различной природы относящихся к различным классам объектов. **Метод.** В качестве методических основ, лежащих в построении методов распознавания образов, предлагаются метрики оценки близости распознаваемого изображения к заданному эталону в пространстве матриц ковариаций, опирающиеся на полученные дескрипторы. **Результат.** Разработано содержание основных этапов выделения дескрипторов заданного класса объектов с учетом различной освещенности распознаваемых изображений. Эффективность полученных результатов подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями, связанными с решением задачи распознавания специальных снимков - фаций. **Выводы.** Определение устойчивых дескрипторов изображения как инвариантов или полуинвариантов к преобразованиям масштабирования и яркости позволяет решать задачи классификации фаций в условиях нестациональности съемки распознаваемых изображений. При этом изображения могут быть повернуты и сдвинуты произвольным образом. В целом предложенный подход позволяет разработать эффективную систему распознавания образов при наличии различного рода помех на распознаваемых изображениях.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 20-07-00022 А и 17-29-07002 офи_м).

Ключевые слова: дескриптор, метрика, инвариант, полуинвариант, матрица ковариаций, классификация образов

STABLE DESCRIPTORS IN IMAGE RECOGNITION TASKS

V. B. Melekhin, V. M. Khachumov

¹ Daghestan State Technical University,

² A.K. Aylamazyan Institute of Software Systems Russian Academy of Sciences,

³ Federal Research Center "Informatics and Control" Russian Academy of Sciences,

⁴ Russian Peoples' Friendship University,

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

² 4a Petra Pervogo St., Yaroslavl region, Pereslavsky district, Veskovo village 152021, Russia

³ 44 Vavilova St., building 2, Moscow 119333, Russia,
⁴ 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to determine various stable characteristics of images (semi-invariants and invariants) as descriptors necessary for the formation of a feature space of standards intended for recognizing images of different nature belonging to different classes of objects. **Methods.** The authors propose metrics for evaluating the proximity of the recognized image to a given standard in the space of covariance matrices, based on the obtained descriptors as a methodological basis for constructing image recognition methods. **Results.** The content of the main stages of selecting descriptors for a given class of objects is developed, taking into account the different illumination of the recognized images. The effectiveness of the results obtained is confirmed by experimental studies related to the solution of the problem of recognition of special images – facies. **Conclusions.** The definition of stable image descriptors as invariants or semi-invariants to zoom and brightness transformations allows solving the problems of facies classification in conditions of the unstable shooting of recognized images. The images can be rotated and shifted in any way. In general, the proposed approach allows developing an effective image recognition system in the presence of various types of interference on the recognized images.

Acknowledgement. This work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research (projects 20-07-00022 A and 17-29-07002 ofi_m).

Key words: descriptor, metric, invariant, semi-invariant, covariance matrix, image classification

Введение. Понятие «инварианта» является одним из важнейших понятий математики [1]. Инвариантность – есть свойство математического выражения оставаться неизменным при выполнении определенных преобразований, что важно для задач классификации и распознавания объектов различной природы. Системы инвариантов позволяют объединять объекты одного класса и, напротив, разделять объекты, принадлежащие разным классам в рассматриваемой совокупности.

В настоящей работе под инвариантами, применительно к задаче распознавания, понимаются в широком смысле дескрипторы – неизменные математические конструкции аналитического (алгебраического и геометрического), вероятностного или статистического характера [2,3], служащие для описаний объектов, позволяющих осуществлять их поиск и распознавание.

Отдельно следует отметить, например, широко используемые в распознавании алгебраические многочлены для бинарных и полутоновых 2D и 3D изображений, которые являются инвариантами относительно аффинных преобразований [4-6]. В этом случае, относительной устойчивостью к яркостным преобразованиям обладают линии положения, характеризующие ориентацию графического объекта при известных расположениях его точек [7].

Помимо этого, к инвариантам можно отнести некоторые интегрированные числовые характеристики и конструкции (множества), например:

- 1) нормализованные гистограммы распределения яркостей в классе изображений,
- 2) подготовленные для распознавания или измерения расстояний матрицы ковариаций для каждого класса объектов,
- 3) средние значения (математические ожидания) вероятности распределения яркостных оттенков и значения отдельных признаков, характерных для всего класса объектов;
- 4) любые характеристики движения, при которых сохраняются расстояния между точками: площадь геометрической фигуры, угол между двумя прямыми - инвариант движения.

Постановка задачи. Следует отметить, что многие инвариантные конструкции обладают определенной устойчивостью (в определенных пределах) к изменениям отдельных характеристик объектов относящихся к рассматриваемому классу, но не гарантируют их полной или строгой инвариантности, следовательно, их целесообразно называть субинвариантами.

Довольно часто различные конструкции инвариантны только по отношению к части возможных преобразований входных данных, в этом случае их называют полуинвариантами.

Таким образом, возникает актуальная проблема, решение которой сводится к нахождению для исходных изображений вектора устойчивых признаков, который в последующем применяется для решения задачи классификации распознаваемых изображений. Причем, здесь не рассматриваются вопросы поиска и описания особых точек изображения, подобных методу SURF (Speeded Up Robust Features) инвариантных к масштабу и вращению или вопросы поиска алгебраических инвариантов.

Упор делается на поиск относительно устойчивых к смене освещения и изменения яркостных характеристик распознаваемых объектов. Подобные дескрипторы, как правило, устойчивы к аффинным преобразованиям, поскольку не связаны с координатами пикселей.

Методы исследования. 1. Нахождение устойчивых дескрипторов для распознавания изображений.

Рассмотрим функцию яркости цифрового изображения [8], дескрипторами которого служат числовые характеристики случайного стационарного процесса. Для ее анализа выберем гистограмму распределения значений яркости на изображении, начальные и центральные моменты, а также другие выделенные дескрипторы.

Выделение дескрипторов включает следующие основные этапы.

1. Построение нормализованной гистограммы изображения $p(z_i) = \frac{n_i}{n}$, где n_i – число пикселей i уровня яркости z_i ($i=0, \dots, L-1$), n – общее число пикселей изображения, величина L обычно является степенью двойки (например, 64, 256) в цветовой модели RGB и называется глубиной изображения.

Величина $p(z_i)$ определяется оценкой вероятности появления пикселя с интенсивностью z_i .

Условие нормирования $\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) = 1$.

Нормализованная гистограмма представляет собой полуинвариант, поскольку остается неизменной по отношению к масштабированию изображения. После выделения наиболее значимой части яркостного диапазона можно выполнить приведение гистограммы к шкале всего яркостного диапазона.

2. Построение матрицы совместной встречаемости пикселей:

$$C_r = \frac{1}{s} \sum_{z_i, z_j: r} p_2(z_i - z_j),$$

где r – отношение, в котором находятся пиксели i и j , а величина s соответствует числу сочетаний элементов, состоящих в отношении r . Она представляет собой оценку плотности распределения вероятности второго порядка $p_2(z_i, z_j)$ [9].

Все диагональные элементы матрицы совместной встречаемости c_{ii} равны площадям соответствующих областей изображения, значение яркости которых равно z_i .

Элементы матрицы c_{ij} ($i \neq j$), находящиеся вне главной диагонали, равны длинам границ разделяющих соответствующие области изображения, которые образованы пикселями с яркостями z_i и z_j .

Отношение r определяется с помощью расстояния $d = 1$ и одного из зафиксированных значений угла θ , который может быть: 0° , 45° , 90° и 135° .

3. Вычисление дисперсии: $\sigma^2(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)$. Дисперсия отражает разброс распределения яркостей изображения вокруг среднего значения. Она служит одной из устойчивых характеристик класса распознаваемых объектов.

2. Проведение экспериментов. Классификация изображений фаций. Эксперименты по распознаванию образов проводились на изображениях фаций – кристаллизованных капель биологической жидкости (в данном случае капель жидкости, выделяемой больным человеком) [10].

Исходные изображения фаций, представленные в формате JPEG и цветовой модели RGB, преобразовывались в формат NTSC (National Television System Committee) [11].

Обсуждение результатов.

Эксперимент 1. Для классификации используем метрику Махаланобиса [12,13], которая учитывает корреляцию между компонентами векторов (признаками):

$$d_M = \sqrt{(x - y)^T C^{-1} (x - y)},$$

где C – матрица ковариаций выделенных дескрипторов.

Матрица ковариаций для класса, представленного обучающей выборкой X , определяется следующим образом

$$C = \frac{1}{n-1} (X - \bar{X})^T (X - \bar{X}),$$

где \bar{X} – «центр» класса, $n \times n$ – размерность матрицы C .

Процесс выбора подходящих дескрипторов является процедурой эвристической, зависящей во многом от предметной области.

Использовались следующие устойчивые признаки-дескрипторы (табл. 1).

Таблица 1. Устойчивые дескрипторы
Table 1. Persistent descriptors

	Наименование Name	Формула Formula
1	Математическое ожидание случайной величины z Mathematical expectation of a random variable z	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$
2	Дескриптор относительной гладкости Descriptor of relative smoothness	$R = 1 - 1 / (1 + \frac{\sigma^2(z)}{(L-1)^2})$
3	Однородность изображения Image uniformity	$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$
4	Однородность матрицы Matrix uniformity	$U_c = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} c_{ij}^2$
5	Максимум вероятности Maximum probability	$p_{\max} = \max_{i,j} (c_{ij})$
6	Энтропия изображения Image entropy	$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$
7	Средняя энтропия для матрицы C_r Cr Average entropy for the matrix C_r	$e_c = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} c_{ij} \log_2 c_{ij}$

Указанные в табл.1 яркостные характеристики применялись для формирования учебной выборки и бинарной классификации графических образов. Примеры фаций показаны на рис. 1 и 2.

На рис.1 и 2 представлены пары расстояний d_M , измеренных до классов «High» (высокая степень заболевания) и «Normal» (отсутствие заболевания) соответственно.

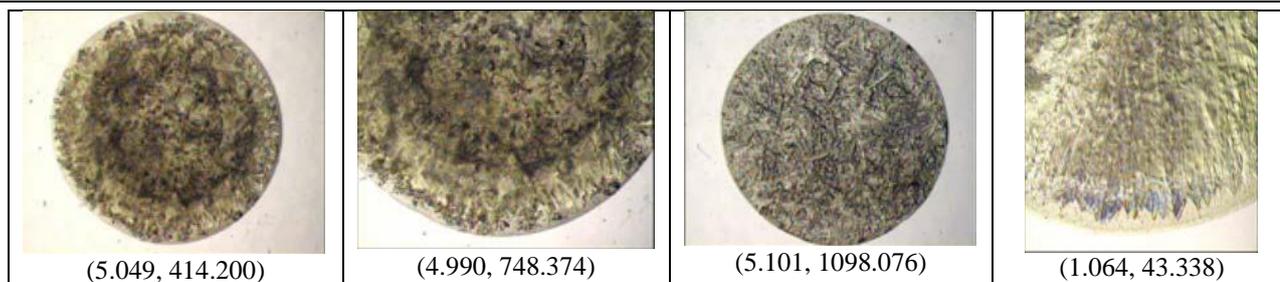


Рис. 1. Фации класса «High»
Fig. 1. Facies of class «High»

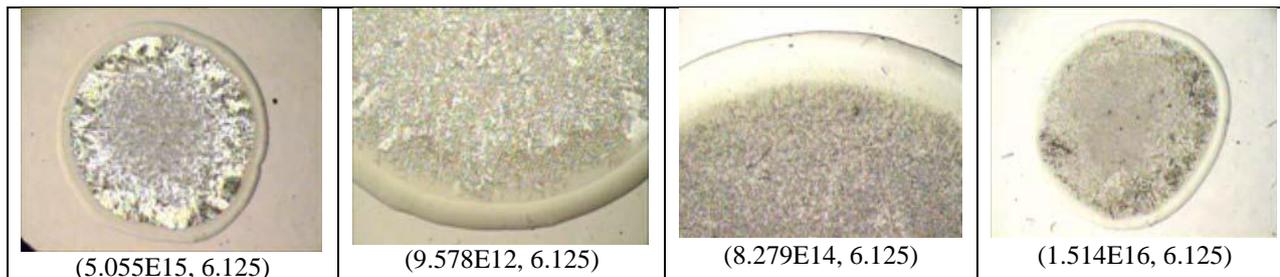


Рис. 2. Фации класса «Normal»
Fig. 2. «Normal» class facies

Преимуществом матрицы ковариаций является её инвариантность относительно некоторых преобразований. Если, например, два изображения отличаются лишь на постоянную составляющую интенсивности яркости, то после вычета средних матрицы становятся одинаковыми, обеспечивая устойчивость к аддитивному изменению яркости, и являются полуинвариантами.

Поскольку матрица ковариаций не несет в себе информации о порядке, номерах и координатах точек, то это определяет ее инвариантность относительно операций масштабирования и поворота.

Для того, чтобы получить инвариант к мультипликативным изменениям изображения необходимо выполнить дополнительное преобразование:

$$C = \frac{(X - \bar{X})^T (X - \bar{X})}{(n-1) \|X - \bar{X}\|^2}, \text{ где } \|Y\| - \text{норма, } \|B\| = \sqrt{\sum_{i,j \in R} B^2(i, j)}, B(i, j) \in B.$$

Заметим, что матрица ковариаций входит составной частью в метрику Махаланобиса, используемую для классификации.

Из выполненных исследований видно, что метрика, основанная на матрице ковариаций, обладает достаточной дискриминантной силой для уверенного выявления заболевания по снимку.

Эксперимент 2. Будем строить матрицы ковариаций на основе следующих пяти характеристик: интенсивности яркости $I(x, y)$, производных первого и второго порядка по x и по y . Таким образом, каждый пиксель изображения представляется в виде вектора:

$$F(x, y) = \left(I(x, y), \frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right)^T.$$

Пусть имеются три класса с соответствующими градациями камнеобразования «Normal», «Average» и «High». Примеры эталонных фаций для указанных классов представлены на рис.3.

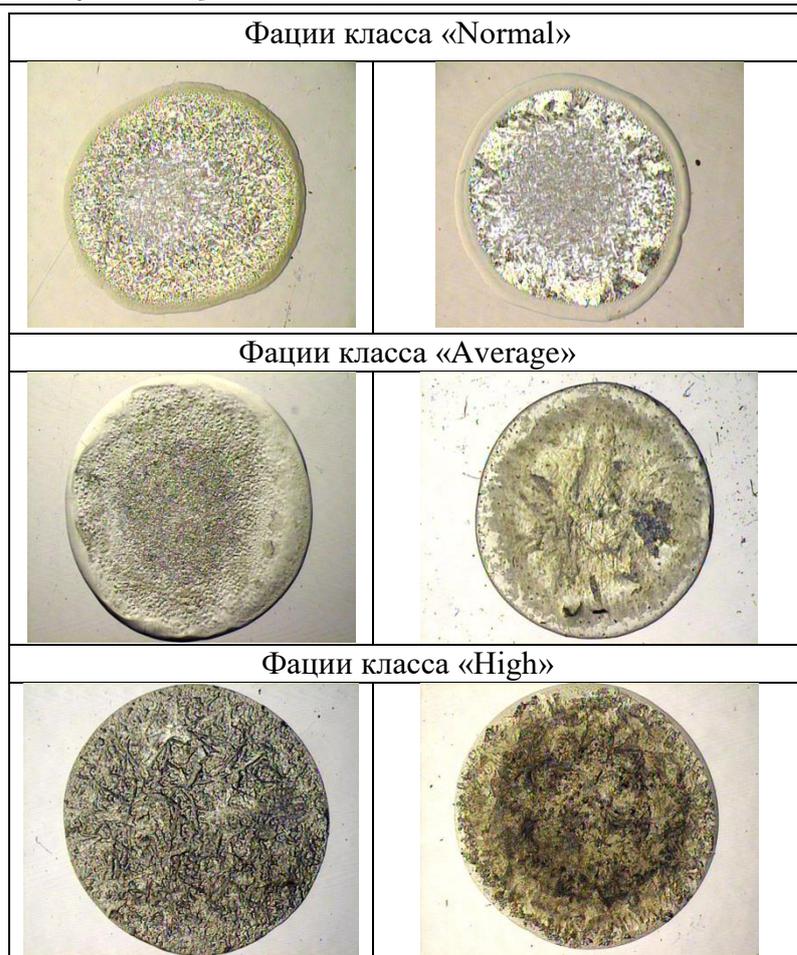


Рис.3.Примеры эталонных фаций
Fig. 3. Examples of reference facies

В пределах границ фаций выбирались случайно s квадратных областей (в экспериментах $s=100$). Вычислялись матрицы ковариаций для каждой области размером 16×16 и 128×128 пикселей. Для распознавания применялась метрика, основанная на использовании матриц ковариаций следующего вида [14]:

$$\rho(C_1, C_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \ln^2 \lambda_i(C_1, C_2)},$$

где $\lambda_i(C_1, C_2)$, $i=1, \dots, n$ – обобщенные собственные векторы матриц ковариаций C_1 и C_2 , вычисляемые из уравнения $|\lambda_i C_1 - C_2| = 0$.

