

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 48, № 3, 2021.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 48, No.3, 2021.

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, Mendeley, Unpaywall.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2021.

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 Т71366 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; CyberLeninka, Microsoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2021.

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 48, № 3, 2021

Главный редактор: Алиев Р.М., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, РФ.

<https://orcid.org/0000-0002-3061-4121>

Заместитель главного редактора:

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

<https://orcid.org/0000-0003-1093-5507>

Редакционная коллегия:

Научная рубрика «Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение»

Ответственный редактор: Евдулов О.В., д.т.н., доцент, ДГТУ, Махачкала, РФ.

Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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, ген. директор научно-коммерческой фирмы WBN, г. Берлин, Германия.

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

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

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

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

Научная рубрика «Информатика, вычислительная техника и управление»

Ответственный редактор: Мелехин В.Б., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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.

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

Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

Роззин 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.

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

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

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

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

Научная рубрика «Строительство и архитектура»

Ответственный редактор: Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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

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

Редакционный совет: Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели:

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

Кутозов 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.

Группы научных специальностей

2.4.8. (05.04.03) – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения,

2.5.10 (05.04.13) – Гидравлические машины и гидropнeвmoaгpeгaты

2.3.1 (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

2.3.3. (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

2.3.4. (05.13.10) – Управление в социальных и экономических системах

2.3.7. (05.13.12) – Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

2.3.5 (05.13.18) – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

2.3.6. (05.13.19) – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

2.1.3. (05.23.03) – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

2.1.5 (05.23.05) – Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9 (05.23.17) – Строительная механика

2.1.10 (05.23.19) – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 48, № 3

Махачкала, 2021. – 136с.

Издается по

решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя

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

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Тел./факс 8722)623715;

(8722)623964

e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ.6

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов. Разработка имитационной модели энергосберегающей системы на базе ПГУ-110 и АБХМ для проведения энергетического и термодинамического анализа.....6

О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, Р.Ш. Казумов. Конструкции термоэлектрических устройств для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания.....16

И.Е. Лобанов. Моделирование динамики смерчевых структур в трубе с турбулизаторами квадратных, полукруглых и треугольных профилей.....26

А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник О способах повышения эффективности водоходных движителей.....39

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ.....52

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей.....52

Р.А. Багутдинов, М.Ф. Степанов. Алгоритм обнаружения пожара для мультисенсорной системы.....59

Ш.М. Джафарова. Разработка модели информационной безопасности с применением производственной модели.....68

И.А.Лоскутов. Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС методом моделирования.....73

Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, Д.Г. Силка, Д.И.Коробкин, М.О. Мещеряков. Исследование побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации.....83

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА.....93

И.Ю. Глинянова. Обеспечение экологической безопасности жилых зон населенных пунктов на основе мониторинга кислых примесей в атмосфере.....93

М.Р. Нахаев. Изготовление арок из фибробетона для моста.....99

М.Ш. Саламанова., З.Х. Исмаилова. Промышленный опыт внедрения бесклнкерных вяжущих щелочной активации.....106

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Оптимизация параметров шпренгельных балок с двумя стойками.....117

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ.....133

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 8 , N o . 3 , 2 0 2 1 .	
Editor- in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121 Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Economics), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507 Editorial Board: Scientific rubric «Power, metallurgical and chemical mechanical engineering» Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Aassoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General DirectorWissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Scientific rubric «Computer science, computer engineering and management» Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E.Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhhtar, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Constrution Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexey N. Davidiyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A.Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	Research areas 2.4.8 (05.04.03) - Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning systems and life support, 2.5.10 (05.04.13) - Hydraulic machines and hydropneumatic units, 2.3.1 (05.13.01)-System analysis, management and information processing (By Branches) (Technical Sciences), 2.3.3. (05.13.06) - Automation and management of technological processes and production (By Branches), 2.3.4. (05.13.10) - Management in social and economic systems, 2.3.7. (05.13.12) - Design automation systems (By Branches), 2.3.5 (05.13.18)- Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),2.3.6. (05.13.19) - Methods and systems for information security, information security, 2.1.3. (05.23.03) - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5 (05.23.05) Building materials and products, 2.1.9 (05.23.17) Construction mechanics, 2.1.5 (05.23.19) - Ecological safety of construction and urban economy Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science.Vol. 48, No.3 Makhachkala, 2021–136p. Published by Decision of the Academic Council of the 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

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING.....