Определим свойства предложенной метрики.

1. $\rho(C_1, C_2) \geq 0$ и $\rho(C_1, C_2) = 0$ только при условии $C_1 = C_2$;
2. $\rho(C_1, C_2) = \rho(C_2, C_1)$;
3. $\rho(C_1, C_2) + \rho(C_2, C_3) \geq \rho(C_1, C_3)$.

Для метрики $\rho(C_1, C_2)$ доказано выполнение свойств инвариантности относительно аффинных преобразований координат и операции инверсии для положительно определенных матриц. Проведен расчет расстояния от тестируемой фации до матриц каждого представителя эталонных изображений.

На рис.4 представлены средние значения минимальных расстояний до соответствующих классов, которые определяют принадлежность фации.

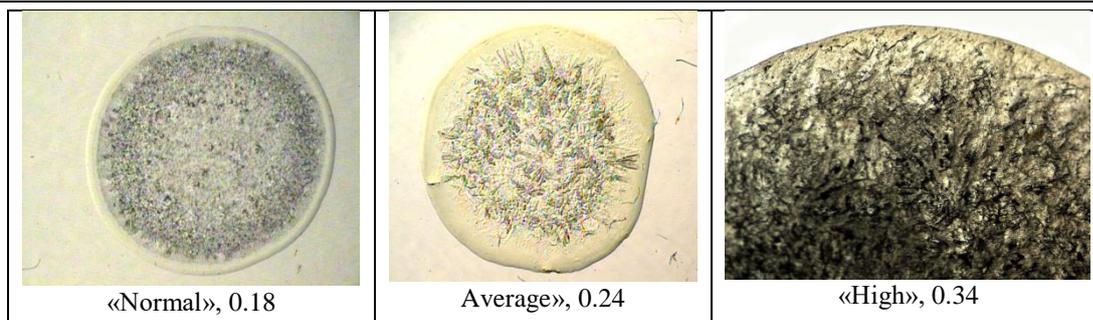


Рис. 4. Примеры фаций из тестовой выборки
Fig. 4. Examples of facies from the test sample

На основании того, какой класс получил больше голосов, выносятся решения. В ходе экспериментов было распознано правильно около 90% снимков.

Вывод. Выделение устойчивых дескрипторов изображения как инвариантов или полуинвариантов к преобразованиям масштабирования и яркости позволяет решать задачи классификации фаций в условиях возможной нестабильности съемки. При этом изображения могут быть повернуты и сдвинуты произвольным образом.

В этих условиях применение яркостных характеристик в качестве дескрипторов для классификаторов, построенных на матрицах ковариаций, демонстрирует уверенное выявление тяжелого заболевания мочекаменной болезнью и нормы в бинарной задаче и удовлетворительное качество при делении фаций на три класса.

Для большей уверенности в правильности выбранного признакового пространства необходимо существенно увеличить число эталонных и тестируемых снимков.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 20-07-00022 А и 17-29-07002 оф_и_м).

Библиографический список:

1. Винберг Э.Б., Попов В.Л. Теория инвариантов. – Итоги науки и техн. Сер. Современ. пробл. мат. Фундам. направления, 1989, том 55, с.137 – 309.
2. Дьёдонне Ж., Керрол Дж., Мамфорд Д. Геометрическая теория инвариантов. М.: Мир, 1974. 278 с.
3. Зубков А.Н. Обзор по теории инвариантов и ее приложениям // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2014. №1. С. 45 – 49.
4. Абрамов Н.С., Хачумов В.М. Распознавание на основе инвариантных моментов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2014. №2, С.142 –149.
5. Абрамов Н.С., Фраленко В.П. Определение расстояний на основе системы технического зрения и метода инвариантных моментов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. №4. С.32 – 39.
6. Хачумов М.В. Инвариантные моменты и метрики в задачах распознавания графических образов // Современные наукоемкие технологии. 2020. №4, Ч.1. С. 69 – 77.
7. Трушков В.В., Хачумов В.М. Определение ориентации объектов в трехмерном пространстве // Автоматрия. 2008. Т.44. №3. С. 75 – 79.
8. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Соифер В.А. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
9. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1991. 400 с.
10. Мажуга В.В., Хачумов М.В. Алгоритмы обработки изображений для классификации состояний биологических систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 2. С.54 –3.
11. NTSC. – <http://en.wikipedia.org/wiki/NTSC>
12. Хачумов М.В. Расстояния, метрики и кластерный анализ // Искусственный интеллект и принятие решений/ № 1, 2012. С. 81 – 89.
13. Хачумов М.В. Применение нейрона и расстояния Евклида-Махаланобиса в задаче бинарной классификации // Наука и современность. 2010. №2-3. С. 82-86.
14. Forstner V., Moonen B. A metric for covariance matrices. – Technical report, Dep. Of Geodesy and Geoinformatics, Stuttgart, 1999, pp. 113-128.

References:

1. Vinberg E.B., Popov V.L. Teoriya invariantov [Theory of invariants]. Itogi nauki i tekhn. Ser. Sovrem. probl. mat. Fundam. napravleniya, 1989, Vol. 55. pp.137 – 309. (In Russ)
2. D'yodonne ZH., Kerrol Dzh., Mamford D. Geometricheskaya teoriya invariantov [Geometric theory of invariants]. Moscow: Mir, 1974. 278 p. (In Russ)

3. Zubkov A.N. Obzor po teorii invariantov i ee prilozheniyam [Review of the theory of invariants and its applications]. Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika [Applied Mathematics and Fundamental Informatics]. 2014. №1. pp. 45 – 49. (In Russ)
4. Abramov N.S., Hachumov V.M. Raspoznavanie na osnove invariantnykh momentov [Recognition based on invariant moments]. Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Mathematics, computer science, physics]. 2014. No. 2. pp.142 – 149. (In Russ)
5. Abramov N.S., Fralenko V.P. Opredelenie rasstoyanij na osnove sistemy tekhnicheskogo zreniya i metoda invariantnykh momentov [Determination of distances based on the technical vision system and the method of invariant moments]. Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information technologies and computational systems]. 2014. No.4. pp.32 – 39. (In Russ)
6. Hachumov M.V. Invariantnye momenty i metriki v zadachah raspoznavaniya graficheskikh obrazov [Invariant moments and metrics in graphic image recognition problems]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern science-intensive technologies]. 2020. No.4, Ch.1. pp. 69 – 77. (In Russ)
7. Trushkov V.V., Hachumov V.M. Opredelenie orientacii ob"ektov v trekhmernom prostranstve [Determination of the orientation of objects in three-dimensional space]. Avtometriya [Avtometriya]. 2008. No.3 (44). pp. 75-79. (In Russ)
8. Metody komp'yuternoj obrabotki izobrazhenij [Methods of Computer Image Processing]. Pod red. V.A. Sojfer . Moscow: Fizmatlit, 2003. 784 p. (In Russ)
9. Pavlidis T. Algoritmy mashinnoj grafiki i obrabotki izobrazhenij [Algorithms of computer graphics and image processing]. Moscow: Radio i svyaz', 1991. 400 p. (In Russ)
10. Mazhuga V.V., Hachumov M.V. Algoritmy obrabotki izobrazhenij dlya klassifikacii sostoyanij biologicheskikh sistem [Image processing algorithms for classifying the states of biological systems]. Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information technologies and computing systems]. 2012. No.2. pp.54 –63. (In Russ)
11. NTSC. <http://en.wikipedia.org/wiki/NTSC>
12. Hachumov M.V. Rasstoyaniya, metriki i klasternyj analiz [Distances, metrics and cluster analysis]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision making]. No. 1, 2012, pp. 81 – 89. (In Russ)
13. Hachumov M.V. Primenenie nejrona i rasstoyaniya Evklida-Mahalanobisa v zadache binarnoj klassifikacii [Application of a neuron and Euclidean-Mahalanobis distance in the problem of binary classification]. Nauka i sovremennost' [Science and Modernity]. 2010. No. 2-3. pp. 82 – 86. (In Russ)
14. Forstner V., Moonen B. A metric for covariance matrices. Technical report, Dep. Of Geodesy and Geoinformatics, Stuttgart, 1999. pp. 113 – 128.

Сведения об авторах:

Мелехин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Хачумов Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуального управления.

Information about the authors:

Vladimir B. Melekhin , Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: 915533@mail.ru

Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Intelligent Control Laboratory. e-mail: 3vmh@isa.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.08.2020.

Принята в печать 12.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.08.2020.

Accepted for publication 12.09.2020.

Для цитирования: Э.К. Агаханов, С.Т. Хидиров, Г.Г. Габидулаев. Напряженное состояние оснований зданий и сооружений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(3):101-110. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-101-110

For citation: E. K. Agakhanov, S. T. Khidirov, G. G. Gabibulaev. Stress state of the foundations of buildings and structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(3):101-110. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-101-110

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-101-110

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Э.К. Агаханов, С.Т. Хидиров, Г.Г. Габидулаев

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

Резюме. Цель. Определение напряженного состояния грунтового основания с трапециевидальным вырезом от действия собственного веса, согласно условиям эквивалентности воздействий, сводится к определению напряженного состояния от внешней поверхностной нагрузки, распределенной по гидростатическому закону. **Метод.** Задача определения напряжений в основаниях сооружений при любой степени развития областей пластических деформаций грунта имеет строгую математическую формулировку, и критерии подобия могут быть получены с помощью более простого аппарата теории подобия. Моделирование осуществляется с помощью критериев подобия, на основании которых выполняется модель, определены условия нагружения и осуществлен переход от замеренных на модели величин к соответствующим величинам натурной конструкции. Критерии подобия могут быть получены либо с помощью теории подобия, либо с помощью анализа размерностей. Используя метод погружения совместно с методом центробежного моделирования можно достичь еще большего эффекта увеличения собственного веса модели из прозрачного оптически чувствительного материала. Фиксация напряжений в области модели при необходимости производится методом «замораживания». **Результат.** Используя систему уравнений смешанной задачи теории упругости и пластичности, и метод масштабов установлены критерии подобия для моделирования напряжений в основаниях зданий и сооружений. Отмечены ограничения по выбору множителей подобия для сыпучих грунтов, возможности применения при этом метода центробежного моделирования, а также особенности моделирования связных грунтов. **Вывод.** Необходимым условием подобия напряженных состояний сыпучих однородных оснований в натуре и модели является равенство множителей подобия геометрического масштаба и силового фактора.

Ключевые слова: основания сооружений, моделирование напряжений, критерии подобия, сыпучие грунты, центробежное моделирование, связные грунты

STRESS STATE OF THE FOUNDATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

E. K. Agakhanov, S. T. Khidirov, G. G. Gabibulaev

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

Abstract. Objective. Determination of the stress state of a ground base with a trapezoidal cut-off from the action of own weight, according to the conditions of equivalence of effects, is reduced to determining the stress state from the external surface load distributed according to the hydrostatic law. **Methods.** The problem of determining the stresses in the structure foundations at any degree of

areas development of a plastic strain of the soil has a strict mathematical formulation, and similarity criteria can be obtained using a simpler construct of similarity theory. The simulation is performed by using similarity criteria based on which the model is executed, the loading conditions are determined, and the transition from the values measured on the model to the corresponding values of the full-scale structure is carried out. Similarity criteria can be obtained either with the help of similarity theory or with the help of dimensional analysis. An even greater effect of increasing the self-weight of a model made of transparent optically sensitive material can be achieved using the immersion method in conjunction with the centrifugal modeling method. If necessary, the stresses in the model area are fixed using the "freeze" method. **Result.** Using the equations system of the mixed problem of the elasticity and plasticity theory, and the scale method, similarity criteria are established for modeling stresses in the foundations of buildings and structures. Limitations on the choice of similarity multipliers for loose soils, the possibility of using the method of centrifugal modeling, as well as features of modeling connected soils are noted. **Conclusion.** A necessary condition for the similarity of the stress states of loose homogeneous bases in nature and the model is the equality of the similarity multipliers of the geometric scale and the force factor.

Keywords: foundations of structures, stress simulation, similarity criteria, loose soils, centrifugal modeling, cohesive soils

Введение. Поскольку строительство здания или сооружения начинается с разработки котлована, то поверхность основания имеет соответствующий открытому котловану вырез [1]. При разработке грунтов котлована в окружающем массиве происходит изменение начального напряженного состояния, причем, чем шире и глубже котлован, тем значительнее эти изменения. Тогда напряжения в основании, возникающие от нагрузки, передаваемой зданием или сооружением через подошву фундамента, будут накладываться уже не на начальное поле напряжений, соответствующее природному давлению до разработки котлована, а на исходное поле напряжений, возникающее после его разработки.

В инженерной практике принимается, что, когда давление на поверхности дна котлована при строительстве здания или сооружения достигает веса извлеченного грунта, в основании произойдет изменение напряженного состояния от исходного до природного [2].

В работах Головина А.Я., Горбунова-Посадова М.И., Шехтера О.Я., Кофмана В.А. и Флорина В.А. [3-5] существуют рекомендации замены действия собственного веса грунта в области выреза поверхностными нагрузками, прикладываемыми к плоской поверхности основания в пределах ширины выреза. На практике проектирования широко используется вертикальное трапецидальное или прямоугольное, в зависимости от формы выреза, распределение фиктивной поверхностной нагрузки, соответствующее распределению весов вынимаемой, при отрывке котлована, части грунта. Для определения напряжений от поверхностных нагрузок в основании с плоской поверхностью используют известные аналитические решения. Однако использование таких приближенных расчетных схем приводит к снижению точности получаемых результатов.

Для решения некоторых вопросов проектирования, изучения строительных свойств оснований сооружений и экспериментальной проверки применяемых методов расчета иногда применяются исследования на моделях или штампах, достаточно малых размеров по сравнению с действительными сооружениями. В ряде случаев эти исследования производятся для изучения распределения напряжений по подошве сооружения и в толще основания, для определения характера и изменения величины осадки в зависимости от изменения нагрузки, для определения величины предельной нагрузки, при которой происходит выпор грунта основания, резкое увеличение осадки или же появление незатухающих во времени осадок и т. д. Поэтому представляется весьма существенным выяснить вопрос о допустимости перенесения полученных при этих исследованиях результатов на сооружения значительных размеров и об установлении надлежащих условий моделирования.

Следует отметить, что действие давления, равного весу извлеченного грунта, на поверхности котлована в действительности не эквивалентно действию собственного веса грунта, вынимаемого при отрывке котлована [6].

Определение напряженного состояния грунтового основания с трапецеидальным вырезом от действия собственного веса, согласно условиям эквивалентности воздействий, сводится к определению напряженного состояния от внешней поверхностной нагрузки, распределенной по гидростатическому закону [7, 8]. Данный результат позволяет иметь точную оценку исходного напряженного состояния оснований сооружений.

В частности, для моделирования напряжений в грунтовом основании с трапецеидальным вырезом можно использовать метод фотоупругости с применением оптически чувствительного материала [9].

Увеличение собственного веса материала модели достигается методами центробежного моделирования и погружения в тяжелую жидкость [10-13]. Используя метод погружения совместно с методом центробежного моделирования можно достичь еще большего эффекта увеличения собственного веса модели из прозрачного оптически чувствительного материала. Фиксация напряжений в области модели при необходимости производится методом «замораживания» [9].

Постановка задачи. Установление теоретически достаточно обоснованных и практически проверенных, т. е. находящихся в соответствии с результатами экспериментальных исследований условий моделирования имеет большое практическое значение не только с точки зрения выяснения вопроса о допустимости использования тех или иных результатов, установленных при исследованиях на моделях малого размера. Еще большее практическое значение условий моделирования заключается в выяснении надлежащих условий постановки этих исследований, при которых получаемые данные могли бы быть использованы применительно к сооружениям большого размера.

В соответствии с изложенным выше, рассмотрим грунтовое основание, на поверхности которого приложена равномерная нагрузка от сооружения и боковая пригрузка, обусловленная глубиной заложения фундамента (рис.1).

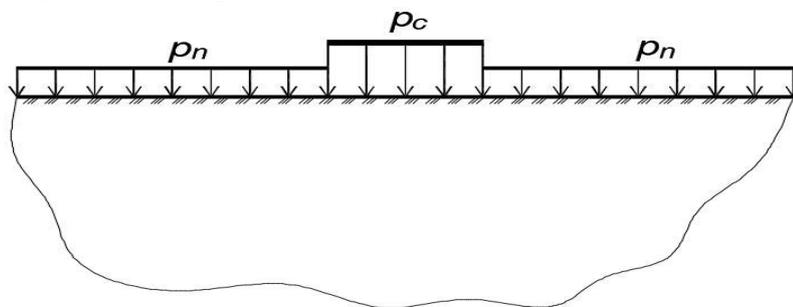


Рис.1. Грунтовое основание под действием нагрузки от сооружения и боковой пригрузки
Fig. 1. Subgrade under the action of the load from the structure and lateral surcharge

Исходя из общих принципов моделирование осуществляется с помощью критериев подобия, на основании которых выполняется модель, определяются условия нагружения и осуществляется переход от замеренных на модели величин к соответствующим величинам натурной конструкции. Критерии подобия могут быть получены либо с помощью теории подобия, либо с помощью анализа размерностей [14].

С учетом уровня развития теории механики сплошных сред вполне можно полагать, что задача определения напряжений в основаниях сооружений при любой степени развития областей пластических деформаций грунта имеет строгую математическую формулировку, и критерии подобия могут быть получены с помощью более простого аппарата теории подобия.

Методы исследования. Для установления необходимых критериев по теории подобия выпишем систему уравнений плоской смешанной задачи теории упругости и пластичности для модели [5, 15]:

Уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Граничные условия на поверхности в области сооружения и вне ее

$$\sigma_z = p_c, \quad \sigma_z = p_n. \quad (2)$$

Условие совместности в упругой области

$$\nabla^2 (\sigma_x + \sigma_z) = 0. \quad (3)$$

Условие предельного равновесия в пластической области

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_c) \text{Sin } \varphi. \quad (4)$$

Где: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = 0$ обозначает оператор Лапласа,

γ - удельный вес грунта,

$$\sigma_c = c \cdot \text{Ctg } \varphi,$$

φ - угол внутреннего трения грунта,

c - удельное сцепление грунта.

Применяя метод масштабов, введем подобные преобразования между величинами в натуре и модели:

$$\begin{aligned} \sigma_x^H &= K_\sigma \cdot \sigma_x^M; \\ \sigma_z^H &= K_\sigma \cdot \sigma_z^M; \\ \tau_{xz}^H &= K_\sigma \cdot \tau_{xz}^M; \\ X^H &= K_l \cdot X^M; \\ Z^H &= K_l \cdot Z^M; \\ \gamma^H &= K_\gamma \cdot \gamma^M; \\ \text{Sin } \varphi^H &= K_\varphi \cdot \text{Sin } \varphi^M; \\ \sigma_c^H &= K_c \cdot \sigma_c^M; \\ p_c^H &= K_p \cdot p_c^M; \\ p_n^H &= K_p \cdot p_n^M. \end{aligned} \quad (5)$$

Если записать систему уравнений (1) - (4) для натуре, то с помощью соотношений (5) ее можно привести к виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_\sigma}{K_l} \left[\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] &= 0, \\ \frac{K_\sigma}{K_l} \left[\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right] + K_\gamma \gamma &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{K_\sigma}{K_p} \sigma_z = p_c, \quad \frac{K_\sigma}{K_p} \sigma_z = p_n. \quad (7)$$

$$\frac{K_\sigma}{K_l} \nabla^2 (\sigma_x + \sigma_z) = 0. \quad (8)$$

$$K_\sigma (\sigma_1 - \sigma_2) = [(\sigma_1 + \sigma_2) K_\sigma + 2K_c \sigma_c] K_\varphi \text{Sin } \varphi. \quad (9)$$

Чтобы уравнения (6) - (9), записанные для натуры, совпали с соответствующими уравнениями для модели, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\frac{K_\sigma}{K_l K_\gamma} = 1, \quad K_\sigma = K_p, \quad K_\sigma = K_c, \quad K_\varphi = 1. \quad (10)$$

Из второго условия (10) получим формулу для пересчета напряжений с модели на натуру:

$$\sigma_x^H = K_p \cdot \sigma_x^M; \quad \sigma_z^H = K_p \cdot \sigma_z^M; \quad \tau_{xz}^H = K_p \cdot \tau_{xz}^M. \quad (11)$$

Из условий (10) получаем, что при этом должны выполняться следующие соотношения:

$$K_\varphi = 1, \quad K_c = K_\sigma, \quad K_\gamma = \frac{K_p}{K_l}. \quad (12)$$

В случае сыпучего грунта условие (12) принимает вид:

$$K_\varphi = 1, \quad K_\gamma = \frac{K_p}{K_l}. \quad (13)$$

Для увеличения собственного веса грунта можно использовать метод центробежного моделирования [12]. Тогда множители подобия геометрического масштаба и силового фактора должны быть подобраны в соответствии с условием моделирования (13).

Центробежное моделирование для изучения напряжений в грунтах на уменьшенных моделях было предложено Н.Н. Давиденковым и Г.И. Покровским. Идея способа центробежного моделирования заключается в следующем. К коромыслу, укрепленному на вертикальной оси, на равных расстояниях от оси шарнирно подвешены две каретки (или одна каретка и противовес). При вращении коромысла с достаточно большой угловой скоростью каретки вследствие влияния центробежных сил приходят в горизонтальное положение. При этом центробежные силы будут воздействовать на скелет грунта уложенной в каретке модели сооружения или основания в виде соответствующих массовых или объемных сил, аналогичных по своему действию силам тяжести. Увеличивая скорость вращения, можно достигнуть любого желаемого увеличения этих объемных сил и, в частности, такого, чтобы было удовлетворено условие моделирования.

Метод центробежного моделирования основан на аналогии между объемными массовыми и инерционными силами, возникающими в теле при его вращении в центрифуге с постоянной угловой скоростью ω . Объемная центробежная сила в каждой точке модели, как известно, пропорциональна расстоянию r от этой точки до оси вращения и квадрату угловой скорости вращения модели:

$$I = \frac{\gamma_m \omega^2 r}{g},$$

где γ_m - объемная масса материала модели,
 g - ускорение свободного падения.

В отличие от моделируемой массовой силы распределение силы инерции неравномерно по объему модели. Исключить эту погрешность можно с помощью испытания двух идентичных моделей (основной и дополнительной) в диаметрально противоположных камерах центрифуги.

В случае модели с односторонними неударяющими связями, дополнительную модель помещают в жидкость, плотность которой превышает плотность модели. Размеры модели должны быть гораздо меньше радиуса центрифуги, тогда изменением массовых сил в пределах модели можно пренебречь.

При центробежном моделировании тел, составленных из материалов с разными объемными массами $\gamma_1 \neq \gamma_2$, необходимо соблюдение отношений:

$$\frac{\gamma_1^{(нат)}}{\gamma_2^{(нат)}} = \frac{\gamma_1^{(мод)}}{\gamma_2^{(мод)}}.$$

Данное условие существенно сужает круг решаемых задач, делая необходимым получение модельных материалов различных объемных масс, что является весьма сложной задачей.

Следует подчеркнуть, что необходимость выполнения первого условия (13) обусловливается условием предельного равновесия в пластической области. Поэтому на стадии, когда области предельного напряженного состояния или отсутствуют, или же, пренебрежимо малы, допускается изготовление модели из другого материала. В таком случае для моделирования напряжений в основаниях сооружений можно использовать метод фотоупругости с применением оптически чувствительного материала [9].

Увеличение собственного веса материала модели достигается методом погружения в тяжелую жидкость [10, 11]. Эквивалентность (аналогия) между задачами о действии массовых сил и о погружении тела в жидкость (иммерсионная аналогия) была сформулирована С.Г. Гутманом.

Для увеличения напряжений от действия массовых сил модель погружают в тяжелую жидкость. При этом в модели возникают такие же, отличающиеся только по знаку, сдвиговые напряжения, как от действия массовых сил, а нормальные напряжения дополняют друг друга до величины гидростатического давления.

Таким образом, если тело с объемной массой γ_1 погрузить в жидкость с объемной массой $\gamma_2 \gg \gamma_1$, то в нем возникают напряжения, превосходящие напряжения от массовых сил в $(\gamma_2 - \gamma_1)/\gamma_1$ раз. Для применяемых оптически чувствительных материалов и тяжелых жидкостей (сплав Вуда, ртуть) силовое воздействие увеличивается примерно в 7-10 раз. Аналогия установлена как для плоской, так и для пространственной задачи.

Метод приведения массовых сил к внешней гидростатической нагрузке оказался весьма простым, эффективным и с успехом используется при исследовании напряжений от массовых сил в сложных инженерных конструкциях.

Однако в случае статически неопределимой относительно внешних сил задачи метод применим только при условии несжимаемости или абсолютной жесткости тел ($\nu = 0.5, E \rightarrow \infty$). Кроме того, в число ограничений метода следует включить то, что он основан на аналогии, до-

казывающей существование частичной эквивалентности, заключающейся в тождественном равенстве только напряжений.

Следует отметить, что методы центрифугирования и погружения в тяжелую жидкость нашли применение при исследовании как однородных, так и композитных (составных) конструкций.

Используя метод погружения совместно с методом центробежного моделирования можно достичь еще большего эффекта увеличения собственного веса модели из прозрачного оптически чувствительного материала [13].

Методы центрифугирования и погружения моделей в более тяжелую жидкость обычно рассматриваются как альтернативные, причем предпочтение отдается первому. Действительно, даже использование в качестве тяжелой жидкости сплава Вуда или ртути дает для эпоксидных моделей увеличение массовой силы только в 7-10 раз. В то же время существующие исследовательские центрифуги позволяют получать коэффициенты перегрузки на порядок выше. Однако возможности центрифуг не беспредельны. С повышением числа оборотов резко возрастает потребляемая электроприводом центрифуги мощность, увеличиваются требования к прочности узлов центрифуги.

Между тем, возникают задачи, в которых значения искомых напряжений и деформаций при моделировании массовых сил, как методом погружения, так и методом центрифугирования, даже используя центрифуги значительной мощности с $K_u = 150$, лежат в пределах точности измерений. Для моделирования таких задач, где необходимо дальнейшее увеличение массовых сил, представляется перспективным центрифугирование моделей с одновременным погружением их в тяжелую жидкость. Эффект совместного применения методов равен произведению эффектов при нагружении моделей каждым из этих методов в отдельности. Совместное использование метода погружения модели в тяжелую жидкость и метода центрифугирования позволяет увеличить коэффициент перегрузки, не изменяя скорости вращения центрифуги, а также изменить соотношение объемных масс элементов композитной модели. Все достоинства и недостатки, изложенные выше для каждого метода в отдельности, естественно, остаются в силе и при их сочетании.

Получаемые картины полос интерференции можно регистрировать непосредственно в процессе вращения центрифуги. Такая методика удобна для изучения концентрации напряжений вблизи вырезов плоских моделей зарядов, скрепленных с оболочкой. Ее можно применять также и при изучении объемных моделей с вклейками из оптически чувствительного материала.

Фиксация напряжений в области модели при необходимости производится методом «замораживания» [9]. Метод «замораживания» моделей на центрифуге позволяет определять напряжения от действия массовых сил в сложных пространственных моделях. Применительно к изучению напряжений в гидросооружениях методика «замораживания» объемных моделей на центрифуге была детально разработана Н.И. Пригоровским и Г.Л. Хесиным. Модель помещают в термостат, расположенный на стреле центрифуги, и в процессе вращения в термостате создают температурный режим, необходимый для «замораживания» деформаций. После «замораживания» модели на центрифуге в любое удобное время и с высокой точностью можно определить напряжения с помощью измерений в срезах (или методом рассеянного света).

В случае связного грунта условия моделирования, как было показано ранее, имеют вид:

$$K_\varphi = 1, K_c = K_p = K_\gamma K_l, K_\gamma = \frac{K_p}{K_l}. \quad (14)$$

Так как при обычных исследованиях связность грунта и его собственный вес не могут быть при постановке эксперимента изменены в соответствии с условиями моделирования, то выполнение условий (14) при изменении множителя подобия геометрического масштаба не может быть обеспечено ни при каком выборе множителя подобия силового фактора.

Если, однако, записать систему уравнений равновесия в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_x + \sigma_c) + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma_z + \sigma_c) + \gamma &= 0, \end{aligned} \right\}$$

граничные условия на поверхности в области сооружения и вне ее в виде

$$\sigma_z = p_c + \sigma_c, \quad \sigma_x = p_n + \sigma_c,$$

уравнение совместности для упругой области в виде

$$\nabla^2 [(\sigma_x + \sigma_c) + (\sigma_z + \sigma_c)] = 0$$

и уравнения предельного состояния для областей, находящихся в предельном напряженном состоянии, в виде

$$(\sigma_1 + \sigma_c) - (\sigma_2 + \sigma_c) = [(\sigma_1 + \sigma_c) + (\sigma_2 + \sigma_c)] \text{Sin } \varphi$$

то, поступая совершенно аналогичным путем, как и при выводе условий (10), можно получить, что условия подобия для связного грунта могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{K_{\sigma+\sigma_c}}{K_l K_\gamma} = 1, \quad \frac{K_{\sigma+\sigma_c}}{K_p} = 1, \quad K_\varphi = 1.$$

Обсуждение результатов. При моделировании напряжений в основаниях сооружений множители подобия K_l и K_p , определяющие геометрический масштаб и силовой фактор модели, могут быть выбраны произвольно, а множители K_φ , K_c и K_γ , определяющие угол внутреннего трения, удельное сцепление и удельный вес грунта, должны быть выбраны в соответствии с условиями (12).

Так как изменение собственного веса грунта в экспериментах с обычными моделями и на штампах не представляется возможным, то следует принимать $K_\gamma = 1$, откуда для сыпучих грунтов получается условие моделирования $K_p = K_l$.

Если грунт обладает сцеплением, то заменяем действие сил сцепления всесторонним равномерным давлением связности ($P_c = c \cdot \text{Ctg } \varphi$), приложенным к свободным граням грунта, т.е. приводим связной грунт к сыпучему.

Следует признать, что многие производившиеся измерения напряжений в основании и плоскости подошвы моделей и штампов малых размеров, а тем более измерения их осадок, являются весьма условным материалом, который не может быть перенесен на сооружения достаточно больших размеров. Пренебрежение влиянием собственного веса грунта допустимо только при достаточно малых ширинах полосы загрузки, по существу при размерах, приближающихся к обычным величинам штампов. С переходом же к размерам, приближающимся к размерам действительных больших сооружений, влиянием собственного веса грунта пренебрегать нельзя и необходимо исходить из полученных выше условий моделирования.

Вывод. Необходимым условием подобия напряженных состояний сыпучих однородных оснований в натуре и модели является равенство множителей подобия геометрического масштаба и силового фактора. Данное условие подобия значительно снижает ценность практического использования результатов исследования песчаных грунтов штампами в случае значительной ширины действительного сооружения. Экспериментальное исследование напряженно-

го состояния оснований зданий и сооружений должно быть выполнено с учетом всех условий моделирования, включая и для собственного веса грунта.

Библиографический список:

1. Chao C. K., Boundary integral equations for notch problems in plane thermoelasticity, AIAA journal, 1997, 35, №8, p. 1420-1422.
2. Юдина И. М., Разуплотнение грунтов основания котлованов и его учет при прогнозе осадок сооружений, Дис. канд. тех. наук, М., 1989.
3. Головин А.Я., Равновесие тяжелой упругой полуплоскости с непрямолинейной границей, Информационный бюллетень ленинградского политехнического института, № 8, 1957.
4. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., И Кофман В.А., Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована, Труды НИИ оснований и фундаментов, Сборник № 24, 1954.
5. Флорин В.А. Основы механики грунтов. – Л-М.: Госстройиздат, 1959. Т.1. 356 с.
6. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. № 2. 2013. С. 39-45.
7. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Грунтовое основание с трапецидальным вырезом под действием собственного веса. Научное обозрение. 2016. № 12. С. 67-71.
8. Elephant Agakhanov, Murad Agakhanov and Edward Batmanov. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. doi.org/10.1051/mateconf/201819303047
9. Метод фотоупругости, под ред. Г.Л. Хесина, М., Стройиздат, 1975.
10. Гутман С.Г., Приведение силы тяжести упругого тела к внешней гидростатической нагрузке. Изв. НИИ гидротехники, 1934, № 11.
11. Biot M. A. Distributed gravity and temperature loading in twodimensional elasticity replaced by boundary pressures and dislocations. Trans. ASME. Appl. Mech. 1935. Vol. 2. N 57.
12. Покровский Г.И., Федоров И.С., Центробежное моделирование в строительном деле, М., Стройиздат, 1968, 247 с.
13. Верещагин А.Н., Расширение возможностей моделирования массовых сил при центрифугировании моделей в тяжелой жидкости, VIII Всесоюз. конф. по методу фотоупругости, Таллин, 1979, с.108-110.
14. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике, М., Наука, 1965, с.386
15. Тимошенко С.П., Гудьер Дж., Теория упругости. М., Наука, 1975, 576 с.

References:

1. Chao C. K., Boundary integral equations for notch problems in plane thermoelasticity, AIAA journal, 1997, 35, №8, p. 1420-1422.
2. Yudina I. M., Razuplotneniye gruntov osnovaniya kotlovanov i yego uchet pri prognoze osadok sooruzheniy, Dis. kand. tekh. nauk, M., 1989.[Yudina IM, Deconsolidation of the foundation of foundation pits and its accounting in forecasting the sediment of structures, Dis. Cand. those. Sciences, M., 1989 (In Russ)]
3. Golovin A.YA., Ravnovesiye tyazheloy uprugoy poluploskosti s nepryamolineynoy granitsey, Informatsionnyy byulleten' leningradskogo politekhnicheskogo instituta, № 8, 1957.[Golovin A.Ya., Equilibrium of a heavy elastic half-plane with a non-rectilinear boundary, Information Bulletin of the Leningrad Polytechnic Institute, No. 8, 1957. (In Russ)]
4. Gorbunov-Posadov M.I., Shekhter O.YA., I Kofman V.A., Davleniye grunta na zhestkiy zaglublennyy fundament i svobodnyye deformatsii kotlovana, Trudy NII osnovaniy i fundamentov, Sbornik № 24, 1954.[Gorbunov-Posadov MI, Shekhter O.Ya., I Kofman VA, Soil pressure on a rigid deep foundation and free deformations of the pit, Proceedings of the Research Institute of Foundations and Foundations, Collection No. 24, 1954. (In Russ)]
5. Florin V.A. Osnovy mekhaniki gruntov. L-M.: Gosstroyizdat, 1959. T.1. 356 s.[Florin V.A. Fundamentals of Soil Mechanics. -L-M.: Gosstroyizdat, 1959. Vol.1. 356 p. (In Russ)]
6. Agakhanov E.K. O razvitiy kompleksnykh metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. № 2. 2013. S. 39-45.[Agakhanov E.K. On the development of complex methods for solving problems of solid mechanics // Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science. No. 2. 2013. pp. 39-45. (In Russ)]
7. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Gruntovoye osnovaniye s trapetseidal'nym vyrezom pod deystviyem sobstvennogo ves. Nauchnoye obozreniye. 2016. № 12. S. 67-71.[Agakhanov EK, Agakhanov MK, Ground base with a trapezoidal cut under its own weight. Scientific Review. 2016. No. 12. pp. 67-71. (In Russ)]
8. Elephant Agakhanov, Murad Agakhanov and Edward Batmanov. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. doi.org/10.1051/mateconf/201819303047

9. Metod fotouprugosti, pod red. G.L. Khesina, M., Stroyizdat, 1975. [Method of photoelasticity, ed. G.L. Khesina, M., Stroyizdat, 1975. (In Russ)]
10. Gutman S.G., Privedeniye sily tyazhesti uprugogo tela k vneshney gidrostaticheskoy nagruzke. Izv. NII gidrotekhniki, 1934, № 11. [Gutman SG, Bringing the force of gravity of an elastic body to an external hydrostatic load. Izv. Research Institute of Hydraulic Engineering, 1934, No. 11. (In Russ)]
11. Biot M. A. Distributed gravity and temperature loading in twodimensional elasticitu replaced by boundary pressures and dislocations. Trans. ASME. Appl. Mech. 1935. Vol. 2. N 57.
12. Pokrovskiy G.I., Fedorov I.S., Tsentrobezhnoye modelirovaniye v stroitel'nom dele, M., Stroyizdat, 1968, 247 s. [Pokrovsky GI, Fedorov IS, Centrifugal modeling in construction business, M., Stroyizdat, 1968, 247 p. (In Russ)]
13. Vereshchagin A.N., Rasshireniye vozmozhnostey modelirovaniya massovykh sil pri tsefugirovani modeley v tyazheloy zhidkosti, VIII Vsesoyuz. konf. po metodu fotouprugosti, Tallin, 1979, s.108-110. [Vereshchagin AN, Expanding the possibilities of modeling mass forces during centrifugation of models in a heavy liquid, VIII All-Union. conf. by the method of photoelasticity, Tallinn, 1979, pp. 108-110. (In Russ)]
14. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike, M., Nauka, 1965, s.386 [Sedov L.I. Similarity and Dimension Methods in Mechanics, M., Nauka, 1965, p. 386 (In Russ)]
15. Timoshenko S.P., Gud'yer Dzh., Teoriya uprugosti. M., Nauka, 1975, 576 s. [Timoshenko SP, Goodyer J., Theory of elasticity. M., Nauka, 1975, 576 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов, e-mail: Elifhan@bk.ru,

Хидиров Самед Тагирович, аспирант кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов; e-mail: Samad-93@bk.ru

Габибулаев Гадис Габибулаевич, аспирант кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов. e-mail: mexicanec_tuco@mail.ru

Information about the authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Highways, Foundations and Foundations, e-mail: Elifhan@bk.ru,

Samed T.Khidirov, Postgraduate Student, Department of Highways, Foundations and Foundations; e-mail: Samad-93@bk.ru

Gadis G. Gabibulaev, Postgraduate Student Department of Highways, Foundations and Foundations; e-mail: mexicanec_tuco@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.08.2020.

Принята в печать 14.09.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.08.2020.

Accepted for publication 14.09.2020.

Для цитирования: Б.В. Соболев, Е.В. Рашидова, П.В. Васильев, А.И. Новикова. Равновесные внутренние трещины в упругих телах, подкреплённых тонкими гибкими покрытиями. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (3):111-121. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-111-121

For citation: B.V. Sobol, E.V. Rashidova, P.V. Vasiliev, A.I. Novikova. Equilibrium internal fractures in elastic bodies supported by thin flexible coatings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(3):111-121. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-111-121

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-111-121

**РАВНОВЕСНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ТРЕЩИНЫ В УПРУГИХ ТЕЛАХ,
ПОДКРЕПЛЁННЫХ ТОНКИМИ ГИБКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Б.В. Соболев, Е.В. Рашидова, П.В. Васильев, А.И. Новикова

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

Резюме. Цель. В предлагаемой публикации проведено исследование задач о плоской деформации упругих тел, содержащих внутренние прямолинейные трещины. В каждом случае границы рассматриваемых областей подкреплены тонкими гибкими накладками. Первая часть работы посвящена задаче о бесконечном упругом клине, грани которого с внешней стороны свободны и усилены тонким гибким материалом, а биссектриса содержит прямолинейную трещину, к берегам которой приложены нормальные силы, и исследованию концентрации напряжений в вершинах трещины. Во второй части работы рассмотрена задача о равновесной радиальной внутренней трещине в сечении круглой трубы. Внутренняя поверхность трубы испытывает гидростатическое давление; внешняя – усилена тонким гибким покрытием. Целью исследования в каждой из представленных задач является определение значений фактора влияния. **Метод.** Задачи объединяет единый подход, в котором наличие покрытия моделируется математически, с использованием специальных граничных условий, полученных на основе асимптотического анализа точного решения для полосовой или кольцевой гибкой накладки малой относительной толщины. В первой задаче вывод сингулярного интегрального уравнения (СИУ) проведен с помощью преобразования Меллина, позволившего перейти к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений и получить СИУ, относительно производной функции разрыва, I-го рода с ядром Коши. Во второй задаче разрывные решения строятся с помощью рядов Фурье, в результате чего выводится сингулярное интегральное уравнение аналогичной структуры. Ранее аналогичные идеи были успешно реализованы авторами при исследовании задачи о равновесном состоянии полосы с покрытием, ослабленной внутренней поперечной трещиной, при произвольных условиях на нижней грани полосы. **Вывод.** Получены СИУ для рассматриваемых задач. Методом коллокации построены решения СИУ для различных комбинаций геометрических и физических характеристик задач. Во всех рассмотренных случаях рассчитаны значения фактора влияния. Проведен анализ изменения фактора влияния в зависимости от различных комбинаций геометрических параметров и механических характеристик задач. С ростом жесткости покрытия и увеличения его толщины значения фактора влияния уменьшаются; увеличение значения фактора влияния обеспечивается приближением трещины к границе тела и увеличением ее относительной длины.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-08-00074 и №19-38-90248.

Ключевые слова: трещина, бесконечный упругий клин, упругое кольцо, тонкое покрытие, тригонометрические ряды, интегральное преобразование Меллина, метод разрывных решений, коэффициент интенсивности напряжений, фактор влияния, метод коллокации

**EQUILIBRIUM INTERNAL FRACTURES IN ELASTIC BODIES SUPPORTED BY THIN
FLEXIBLE COATINGS**

B.V. Sobol, E.V. Rashidova, P.V. Vasiliev, A.I. Novikova

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. In this paper, the authors study problems of a plane strain of elastic bodies containing internal rectilinear fractures. In each case, the margins of the considered areas are supported by thin flexible coatings. The first part of the paper is devoted to the problem of an infinite elastic wedge, the faces of which are free from the outside and reinforced with a thin flexible material, and the bisector contains a rectilinear fracture with regular forces applied to the margins, and to the study of the stress concentration at the fracture vertices. In the second part of the paper, the authors consider the problem of an equilibrium radial internal fracture in the cross-section of a round pipe. The inner surface of the pipe experiences hydrostatic pressure; the outer surface is reinforced with a thin flexible coating. The purpose of the study in each of the presented tasks is to determine the values of the influence factor. **Methods.** Both problems are united by a single approach, in which the presence of a coating is modeled mathematically, using special marginal conditions obtained based on an asymptotic analysis of the exact solution for a strip or ring flexible coating of small relative thickness. In the first issue, the singular integral equation is derived using the Mellin transform, which allows proceeding to the solution of a system of ordinary differential equations and obtaining a singular integral equation relative to the derivative of the discontinuity function of the first kind with a Cauchy kernel. In the second issue, discontinuous solutions are constructed using the Fourier series, resulting in a singular integral equation of a similar structure. Previously, similar ideas were successfully implemented by the authors in the study of the problem of the equilibrium state of a strip with a coating weakened by an internal transverse fracture under arbitrary conditions on the lower edge of the strip. **Conclusion.** Singular integral equations for the considered problems are obtained. The collocation method is used to construct solutions of singular integral equations for various combinations of geometric and physical characteristics of issues. In all the considered cases, the values of the influence factor were calculated. The analysis of changes in the influence factor depending on various combinations of geometric parameters and mechanical characteristics of problems is carried out. It is noted that with increasing rigidity of the coating and increasing its thickness, the values of the influence factor decrease; the increase in the value of the influence factor is provided by approaching the fracture to the body margin and increasing its relative length.

Acknowledgment. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of research projects No. 19-08-00074 and No. 19-38-90248.

Key words: fracture, infinite flexible wedge, elastic ring, thin coating, trigonometric series, integral Mellin transform, discontinuous solutions method, stress intensity ratio, influence factor, collocation method

Введение. Техническое составляющая станков и инструментов в современной промышленности играет существенную роль, так как производство современной техники имеет погрешности, измеряемые в микронах, а утрата заданной точности считается потерей работоспособности. Надежность технических конструкций, их износостойкость, как правило, обеспечиваются характеристиками их поверхностей, так как именно на поверхности приходится наибольшее влияние внешних сил. Одним из приоритетных направлений, связанных с обеспечением надежности и износостойкости, является развитие методов и технологий нанесения специальных тонких покрытий, обеспечивающих специфические характеристики технических конструкций. Относительная малая толщина покрытий позволяет экономить дорогостоящие материалы, при этом само покрытие выполняет защитные функции. Вместе с этим, известно, что наличие малых внутренних дефектов, например, полостей или трещин, неизбежная компонента процесса производства любых механизмов, поэтому усиление поверхностей тонкими покрытиями приводит к увеличению времени эксплуатации. Указанная методика нанесения тонких покрытий определяет перед наукой задачи развития и разработки новых способов и технологий оценивания работоспособности станков с тонкими покрытиями, их напряженного состояния.

Исторически первые научные работы по изучению тонких покрытий проведены зарубежными учеными Эрнстом Меланом [1], Эриком Рейсснером [2], В. Койтером и Т. Уорнером [3], советскими учеными Виктором Михайловичем Александровым [4] и Суреном Мануковичем Мхитаряном [5]. Исследования ученых Армении В. Акоюна [6] и Л. Арутюняна [7], в также работы малазийского ученого Абд эль Фаттах Ризка [8] посвящены проблемам концентрации напряжений в составных телах с трещинами. В работе И. Шацкого изучена прочность пластинок, усиленных гибким покрытием и включающих системы трещин [9]. Проблема влияния

стрингера на упругую полуплоскость, включающую разрез, исследована в работе Ю. Антипова Ю. и Д. Бардзокаса [10]. Целый ряд работ многих исследователей посвящен изучению полубесконечных упругих тел, содержащих поперечные трещины, исследованиям для различных условий на границах концентрации напряжений в вершинах этих трещин, например, работы [11-15].

Постановка задачи. Постановка задачи для бесконечного упругого клина, границы которого усилены тонким покрытием. Рассмотрим клинообразную область, ее описание зададим в системе полярных координат: $r \in [0; \infty)$, $|\varphi| \leq \alpha$. На луче $\varphi = 0$, соответствующем биссектрисе клина, при $r \in [c; d]$ расположена трещина. Раскрытие трещины происходит под действием нормальных сил $-f(r)$. Лучи $\varphi = \pm\alpha$, являющиеся гранями клина, усилены тонкими гибкими накладками толщины h . Материал накладки характеризуется модулем сдвига G_1 и коэффициентом Пуассона μ_1 . Считаем, что на бесконечности (при $r \rightarrow \infty$) отсутствует перемещение и напряжение ($u(r, \varphi) = 0$ – радиальная компонента перемещения и $\vartheta(r, \varphi) = 0$ – тангенциальная компонента; $\sigma_\varphi = 0$ – нормальное напряжение, $\tau_{r\varphi} = 0$ – касательное напряжение). Функции разрыва в области трещины ($r \in [c; d]$, $\varphi = 0$) подлежат определению в процессе решения задачи. Опишем их неизвестными искомыми функциями $\psi(r)$ и $\phi(r)$:

$$[\vartheta(r, \varphi)] = \psi(r), \quad \left[\frac{\partial u}{\partial \varphi} \right] = \phi(r), \quad (1)$$

при $r \in [0; c) \cup (d; \infty)$, $\psi(r) = \phi(r) = 0$.

Здесь и далее $[f(\varphi)] = f(+0) - f(-0)$.

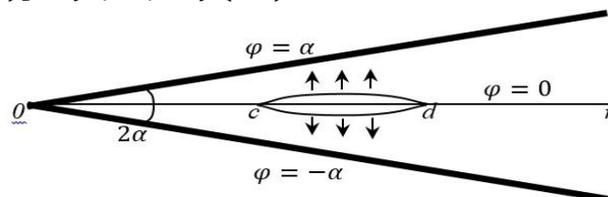


Рис. 1. Модель задачи о клине
 Fig. 1. Wedge problem model

Граничные условия задачи:

$$\varphi = 0: \quad \sigma_\varphi = -f(r) \text{ при } r \in [c; d]; \quad (2)$$

$$\vartheta = 0, \text{ при } r \in [0; c) \cup (d; \infty); \quad (3)$$

$$\tau_{r\varphi} = 0, \quad r \in [0; \infty); \quad (4)$$

$$\varphi = \pm\alpha: \quad 4G_1 h \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = (1 - \mu_1) \tau_{r\varphi} - 2\mu_1 h \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial r}; \quad (5)$$

$$\sigma_\varphi = 0, \quad (6)$$

Условие (5) реализует математическое моделирование наличия гибкой накладки относительно малой толщины на границах клина [5].

Решение задачи строим на основе закона Гука и уравнений равновесия, заданных в перемещениях и записанных в полярной системе координат:

$$\begin{aligned} (1 - 2\mu)\Lambda u + \frac{\partial \Xi}{\partial r} - \frac{2(1-2\mu)}{r^2} \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} &= 0, \\ (1 - 2\mu)\Lambda \vartheta + \frac{1}{r} \frac{\partial \Xi}{\partial \varphi} + \frac{2(1-2\mu)}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Lambda = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \left(1 - \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right)$,

$\Xi = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(u + \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} \right)$, μ – коэффициент Пуассона материала клина.

Интегральное уравнение. К уравнениям (7) применим интегральное преобразование Меллина [15].

$$Z(s, \varphi) = \int_0^\infty z(\rho, \varphi) \rho^{s-1} d\rho, \quad z(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\delta-i\infty}^{\delta+i\infty} Z(s, \varphi) r^{-s} ds. \quad (8)$$

В результате этого преобразования по переменной r функция $u(r, \varphi)$ переходит в $U(s, \varphi)$, а $\vartheta(r, \varphi)$ в $V(s, \varphi)$, а уравнения Ламе – в систему обыкновенных дифференциальных уравнений II-го порядка:

$$\begin{aligned} (1 + \kappa)(s^2 - 1)U - 2(s + \kappa)V'_\varphi - (1 - \kappa)U''_\varphi &= 0, \\ (1 - \kappa)(s^2 - 1)V + 2(s - \kappa)U'_\varphi - (1 + \kappa)V''_\varphi &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\kappa = 3 - 4\mu$.

Общее решение системы (6) имеет вид:

$$\begin{aligned} U &= (s + \kappa)[c_1 \sin(s + 1) \varphi + c_2 \cos(s + 1) \varphi] + (s - 1)[c_3 \sin(s - 1) \varphi + \\ &\quad c_4 \cos(s - 1) \varphi], \\ V &= -(s - \kappa)[c_1 \cos(s + 1) \varphi - c_2 \sin(s + 1) \varphi] - (s - 1)[c_3 \cos(s - 1) \varphi - \\ &\quad c_4 \sin(s - 1) \varphi] \end{aligned} \quad (10)$$

где $c_i, i = 1, \dots, 4$ – произвольные постоянные.

Принимая во внимание определение неизвестного разрыва (1), удовлетворим граничным условиям задачи (3), (5) и (6). Для нахождения $c_i, i = 1, \dots, 4$ имеем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} c_1 &= c_3 \frac{1-s}{1+s}, \\ c_1(\kappa - s) &= c_3(s - 1) + \psi^*, \\ c_1 \sin(1 + s)\alpha + c_2 \cos(1 + s)\alpha - c_3 \sin(1 - s)\alpha + c_4 \cos(1 - s)\alpha &= 0, \\ ((s + \kappa)[c_1 \sin(s + 1)\alpha + c_2 \cos(s + 1)\alpha] + \\ (s - 1)[c_3 \sin(s - 1)\alpha + c_4 \cos(s - 1)\alpha]) &= \\ = \frac{(1-\mu_1)gr}{2h} (c_1 \cos(s + 1)\alpha - c_2 \sin(s + 1)\alpha - \frac{1-s}{1+s} [c_3 \cos(s - 1)\alpha - c_4 \sin(s - 1)\alpha]) \\ - \mu_1 gr \left[(s - 1)(c_1 \cos(s + 1)\alpha - c_2 \sin(s + 1)\alpha) + \frac{(s-1)^2}{1+s} (c_3 \cos(s - 1)\alpha - c_4 \sin(s - 1)\alpha) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где g - отношение модуля сдвига материала клина к модулю сдвига материала накладки G/G_1 , $\psi^*(s) = \int_0^\infty \psi(\rho) \rho^{s-1} d\rho$.

Удовлетворяя условию (2), получаем

$$\frac{4G}{i\pi(1+\kappa)} \int_c^d \frac{\psi(\rho)}{\rho} d\rho \int_{\delta-i\infty}^{\delta+i\infty} L(s, r) \left(\frac{\rho}{r}\right)^s s ds = -r \cdot f(r). \quad (12)$$

Здесь $L(s, r) =$

$$= -\frac{gr(1 - \mu_1)(s^2 \sin^2 \alpha - \sin^2 s\alpha) + 2h(1 + s)(1 - \mu)(s \sin 2\alpha - \sin 2s\alpha)}{4h(1 + s)(1 - \mu)(\cos 2\alpha + \cos 2s\alpha) + gr(1 - \mu_1)(s \sin 2\alpha + \sin 2s\alpha)} \quad (13)$$

Используем замену переменных $s = iu, sds = -udu$,

$$\left(\frac{\rho}{r}\right)^{iu} = \cos\left(u \ln \frac{\rho}{r}\right) + i \sin\left(u \ln \frac{\rho}{r}\right).$$

Учитывая, что $\sin(ix) = i \operatorname{sh} x, \cos(ix) = \operatorname{ch} x$, получаем:

$$\tilde{L}(u, r) = -\frac{gr(1 - \mu_1)(\operatorname{sh}^2 u\alpha - u^2 \sin^2 \alpha) + 2i h(1 + iu)(1 - \mu)(u \sin 2\alpha - \operatorname{sh} 2u\alpha)}{4 h(1 + iu)(1 - \mu)(\cos 2\alpha + \operatorname{ch} 2u\alpha) + i gr(1 - \mu_1)(u \sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2u\alpha)} \quad (14)$$

Интегрирование по частям позволяет перейти к СИУ относительно производной иско- мой функции.

$$\begin{aligned} \frac{4G}{\pi(1 + \kappa)} \left(\int_c^d \psi'(\rho) d\rho \int_0^\infty \left(2\operatorname{Re}(\tilde{L}(u, r)) \cos\left(u \cdot \ln \frac{\rho}{r}\right) \right. \right. \\ \left. \left. - 2\operatorname{Im}(\tilde{L}(u, r)) \sin\left(u \cdot \ln \frac{\rho}{r}\right) \right) du = -r \cdot f(r) \end{aligned} \quad (15)$$

Проведен анализ подынтегральных функций при $u \rightarrow \infty$

$$\operatorname{Re}(\tilde{L}(u, r)) = O(e^{-2u\alpha}), \quad \operatorname{Im}(\tilde{L}(u, r)) = -\frac{1}{2} + O(e^{-2u\alpha}), \quad 0 < \alpha < \pi.$$

Вводим обозначения: $\theta = \frac{G}{1-\nu}$, тогда $\frac{4G}{\pi(1+\kappa)} = \frac{\theta}{\pi}$,

$$K(u, r) = 2 \operatorname{Re} \left(\tilde{L}(u, r) \right) \cos \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right) - \left(2 \operatorname{Im} \left(\tilde{L}(u, r) \right) + 1 \right) \sin \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right) + \sin \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right),$$

$$M(u, r) = 2 \operatorname{Re} \left(\tilde{L}(u, r) \right) \cos \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right) - \left(2 \operatorname{Im} \left(\tilde{L}(u, r) \right) + 1 \right) \sin \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right),$$

тогда $K(u, r) = M(u, r) + \sin \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right)$.

СИУ (15) принимает вид:

$$\int_c^d \psi'(\rho) d\rho \int_0^\infty k(r, \rho) du = -\frac{\pi}{\theta} r \cdot f(r) \quad (16)$$

Здесь $k(r, \rho) = \int_0^\infty \left(M(u, r) + \sin \left(u \ln \frac{\rho}{r} \right) \right) du$.

Следующая замена позволяет свести уравнение к безразмерным переменным и получить СИУ первого рода с ядром Коши:

$$\lambda = 2 \left(\ln \frac{d}{c} \right)^{-1}, \quad r = c \exp \left(\frac{1+x}{\lambda} \right), \quad \rho = c \exp \left(\frac{1+\xi}{\lambda} \right), \quad d\rho = c \exp \left(\frac{1+\xi}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda} d\xi,$$

$$\chi(\xi) = \psi'(\xi) c \exp \left(\frac{1+\xi}{\lambda} \right) \exp \left(\frac{1+\xi}{\lambda} \right).$$

Учитывая значение интеграла $\int_0^\infty \sin(ut) du = \frac{1}{t}$ [16], получаем:

$$\int_{-1}^1 \chi(\xi) \left[\frac{\lambda}{\xi - x} + \int_0^\infty M \left(u, c \exp \left(\frac{1+x}{\lambda} \right) \right) du \right] d\xi = -\frac{\pi \lambda}{\theta} q(x), \quad (17)$$

$$|x| \leq 1, \quad q(x) = \exp \left(\frac{1+x}{\lambda} \right) \cdot f \left(c \exp \left(\frac{1+x}{\lambda} \right) \right).$$

Таким образом, решение поставленной задачи сведено к решению СИУ (17).

Методы исследования. Решение *сингулярного интегрального уравнения* (СИУ) (17) проведем методом коллокации, который позволяет учитывать особенность функции разрыва в окрестности вершин трещины. Искомую функцию представим в виде произведения множителя, явно учитывающего эту сингулярность, и линейной комбинации $T_j(\xi)$ полиномов Чебышева (ПЧ) первого рода:

$$\chi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \sum_{j=1}^N X_j T_j(\xi), \quad (18)$$

здесь X_j – коэффициенты, N – число узлов коллокации.

Для построения узлов используем следующие выражения, являющиеся корнями ПЧ:

$$x_j = \cos \frac{\pi(2j-1)}{2m}, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

Выражение (18) позволяет привести задачу системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z(x_1) \\ z(x_2) \\ \dots \\ z(x_N) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где $z(x) = -\frac{\pi \lambda}{\theta} q(x)$,

$$c_{ij} = \int_{-1}^1 T_j(\xi) \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \left[\frac{1}{\xi - x_i} + \frac{1}{\lambda} \int_0^\infty M \left(u, c \exp \left(\frac{1+x}{\lambda} \right) \right) du \right] d\xi \quad (20)$$

Решение СЛАУ (19) приводит к построению функции $\chi(\xi)$, которая позволяет определить в окрестности вершин трещины величину коэффициента интенсивности нормальных напряжений (КИНН):

$$K_I = \lim_{\xi \rightarrow \mp 1 \pm 0} \left(\theta \sqrt{2\pi(1+\xi)} \chi(\xi) \right).$$

Количество узлов коллокации и величина безразмерного параметр λ связаны между собой, увеличение λ приводит к потере точности решения. Проведенные численные эксперименты позволили сделать вывод: решение СИУ с точностью 95% для $\lambda = 0.8$ обеспечивается не менее чем 8 узлами; при той же точности и $\lambda = 0.6$ требуется не менее 5 узлов.

Постановка задачи для равновесной радиальной трещины в сечении трубы с покрытием. Рассмотрим кольцо толщиной $l = b - a$. Сформулируем постановку задачи в полярной системе координат (r, φ) : $r \in [a; b]$. Внешняя граница кольца $r = b$ усилена тонким (относительно ширины кольца) гибким покрытием толщины h и свободна от напряжений. Внутри кольца находится трещина, расположенная вдоль его радиуса на луче $\varphi = 0$ при $r \in [c; d]$. Сила f действует на внутреннюю границу и обеспечивает раскрытие трещины. Считаем, что на берегах трещины отсутствуют напряжения.

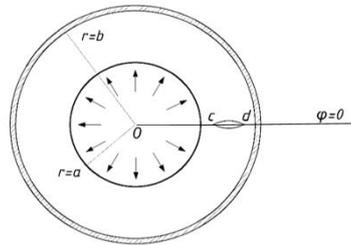


Рис. 2. Модель задачи о кольце

Fig. 2. Ring problem model

Аналогично задаче о клине, функции разрыва в области трещины ($r \in [c; d]$, $\varphi = 0$) подлежат определению. Описываем их неизвестными искомыми функциями $\psi(r)$ и $\phi(r)$, определенными в выражении (1).

Граничные условия задачи:

$$r = a: \quad \sigma_r = -f(r), \text{ при } r \in [c; d]; \quad (21)$$

$$\tau_{r\varphi} = 0, \text{ при } r \in [a; b]; \quad (22)$$

$$r = b: \quad \sigma_r = 0, \text{ при } r \in [a; b]; \quad (23)$$

$$\frac{h}{R} \frac{\partial \sigma_\varphi^{(1)}}{\partial \varphi} = \tau_{r\varphi}; \quad (24)$$

$$\varphi = 0: \quad \sigma_\varphi = 0, \text{ при } r \in [c; d]; \quad (25)$$

$$\tau_{r\varphi} = 0, \text{ при } r \in [c; d]. \quad (26)$$

Верхний индекс (1) соответствует покрытию внешней границы кольца.

Решение уравнений равновесия построим в виде тригонометрических рядов Фурье. Будем учитывать симметрию задачи вдоль луча $\varphi = 0$.

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

А коэффициенты разложения имеют вид

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

Это позволяет свести решение задачи к решению СИУ с ядром Коши вида (17). Его решение также строится методом коллокации.

Обсуждение результатов. Равновесная прямолинейная внутренняя трещина в клиновидной области с покрытием. Проведено исследование концентрации напряжений в вершинах трещины. В качестве показателя их интенсивности рассматривался *фактор влияния* $N(\pm 1)$ [17]:

$$N(\pm 1) = K_I / K_{I\infty},$$

где K_I – КИНН в исследуемом случае; $K_{I\infty}$ – соответствующая величина в классическом случае, для задачи об изолированной трещине в неограниченной упругой среде [17]. Фактор влияния характеризует влияние геометрических параметров и механических характеристик задачи на значения КИНН.

В безразмерных величинах удаление трещины от вершины клина определяется параметром $\lambda = \frac{d-c}{d+c}$ ($\lambda \in (0; 1)$, приближение трещины к вершине клина соответствует величине λ близкой к 1). Проведено изучение зависимости величины фактора влияния от угла при вершине клина. В исследовании рассмотрена безразмерная величина $\frac{h}{d-c} = 0.01$ – отношение толщины накладки к длине трещины. Удаление трещины от вершины клина характеризуется величиной λ ($\lambda=0.75, \lambda=0.65, \lambda=0.55$). Замечено, что увеличение угла при вершине клина приводит к уменьшению влияния накладки на КИНН.

Выявлено, что для тупых углов значения фактора влияния не зависят от угла при вершине клина. Результаты исследования приведены на рис.3.

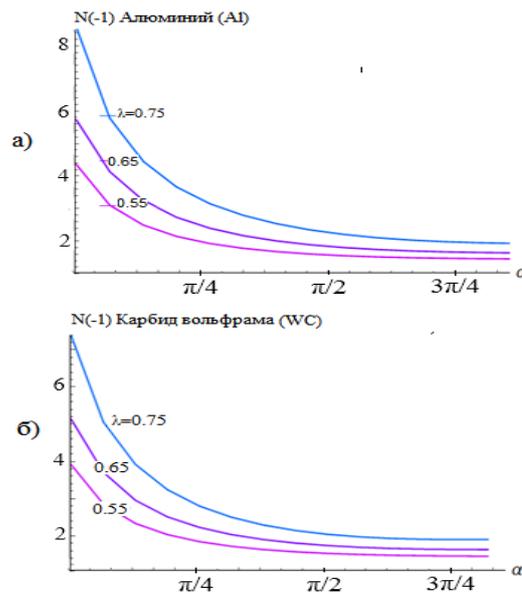


Рис. 3. Результаты исследования взаимосвязи фактора влияния в вершине трещины $N(-1)$ и угла при вершине клина для разного размещения трещины

сверху рис. а) накладка – алюминий; снизу: б) накладка – карбид вольфрама

Fig. 3. Results of the study of the relationship between the influence factor at the crack vertex $N(-1)$ and the angle at the wedge vertex for different crack placement

From above: fig. a) cover plate-aluminum, below: b) the cover plate is tungsten carbide

Рассмотрены известные частные случаи поставленной задачи, такие как:

- толщина накладки равна нулю;
- угол при вершине клина равен π , клин раскрывается в полуплоскость;
- угол при вершине клина равен 2π , клин раскрывается в плоскость.

Проведено сравнение расчетов указанных известных случаев [12, 14, 18 - 19] с расчетами, проведенными на основе решения интегрального уравнения (17) методом коллокации. С точностью до двух процентов полученные результаты совпадают с известными.

В данном исследовании проведен анализ сходимости решения СИУ методом коллокации, который основывался на сравнении величин значений $N(\pm 1)$ фактора влияния в вершинах

трещин при расчетах с разным количеством точек коллокации (варианты расчетов: $N = 8, 9, \dots, 15$). Выявлено, что во всех вариантах числовых расчетов (при условии, что $\lambda < 0.75$), отклонения результатов вычислений не превосходит трех процентов.

Равновесная радиальная трещина в сечении трубы с покрытием. Задача содержит значительный набор геометрических и физических параметров и большое число их сочетаний, представляемые результаты расчетов носят, преимущественно, иллюстративный характер и не претендуют на полноту.

На рис.4 представлены значения фактора влияния в ближней к покрытию вершине трещины, в зависимости от $\lambda = \frac{d-c}{2b-c-d} < 1$, характеризующим удаление трещины от внешней границы кольца, усиленной покрытием, и $q = \frac{b-a}{b}$, относительной толщины кольца.

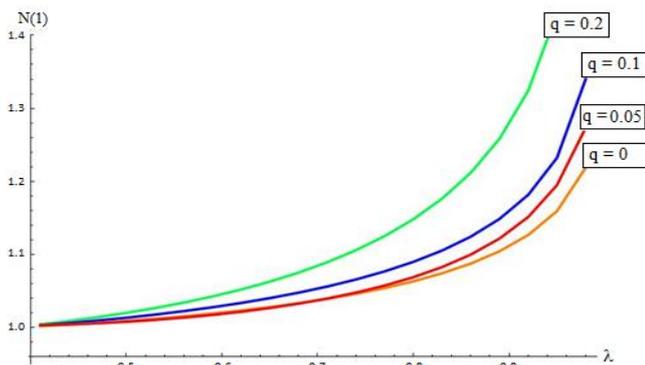


Рис. 4 Изменение фактора влияния в ближней к покрытию вершине трещины в зависимости от параметра λ , для различных значений параметра q , характеризующего геометрию сечения трубы. При вычислениях принято: относительная толщина покрытия $l = \frac{h}{b-a} = 0.02$; относительная длина трещины $t = \frac{d-c}{b-a} = 0.2$; материал трубы – конструкционная сталь; материал покрытия – вольфрам.

Fig. 4. Change of the influence factor in the crack vertex closest to the coating, depending on the parameter λ , for different values of the parameter q , which characterizes the geometry of the pipe section. When calculating, it is assumed that the relative thickness of the coating is $l = \frac{h}{b-a} = 0.02$. Relative crack length $t = \frac{d-c}{b-a} = 0.2$.

Material – structural steel; coating material – tungsten.

Как нетрудно заметить, при прочих равных условиях, при большей кривизне трубы, значения фактора влияния ниже. Предельный случай $q=0$ соответствует задаче для полосы.

На рис.5 показано влияние различных материалов накладки на концентрацию напряжений в вершине трещины, ближней к покрытию. Анализ результатов показывает, что при приближении вершины трещины к поверхности, наличие покрытия сдерживает рост фактора влияния, а в некоторых случаях (WC), приводит к его снижению.

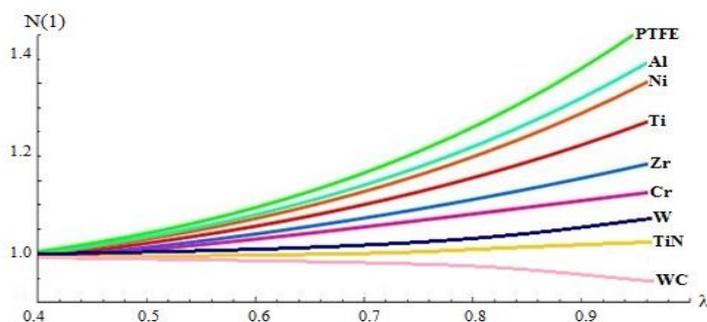


Рис.5. Влияние различных материалов. Во всех случаях: кольцо – конструкционная сталь; материал накладки: PTFE – тефлон, Al – алюминий, Ti – титан, Zr – цирконий, Ni – никель, Cr – хром, W – вольфрам, TiN – нитрид титана, WC – карбид вольфрама. Значения геометрических параметров были приняты равными: $l=0.01$, $q=0.4$, $t=0.2$.

Fig. 5. Influence of different materials. In all cases: ring-structural steel; lining material: PTFE-teflon, Al-aluminum, Ti-titanium, Zr-zirconium, Ni-nickel, Cr-chromium, W-tungsten, TiN-titanium nitride, WC-tungsten carbide. The values of the geometric parameters were assumed to be: $l=0.01$, $q=0.4$, $t=0.2$.

На рис. 6 представлены кривые изменения фактора влияния в вершине трещины в зависимости от относительной толщины покрытия l , при различных значениях параметра λ .

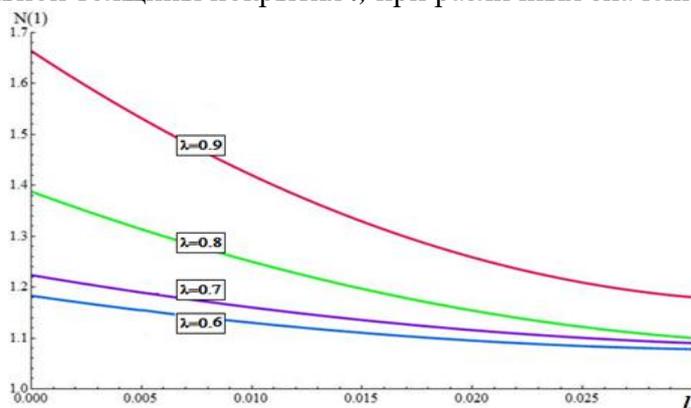


Рис.6. Кривые изменения фактора влияния. Модельная задача: материал накладки – вольфрам, кольца – конструкционная сталь. Остальные геометрические и физические параметры имеют те же значения, что и для рис.5.

Fig. 6. Variation curves of the factor of influence. Model task: the lining material is tungsten, the rings are structural steel. The other geometric and physical parameters have the same values as for Fig. 5.

Как нетрудно заметить, во всех рассмотренных случаях увеличение толщины покрытия приводит к снижению значений фактора влияния, причем, для случаев, когда трещина достаточно близко расположена к покрытию, это снижение более выражено.

Вывод. Для каждой из представленных задач рассчитано значение фактора влияния в вершинах трещины. Проведен анализ изменения фактора влияния в зависимости от различных комбинаций геометрических параметров и механических характеристик задач. Замечено, что с ростом жесткости покрытия и увеличение его толщины значения фактора влияния уменьшаются; увеличение значения фактора влияния обеспечивается приближением трещины к границе тела и увеличением ее относительной длины.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-08-00074 и №19-38-90248.

Библиографический список:

1. Melan, E. Zur plastizität des räumlichen kontinuums // Archive of Applied Mechanics, 1938. № 9/2. P. 116-126.
2. Рейсснер, Э. Некоторые проблемы теории оболочек. Упругие оболочки. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 263 с.
3. Koiter, W., Warner T. On the nonlinear theory of thin elastic shells. // Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 1966. № 69.1. P. 1-54.
4. Развитие теории контактных задач в СССР / Под ред. Л. А. Галина. М.: Наука, 1976, с. 493
5. Александров В. М., Мхитарян С. М. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. М: Наука 1979. 486 с.
6. Акопян В.Н. Об одной смешанной задаче для составной плоскости, ослабленной трещиной. // Изв. НАН Армении. Механика. 1995. Т.48. №4. С.57–65.
7. Арутюнян Л.А. Плоские задачи со смешанными краевыми условиями для составной плоскости с трещинами // Изв. АН Арм. ССР. Механика, 2012. Т.65 №3. С. 5-9.
8. Rizk A. Stress intensity factor for an edge crack in two bonded dissimilar materials under convective cooling // Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008. No. 49.3. pp. 251-267.
9. Шацкий И.П. Растяжение пластины, содержащей прямолинейный разрез с шарнирно соединенными кромками // Журн. Прикладной механики и техн. физики, 1989. № 5. С. 163-65.
10. Antipov Y., Bardzokas D., Exadaktylos G. Partially stiffened elastic half-plane with an edge crack // International journal of fracture, 1997 № 85.3 P. 241-263.
11. Cook, T.S., Erdogan, F. Stress in bounded material with a crack perpendicular to the interface. Int.J. Engng. Sci., 1972,10, 677-697.
12. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацышин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. Киев: Наукова Думка 1976. 443 с.
13. Греков М.А., Даль Ю.М., Курочкин В.А. Предельное состояние упругой полосы с внутренней трещиной. Известия РАН, МТТ, 1992, №6, С. 148-155.

14. Краснощеков А.А., Соболев Б.В. Равновесное состояние внутренней поперечной трещины в полубесконечном упругом теле с тонким покрытием. Известия РАН, МТТ, 2016, №1, С. 136-150.
15. Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
16. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: «Физматгиз». 1963. 1100 с.
17. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. 1957. V. 24. No. 3. pp. 361 – 364.
18. Сметанин Б.И. Об одной смешанной задаче теории упругости для клина // ПММ. 1968. Т. 32. Вып. 4. С. 708-714.
19. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Под ред. В.В. Панасюка. Киев: Наук. думка, 1988. 619 с. (Механика разрушения и прочность материалов. Т. 2).
20. V. Sobol, A. Soloviev, A. Krasnoschekov The transverse crack problem for elastic bodies stiffened by thin elastic coating. ZAMM. 2015. № 11. pp. 1302-1314.
21. Блинов А.В. Определение напряженно-деформированного состояния двухслойной трубы// Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 11-3 (42). С. 9 - 11.

References:

1. Melan, E. Zur plastizität des räumlichen kontinuums // Archive of Applied Mechanics, 1938. № 9/2. pp. 116-126.
2. Reissner, E. Nekotorye problemy teorii obolochek. Uprugie obolochki [Some problems of the theory of shells. Elastic shells]. Moscow, Foreign Literature Publisher, 1962. 263 p. (In Russ)]
3. Koiter, W., Warner T. On the nonlinear theory of thin elastic shells. // Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 1966. № 69.1. pp. 1-54.
4. Razvitie teorii kontaknykh zadach v SSSR [Development of the theory of contact problems in the USSR]. Moscow, Science, 1976, 493 p. (In Russ)]
5. Aleksandrov V. M., Mkhitarian S. M. Kontaknyye zadachi dlia tel s tonkimi pokrytiami i prosloikami [Contact tasks for bodies with thin coatings and interlayers]. Moscow, Science, 1979. 486 p. (In Russ)]
6. Akopian V.N. Ob odnoi smeshannoi zadache dlia sostavnoi ploskosti, oslablennoi treshchinoi [On a mixed problem for a composite plane weakened by a crack]. Armenia SSR, Publishing Academy of Sciences. Mechanic, 1995, vol. 48, no. 4. pp. 57-65.
7. Arutyunyan L.A. Plane problems with mixed boundary conditions for a compound plane with cracks. Proceedings of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, Mechanics, 2012. Vol. 65, No.3. pp. 5-9.
8. Rizk A. Stress intensity factor for an edge crack in two bonded dissimilar materials under convective cooling // Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008. No. 49.3. pp. 251-267.
9. Shatskiy I.P. Rastyazhenie plastiny, soderzhashchej pryamolinejnyj razrez s sharnirno soedinennymi kromkami // [Shatskiy I.P. Stretching a plate containing a rectilinear section with hinged edges. Journal of Applied mechanics and technology. Physics, 1989. No. 5. pp. 163-65. (In Russ)]
10. Antipov Y., Bardzokas D., Exadaktylos G. Partially stiffened elastic half-plane with an edge crack // International journal of fracture, 1997 No. 85.3, pp. 241-263.
11. Cook, T.S., Erdogan, F. Stress in bounded material with a crack perpendicular to the interface. Int.J. Engng. Sci., 1972, 10, pp. 677-697.
12. Panasyuk V.V., Savruk M.P., Dacyshin A.P. Raspredelenie napryazhenij okolo treshchin v plastinah i obolochkah. Kiev: Naukova Dumka 1976. pp.443
13. Grekov M.A., Dal' YU.M., Kurochkin V.A. Predel'noe sostoyanie uprugoj polosy s vnutrennej treshchinoj [Grekov M.A., Dal' Yu.M., Kurochkin V.A. Limiting state of an elastic strip with an internal crack. Izvestia RAN, MTT, 1992, No.6, pp.148-155. (In Russ)]
14. Krasnoschekov A.A., Sobol' B.V. Ravnovesnoe sostoyanie vnutrennej poperechnoj treshchiny v polubeskonechnom uprugom tele s tonkim pokrytiem. Izvestiya RAS, Solid mechanics, [Equilibrium state of an internal transverse crack in a semi-infinite elastic body with a thin coating. Izvestia RAN, MTT, 2016, No. 1, pp. 136-150. (In Russ)]
15. Lur'e A. I. Teoriya uprugosti. Moscow: Nauka, 1970, P.940 (In Russ)]
16. Gradshtejn I.S., Ryzhik I.M. Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvedenij. Moscow: "Fizmatgiz", 1963, s.1100 [Tables of integrals, sums, series and products. M.: "Fizmatgiz".1963. 1100p. (In Russ)]
17. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. 1957. V. 24. No. 3. pp. 361 – 364.
18. Smetanin B.I. Ob odnoj smeshannoj zadache teorii uprugosti dlya klina // PMM. 1968. Vol. 32. Issue 4. pp. 708-714. [Smetanin B.I. On a mixed problem in the theory of elasticity for a wedge. Prikl. 1968. T. 32. 4.S. 708-714. (In Russ)]
19. Savruk M.P. Koeffitsienty intensivnosti napryazhenij v telah s treshchinami / Edited by V. V. Panasyuk. Kiev: Nauk. Dumka, 1988. 619 p. (Fracture mechanics and strength of materials, vol. 2).

20. B. Sobol, A. Soloviev, A. Krasnoschekov The transverse crack problem for elastic bodies stiffened by thin elastic coating. ZAMM. 2015. No. 11. pp. 1302-1314.
21. Blinov A.V. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvuhslonnoy trubyy // International research journal. 2015. No. 11-3 (42). s. 9-11. [Blinov. Determination of the stress-strain state of a two-layer pipe // International research journal. 2015. No. 11-3 (42). pp. 9 - 11. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Соболь Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», e-mail: b.sobol@mail.ru

Рашидова Елена Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии» e-mail: el.rash@mail.ru

Васильев Павел Владимирович, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии», e-mail: lyftzeigen@mail.ru

Новикова Анна Ивановна, ассистент кафедры «Информационные технологии», e-mail: novikova.anna16@ya.ru

Information about the authors:

Boris V. Sobol, Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of Information Technologies, e-mail: b.sobol@mail.ru

Elena V. Rashidova, Cand.Sci (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Information Technologies e-mail: el.rash@mail.ru

Pavel V. Vasiliev, Senior lecturer of the Department of Information Technologies, e-mail: lyftzeigen@mail.ru

Anna I. Novikova, Assistant of the Department of Information Technologies, e-mail: novikova.anna16@ya.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.06.2020.

Принята в печать 18.07.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.06.2020.

Accepted for publication 18.07.2020.

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Расчёт металлодеревянной подкрановой балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (3):122-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-122-131

For citation: A. K. Yusupov, H. M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Metal-wood crane beam calculation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47(3):122-131. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-3-122-131

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2020-47-3-122-131

РАСЧЁТ МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННОЙ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

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

Резюме. Цель. Разработка конструкций и расчет металлодеревянных подкрановых балок сопряжены с определенными трудностями. В статье рассматриваются методики расчета и проектирования металлодеревянных подкрановых балок. При этом излагается алгоритм, который позволяет проектировать рациональные по расходу материала системы. **Метод.** В качестве примера принята металлодеревянная балка пролетом 12м, на которую действуют мостовые краны грузоподъемностью 30тс. Работа металлодеревянной подкрановой балки сравнивалась с дощатоклееной подкрановой балкой без усиления. Для расчета дощатоклееной балки, усиленной металлическими элементами (или металлодеревянная балка), «отбрасываем» элементы усиления и заменяем их упругоподатливыми опорами. Податливость этих опор учитывается с помощью коэффициента упругих опор - r , который определяется в зависимости от жесткости опор, а усилие в металлических элементах находим из равновесия узлов. **Результат.** В обоих вариантах нагружения металлодеревянных подкрановых балок показало, что наибольший изгибающий момент имеет место при расположении колеса мостового крана над упругой опорой. **Вывод.** Металлодеревянную подкрановую балку рационально использовать при действии мостовых кранов грузоподъемностью до 30 тс; металлодеревянные подкрановые балки рекомендуется проектировать пролетами до 12 м; сравнение дощатоклееных подкрановых балок с металлодеревянными показало, что металлодеревянные балки на 40-55% эффективнее.

Ключевые слова: подкрановая балка, упругоподатливая опора, мостовой кран, усиление, грузоподъемность, дощатоклееная балка

METAL-WOOD CRANE BEAM CALCULATION

A. K. Yusupov, H.M. Muselemov, T. O. Ustarhanov

*Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia*

Abstract. Objective. The development of structures and calculation of metal-wood crane beams are associated with specific difficulties. The article discusses the methods of calculation and design of metal-wood crane beams. In this case, an algorithm is described that allows designing systems that are rational in terms of material consumption. **Methods.** As an example, a metal-wood beam with a span of 12 m is used, which is supported by overhead cranes with a load capacity of 30 tf. The operation of a metal-wood crane beam was compared with a glue laminate crane beam without reinforcement. The reinforcement elements are "discarded" and replaced with elasto-yielding supports to calculate a glue laminate beam reinforced with metal elements (or a metal-wood beam). The flexibility of these supports is taken into account using the elastic support ratio r , which is determined depending

on the stiffness of the supports, and the force in the metal elements is derived from the nodes balance. **Result.** In both variants of loading metal-wood crane beams, it was shown that the greatest bending moment occurred when the bridge wheel was located above the elastic support. **Conclusion.** It is rational to use a metal-wood crane beam when operating bridge cranes with a lifting capacity of up to 30 tf; metal-wood crane beams are recommended to be designed with spans up to 12 m; the comparison of glue laminate crane beams with metal-wood beams showed that metal-wood beams were 40–55% more efficient.

Keywords: crane beam, elasto-yielding support, bridge crane, reinforcement, lifting capacity, glue laminate beam

Введение. Алгоритм расчета металлодеревянных подкрановых балок приведен в работах авторов [1,8,12], где подробно показана последовательность определения внутренних усилий и размеров сечения конструкции. На рис. 1 показана конструктивная схема металла - деревянной подкрановой балки. Основным элементом конструкции является дощатоклееная балка. Для повышения несущей способности и усиления дощатоклееной подкрановой балки (как известно на подкрановые балки действуют крановые нагрузки при различных режимах работы мостовых кранов, которые вызывают большое напряжение и деформации) применяют металлические элементы [2-7,9].

В целом такая конструктивная схема позволит (по нашему мнению) применить их на практике, облегчая конструкцию и уменьшая расход металла. Как было отмечено в работах [8,12] металлодеревянную подкрановую балку желательно применять для мостовых кранов среднего режима работы и грузоподъемностью до 30тс при шаге колон 6 или 12м.

Постановка задачи. В качестве примера принята металлодеревянная балка пролетом 12м, на которую действуют мостовые краны грузоподъемностью 30тс. Работа металлодеревянной подкрановой балки сравнивалась с дощатоклееной подкрановой балкой без усиления. Как известно, для определения наибольшего изгибающего момента в однопролетной подкрановой балке обычно пользуются правилом Виллера, в соответствии с которым мостовые краны перемещают по длине пролета с определенным шагом [8], а на каждом шаге вычисляют внутренние усилия. Однако этот метод не применим для трех пролетных балок с упругими опорами. В этом случае для практических расчетов достаточно рассмотреть два варианта загрузки дощатоклееной подкрановой балки двумя мостовыми кранами:

1. Оба крана располагаются симметрично относительно середины пролета балки (рис.2);
2. Когда одно из колес двух кранов располагается над упругоподатливой опорой (рис.3).

На данных рисунках элементы усиления заменены упругоподатливыми опорами. Как было отмечено выше, расчет металлодеревянной балки проводим по методам, изложенным в работах [8,12].

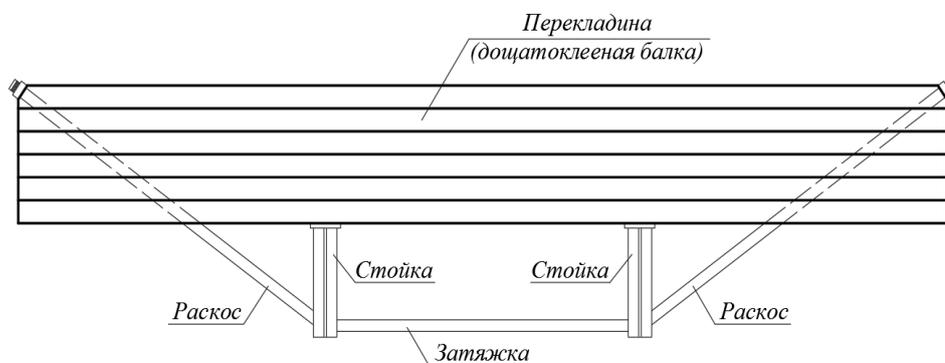


Рис.1. Конструктивная схема металлодеревянной подкрановой балки
Fig. 1. Structural diagram of a metal-wood crane girder

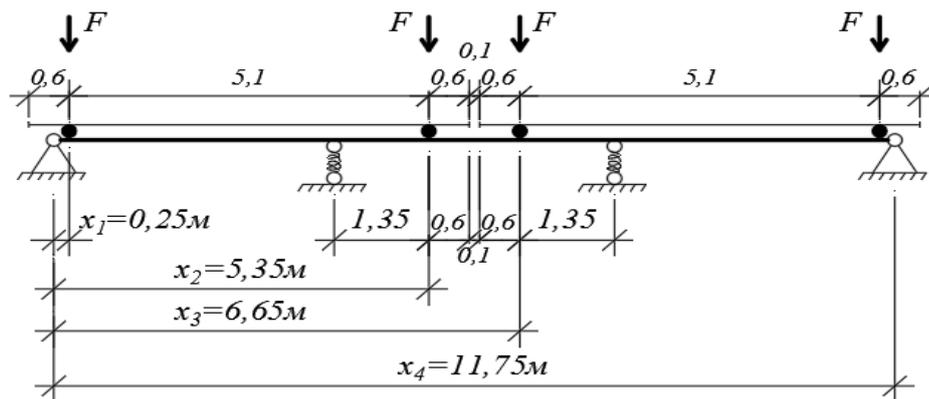


Рис. 2. Нагрузки подкрановой балки с упруго- податливыми опорами по первому варианту

Fig. 2. Loads of the crane girder with elastic yielding supports according to the first option

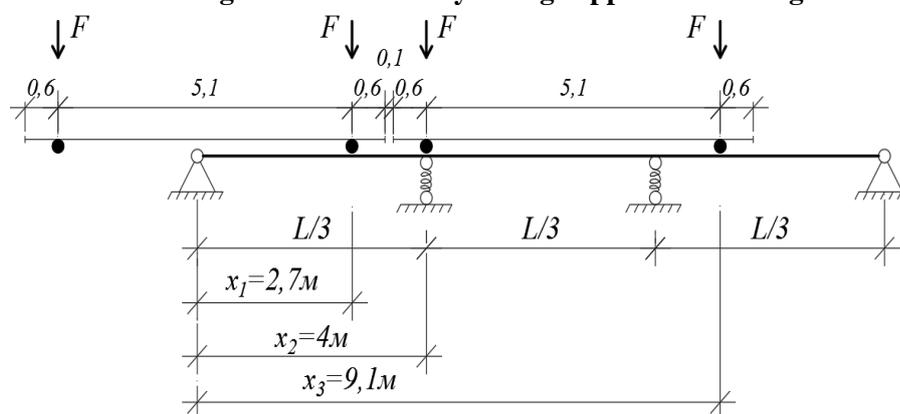


Рис. 3. Нагрузки подкрановой балки с упруго- податливыми опорами по второму варианту

Fig. 3. Loads of the crane girder with elastic-filing supports according to the second option

Методы исследования. Для расчета используем дифференциальное уравнение поперечного изгиба подкрановой балки [8,11,12]:

$$EJy^4(x) = y(x_0) - X_1\delta(x, l_1) - X_2\delta(x, l_2), \quad (1)$$

где: EJ- жесткость сечения подкрановой балки при изгибе;

y (x) - функция прогибов;

$\delta(x, l_i)$ - дельта функция;

X_1, X_2 - реакции упруго-податливых опор.

Прогиб определим по формуле:

$$y(x) = y_0(x) - X_1G(x, l_1) - X_2G(x, l_2), \quad (2)$$

$$\text{где: } y_0(x) = \sum_i^6 \int_0^l G(x, \xi) \cdot F_i \delta(\xi - x_i) d\xi = \sum_i^6 \int_0^l G(x, x_i),$$

$\delta(\xi - x_i)$ - дельта-функция;

$$G_1(x, \xi) = - \frac{1}{EJ} \left[\left(1 - \frac{\xi}{l} \right) \frac{x^3}{6} + A \cdot x \right],$$

$$G_2(x, \xi) = - \frac{1}{EJ} \left[- \frac{\xi}{l} \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{\xi}{2} x^2 + Bx + D \right].$$

Каждая из функций G_1 и G_2 справедлива в пределах своего участка:

$G = G_1$ при $x < \xi$, $G = G_2$ при $x \geq \xi$.
 Неизвестные силы X_1 и X_2 , входящие в равенство (2) определяются формулами:

$$X_1 = \frac{y_0(l_2) \cdot G(l_1, l_2) - y_0(l_1) \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2, l_1) \cdot G(l_1, l_2) - [G(l_1, l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]},$$

$$X_2 = \frac{y_0(l_1) \cdot G(l_1, l_2) - y_0(l_2) \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}{G(l_2, l_1) \cdot G(l_1, l_2) - [G(l_1, l_1) + \frac{1}{r}] \cdot [G(l_2, l_2) + \frac{1}{r}]}.$$
(3)

где: $r = E_p A_p h_{ст} / l_p$ – коэффициент податливости упругоподатливых опор; E_p , A_p , l_p , $h_{ст}$ – параметры металлических элементов усиления [2-5,7,10] Для облегчения дальнейших расчетов максимально упрощаем формулы (3)

$$G(l_1, l_2) = G(\frac{l}{3}, \frac{2l}{3}) = G(4,8) = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{7l}{486};$$

$$G(l_1, l_1) = G(\frac{l}{3}, \frac{l}{3}) = G(4,4) = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{4l}{243};$$

$$G(l_2, l_1) = G(\frac{2l}{3}, \frac{l}{3}) = G(8,4) = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{7l}{486};$$

$$G(l_2, l_2) = G(\frac{2l}{3}, \frac{2l}{3}) = G(8,8) = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{4l}{243};$$

Для упрощения выражения для $y_0(x)$ (2) введём обозначение

$$\alpha(x) = \sum F_i \{ [1 - e(x - x_i)] \cdot \left[(1 - \frac{x_i}{l}) \frac{x^3}{6} + x(\frac{x_i^2}{2} - \frac{x_i l}{3} - \frac{x_i^3}{6l}) \right] + e(x - x_i) \cdot \left[-\frac{x_i x^3}{6 \cdot l} + \frac{x_i x^2}{2} + x(\frac{x_i l}{3} - \frac{x_i^3}{6l}) + \frac{x_i^3}{6} \right] \}.$$
(4)

Тогда получаем

$$y_0(x) = -\frac{1}{EJ} \alpha(x).$$
(5)

Подставляя полученные значения в формулу (3), делая несложные преобразования и введя безразмерный коэффициент $k = \frac{EJ}{rl^3}$ неизвестные, представим в следующем виде:

$$X_1 = -\frac{\alpha(l_2) \cdot \frac{7}{486} - \alpha(l_1) \cdot (\frac{4}{243} + k)}{l^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])},$$

$$X_2 = -\frac{\alpha(l_1) \cdot \frac{7}{486} - \alpha(l_2) \cdot (\frac{4}{243} + k)}{l^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])}.$$
(6)

Далее введём следующие обозначения:

$$\beta(x, \xi) = [1 - e(x - \xi)] \cdot \beta_1(x, \xi) + e(x - \xi) \cdot \beta_2(x, \xi);$$

$$\beta(x, \xi) = [1 - e(x - \xi)] \cdot \left[\left(1 - \frac{\xi}{l}\right) \frac{x^3}{6} + x \left(\frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi l}{3} - \frac{\xi^3}{6l} \right) + \right. \\ \left. + e(x - \xi) \cdot \left[-\frac{\xi x^3}{6 \cdot l} + \frac{\xi x^2}{2} + x \left(\frac{\xi l}{3} - \frac{\xi^3}{6l} \right) + \frac{\xi^3}{6} \right]; \right.$$

Тогда функция Грина (1) принимает вид

$$G(x, \xi) = -\frac{1}{EJ} \beta(x, \xi). \quad (7)$$

С учетом всех преобразований и новых обозначений функции прогибов (1) определяем формулой

$$y(x) = -\frac{1}{EJ} \Sigma F_i \cdot \alpha(x) + \frac{1}{EJ} X_1 \beta(x, l_1) + \frac{1}{EJ} X_2 \beta(x, l_2). \quad (8)$$

Изгибающие моменты и поперечные силы можно записать в виде:

$$M(x) = \Sigma F_i \cdot \alpha(x) - X_1 \frac{\partial^2 \beta(x, l_1)}{\partial x^2} - X_2 \frac{\partial^2 \beta(x, l_2)}{\partial x^2}, \quad (9)$$

$$Q(x) = \Sigma F_i \cdot \alpha(x) - X_1 \frac{\partial^3 \beta(x, l_1)}{\partial x^3} - X_2 \frac{\partial^3 \beta(x, l_2)}{\partial x^3}. \quad (10)$$

Для проверки правильности предложенных выше формул выполним расчет для первого и второго вариантов загрузки подкрановой балки (рис.2). Расчет первого варианта проведем для случаев - $k=0,0000061$ и $l_1 = \frac{l}{3} = 4$ м.

Координаты сосредоточенных сил, действующих на шпренгельную балку, в местах приложения колес мостового крана:

$$x_1=0.25\text{м}; x_2=5.35\text{м}; x_3=6.65\text{м}; x_4=11.75\text{м}; l_1 = \frac{l}{3}.$$

Вычислим 1-е слагаемое суммы в функции (13) при $x_1 = 0.25$ м

$$\alpha(l_1) = -\left[-\frac{0.25\text{м} \cdot 12^2 \text{ м}^2}{81 \cdot 2} + \frac{0.25\text{м} \cdot 12^2 \text{ м}^2}{18} - \frac{12\text{м}}{3} \left(\frac{0.25\text{м} \cdot 12\text{м}}{3} + \frac{0.25^3 \text{ м}^3}{6 \cdot 12} \right) + \frac{0.25^3 \text{ м}^3}{6} \right].$$

$$\cdot 315\text{кН} = 2.22F = 699.3\text{кН} \cdot \text{м}^3.$$

Аналогично вычисляются и другие значения слагаемых функции (13).

При $x_2 = 5.35$ м и $F = 315$ кН

2-е слагаемое

$$9750.195\text{кН} \cdot \text{м}^3.$$

при $x_3 = 6.65$ м и $F_2 = 315$ кН

3-е слагаемое

$$9303.84\text{кН} \cdot \text{м}^3.$$

при $x_4 = 11.75$ м и $F = 315$ кН

4-е слагаемое

$$560.07\text{кН} \cdot \text{м}^3.$$

Суммируя все полученные выше значения слагаемых, окончательно найдем,

$$\alpha(l_1) = (699.3 + 9750.195 + 9303.84 + 560.07)\text{кН} \cdot \text{м}^3 = 20313.405\text{кН} \cdot \text{м}^3;$$

По изложенной выше методике вычислены и другие значения функции (13) при: $l_1 = \frac{2l}{3}$;

$$x_1=0.25\text{м}; x_2=5.35\text{м}; x_3=6.65\text{м}; x_4=11.75\text{м}.$$

$$\alpha(l_2) = (560.07 + 9303.84 + 9749.565 + 699.93)\text{кН} \cdot \text{м}^3 = 20313.405\text{кН} \cdot \text{м}^3;$$

Из системы (15) определим неизвестные X_1 и X_2 :

$$X_1 = -\frac{20313.405kH \cdot m^3 \cdot \frac{7}{486} - 20313.405H \cdot m^3 \cdot (\frac{4}{243} + k)}{12^3 m^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])} = 380.789kH;$$

$$X_2 = -\frac{20313.405 \cdot m^3 \cdot \frac{7}{486} - 20313.405kH \cdot m^3 \cdot (\frac{4}{243} + k)}{12^3 m^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])} = 380.789kH;$$

Аналогичный расчет проведем для второго варианта загрузки подкрановой балки (рис.3) при $l_1 = l/3 = 4m$ и $k = 0.0000061$.

Координаты сосредоточенных сил, действующих на шпренгельную балку, в местах приложения колес мостового крана:

$$x_1 = 2.7m; \quad x_2 = 4m; \quad x_3 = 9.1m; \quad l_1 = \frac{l}{3} = 4m.$$

Вычислим 1-е слагаемое суммы в функции (13) при $x_1 = 2.7m$

$$\alpha(l_1) = -\left[-\frac{2.7m \cdot 12^2 m^2}{81 \cdot 2} + \frac{2.7m \cdot 12^2 m^2}{18} - \frac{12m}{3} \left(\frac{2.7m \cdot 12m}{3} + \frac{2.7^3 m^3}{6 \cdot 12} \right) + \frac{2.7^3 m^3}{6} \right] \cdot 315kH = 21.811F = 6870.465kH \cdot m^3.$$

Аналогично вычисляются и другие значения слагаемых функции (13).

При $x_2 = 4m$ и $F = 315kH$ 2-е слагаемое

$$8119.755kH \cdot m^3.$$

при $x_3 = 9.1m$ и $F_2 = 315kH$

3-е слагаемое

$$6068.79kH \cdot m^3.$$

Суммируя все полученные выше значения слагаемых, окончательно найдем,

$$\alpha(l_1) = (6870.465 + 8119.755 + 6068.79)kH \cdot m^3 = 21059.01kH \cdot m^3;$$

По изложенной выше методике вычислены и другие значения функции (13) при: $l_1 = \frac{2l}{3}$;

$$x_1 = 2.7m; \quad x_2 = 4m; \quad x_3 = 9.1m.$$

$$\alpha(l_2) = (5702.445 + 7840.035 + 8210.79)kH \cdot m^3 = 20808.27kH \cdot m^3;$$

Из системы (15) определим неизвестные X_1 и X_2 :

$$X_1 = -\frac{20808.27kH \cdot m^3 \cdot \frac{7}{486} - 21059.01kH \cdot m^3 \cdot (\frac{4}{243} + k)}{12^3 m^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])} = 427.528kH;$$

$$X_2 = -\frac{21059.01kH \cdot m^3 \cdot \frac{7}{486} - 20808.27kH \cdot m^3 \cdot (\frac{4}{243} + k)}{12^3 m^3 (\frac{7}{486} \cdot \frac{7}{486} - [\frac{4}{243} + k] \cdot [\frac{4}{243} + k])} = 357.228kH;$$

Определив опорные реакции R_A и R_B в металлодеревянных подкрановых балках построим эпюры $M(x)$ и $Q(x)$ для обоих вариантах загрузки (рис. 4 и 5).

Обсуждение результатов. Сравнение обоих вариантов нагружения подкрановых металлодеревянных балок показал, что наибольший изгибающий момент имеет место при втором варианте. Для этой балки максимальные внутренние усилия равны: $M_{\max} = 340.618kH \cdot m$; $Q_{\max} = 280.911kH$. Сечение дощатоклееного элемента металлодеревянной балки (рис.1) примем прямоугольной сплошной формы. Ширину сечения равным $b = 25cm$. Высоту

сечения, предварительную, определим при помощи формулы: $h = (1/8 - 1/12)L$. Исходя из этого берём $h = (1/10)L = 120\text{см}$.

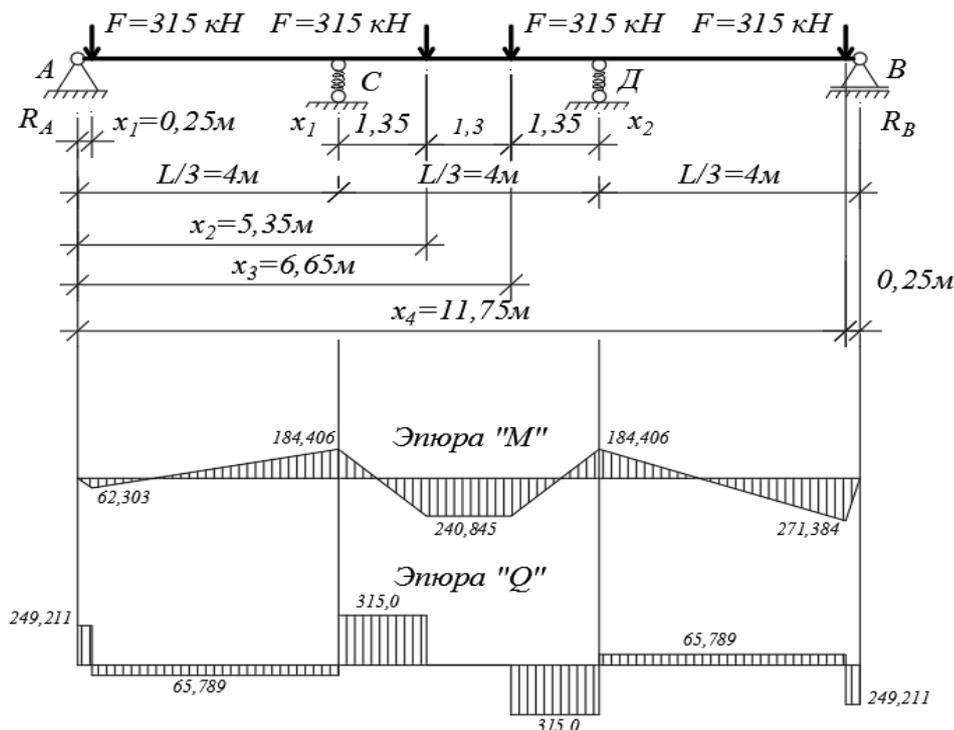


Рис. 4. Эпюры M и Q для первого варианта загрузки подкрановой балки
 Fig. 4. Diagrams M and Q for the first variant of loading the crane girder

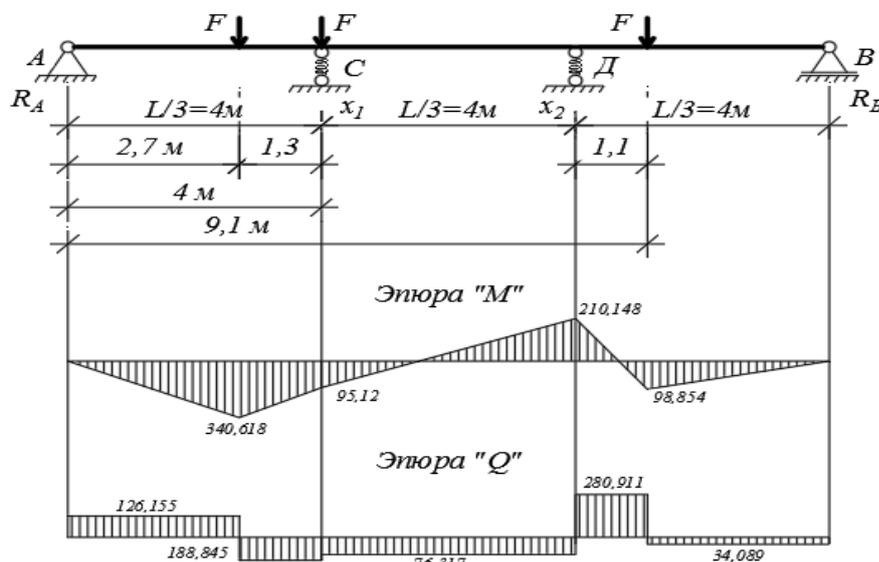


Рис. 5. Эпюры M и Q для второго варианта загрузки подкрановой балки
 Fig. 5. Diagrams M and Q for the second variant of loading the crane girder

Далее определим размеры металлических элементов усиления металлодеревянной подкрановой балки и проверим напряжение. Усилие в металлических элементах найдем из равновесия узлов показанных на рис. 6.

Из равновесии узлов 1, 2, 3 и 4 найдем усилия в их элементах:

$$N_{1-3} = -X_1 = -427.528\text{кН} = F_{ст}; \quad N_{2-4} = -X_2 = -357.228\text{кН} = F_{ст};$$

$$N_{3-4} = N_{A-3} \cdot \cos\alpha = 2180.153 \cdot 0.9806 = 2137.858\text{кН};$$

$$N_{A-3} = N_{1-3} / \sin\alpha = 427.528 / 0.1961 = 2180.153\text{кН};$$

$$N_{B-4} = N_{4-2} / \sin\alpha = 357.226 / 0.1961 = 1821.662\text{кН};$$

$$N_{4-3} = N_{B-4} \cdot \cos\alpha = 1821.662 \cdot 0.9806 = 1786.322\text{кН}.$$

В качестве расчетного значения усилия будем возьмем бóльшее из двух, т.к. элементы конструкций симметричны.

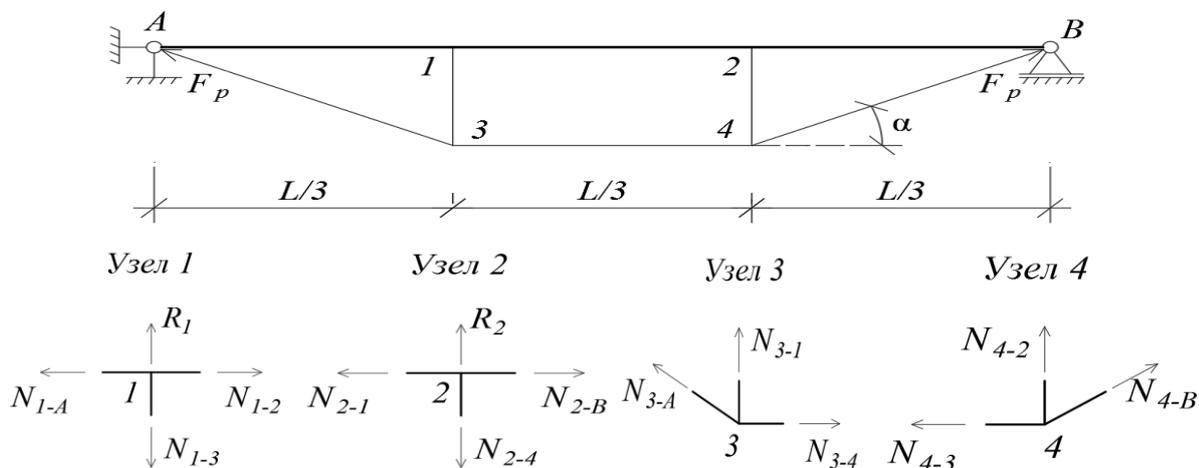


Рис. 6. Расчетная схема элемента усиления и его узлов

Fig. 6. Design diagram of the reinforcement element and its nodes

Нормальные напряжения в дощатоклееной балке подкрановой конструкции определим по формуле [1,6,12]: $\sigma = N_{3-4}/A_{нт} + M_{\max}/W_{нт} \leq R_c m_c m_b = 213785.8/25 \cdot 120 + 3406180/60000 = 71.262 + 56.77 = 128.032 \text{ кгс/см}^2 \leq R_c m_c m_b = 180 \cdot 1 \cdot 0.8 = 144 \text{ кгс/см}^2$.

Касательные напряжения:

$$\tau = \frac{S \cdot Q_{\max}}{I_n \cdot b} = \frac{45000 \text{ см}^3 \cdot 218.911 \text{ кН}}{3600000 \text{ см}^4 \cdot 25 \text{ см}} = 0.11 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < \gamma R_{cc} = 0.9 \cdot 2.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 2.16 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где S – статический момент половины сечения перекладины;

Q_{\max} – максимальная поперечная сила;

I_n – момент инерции перекладины;

b – ширина сечения перекладины.

1. Подбор сечения раскосов. Растягивающее усилие $F_p = N_{A-3} = 2180.153 \text{ кН}$.

$$\frac{F_p}{A_{нетто}} \leq \gamma R$$

Здесь $A_{нетто}$ – площадь поперечного сечения элемента в ослабленном месте;

γ – коэффициент условий работы, принимаем 0,9;

R – расчетное сопротивление стали, принимаемое по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [5].

По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_s^H}{\gamma_m} = \frac{365 \text{ МПа}}{1,025} = 356 \text{ МПа}; \quad A_{нетто} = \frac{F_p}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{2180.153 \text{ кН}}{0,9 \cdot 35,6} = 68.045 \text{ см}^2$$

Назначаем 2 стержня диаметром 5 см .

2. Подбор сечения затяжки. Растягивающее усилие $F_3 = N_{4-3} = 1786.322 \text{ кН}$.

По временному сопротивлению

$$R = \frac{R_s^H}{\gamma_m} = \frac{365 \text{ МПа}}{1,025} = 356 \text{ МПа}; \quad A_{нетто} = \frac{F_3}{\gamma \cdot R_B^H} = \frac{1786.322 \text{ кН}}{0,9 \cdot 35,6} = 55.75 \text{ см}^2;$$

Назначаем 2 стержня диаметром 4.5 см.

3. Подбор сечения стоек. Сжимающее усилие $F_c = 427.528 \text{ кН}$.

Условие устойчивости продольного изгиба стойки:

$$\frac{F_c}{\varphi_x \cdot A_c} \leq \gamma R = 0,9 \cdot 20 \frac{kH}{cm^2} = 18 \frac{kH}{cm^2}; \quad \text{где} \quad A_c = \frac{F_c}{\varphi_x \cdot \gamma \cdot R} = \frac{427.528 kH}{0,782 \cdot 0,9 \cdot 20 \frac{kH}{cm^2}} = 30.37 cm^2;$$

Для определения коэффициента φ_x необходимо задаться гибкостью λ .

При известном расчетном сопротивлении $R = 20 \frac{kH}{cm^2}$ и $\lambda = 70$ коэффициент продольного изгиба $\varphi_x = 0,782$. Принимаем сечение стойки в виде двух швеллеров №18 с параллельными поясами.

Для оценки правильности выбора металлодеревянной подкрановой балки сравним её с дощатоклееной подкрановой балки. Пролет дощатоклееной балки и крановая нагрузка аналогичная, что и для металлодеревянной. Для определение размера поперечного сечения дощатоклееной балки приложим крановую нагрузку как ко второму варианту (без упругих опор, рис.7) и определим в внутренние усилия. С помощью них определим размеры поперечного сечения.

Ширину сечения балки назначим равным 25см, как и для металлодеревянной балки. Высоту сечения определим из допустимого изгибного напряжения $\sigma = M_{\max}/W_{нт} = M_{\max}/(b \cdot h^2/6) \leq R_c \cdot m_c \cdot m_b = 180 \cdot 1 \cdot 0.8 = 144 \text{ кгс/см}^2$, $h = (1711.5 \cdot 6 / b \cdot R_c \cdot m_c \cdot m_b) 0.5 = 169 \text{ см}$, что на 40% больше чем высота металлодеревянной балки.

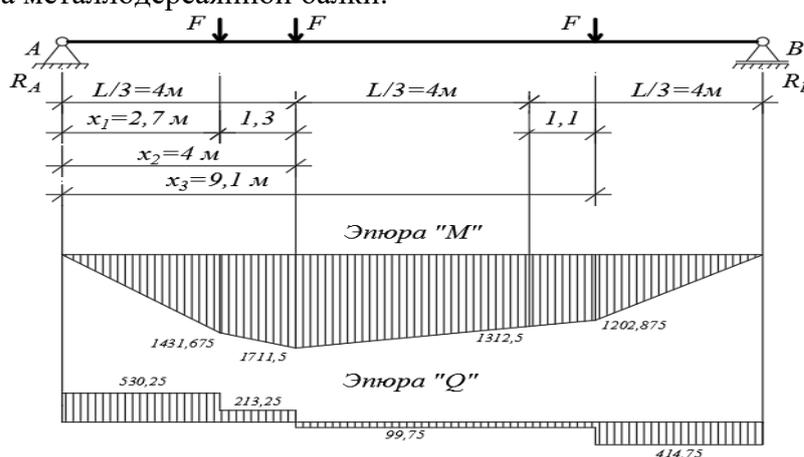


Рис. 7. Эюры М и Q для однопролетной подкрановой балки
 Fig. 7. Diagrams M and Q for a single-span crane girder

Вывод. Анализ теоретических расчетов металлодеревянной подкрановой балки показал:

1. Металлодеревянную подкрановую балку рационально использовать при действии мостовых кранов грузоподъемностью до 30тс;
2. Металлодеревянные подкрановые балки рекомендуется проектировать пролетами до 12 м;
3. Сравнение дощатоклееных подкрановых балок с металлодеревянными показало, что металлодеревянные балки на 40-55% эффективнее.

Библиографический список:

1. Калугин А.В. Деревянные конструкции. М.: АСВ, 2008. 288 с.
2. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников. Расчет стальных конструкций. М–75г. 230 с.
3. Металлические конструкции – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. 560 с.
4. Металлические конструкции/ Под ред. Ю.И. Кудишина. М.: Академия, 2008. 688 с.
5. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
6. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
7. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1976. 328с.
8. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.

9. Шуко В. Ю., Рошина С.Ю. Армированные деревянные конструкции в строительстве: учеб. пособие/2002. 68 с.
10. Юсупов А.К. Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании. ДГТУ. Махачкала, 2010. 160с.
11. Юсупов А.К. Методы прикладной математики в строительной механике. Том 1. ДГТУ. Махачкала, 2008. 346с.
12. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. Исследование металлодеревянной балки. Вестник машиностроения. №12. 2019. С.16-20

References:

1. Kalugin A.V. Derevyannyye konstruksii. M.: ASV, 2008. 288 s. [Kalugin A.V. Wooden structures. M. : ASV, 2008.288 p. (In Russ)]
2. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov. Raschet stal'nykh konstruksiy. M-75. 230p. (In Russ)]
3. Metallicheskiye konstruksii – pod redaktsiyey Ye.I. Belenya, Moskva, Stroyizdat, 1986 g. [Metal structures - edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986. 560 p. (In Russ)]
4. Metallicheskiye konstruksii/ Pod red. YU.I. Kudishina. M.: Akademiya, 2008. 688 s. [Metal structures / Ed. Yu.I. Kudishina. M. : Academy, 2008. 688 p. (In Russ)]
5. 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 VA Kucherenko, 92 p. (In Russ)]
6. SP 64.13330.2017. Derevyannyye konstruksii. M.: Standartinform, 2017. AO "NITS "Stroitel'stvo" – TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 92 s. [SP 64.13330.2017. Wooden structures. M. : Standartinform, 2017. JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after VA Kucherenko, 92 p. (In Russ)]
7. Stal'nyye konstruksii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat,1976. [Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. Moscow: Stroyizdat, 1976. 328p.(In Russ)]
8. 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)]
9. Shchuko V. YU., Roshchina S.YU. Armirovannyye derevyannyye konstruksii v stroitel'stve: ucheb. posobiye/2002. 68 s. [Shchuko V. Yu., Roshchina S.Yu. Reinforced wooden structures in construction: textbook manual / 2002. 68 p. (In Russ)]
10. Yusupov A.K. Metallicheskiye konstruksii v voprosakh, v otvetakh i v proyektirovaniy. DGTU. Makhachkala, 2010. [Yusupov A.K. Metal structures in questions, answers and design. " DSTU. Makhachkala, 2010. 160p.(In Russ)]
11. Yusupov A.K. Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike. Tom 1. DGTU . Makhachkala, 2008. [Yusupov A.K. Methods of applied mathematics in structural mechanics. Volume 1. DSTU. Makhachkala, 2008. 346p.(In Russ)]
12. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalov SH.G. «Issledovaniye metalloderevyannoy balki». Vestnik Mashinostroyeniya. №12. 2019g. [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. pp.16-20 (Ibn 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:

Abusupyan 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. Ustarkhano, Assistant, Department of Building Materials and Engineering Networks, e-mail: hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.06.2020.

Принята в печать 30.08.2020.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.06.2020.

Accepted for publication 30.08.2020.

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 образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлекцией 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: "**In-troduction**", "**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– №3 – 2020.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 47, No.3, 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 30.09.2020 г. Сдано в печать 30.09.2020 г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 14,00 Уч. изд.л. 14,00

Заказ № 781.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.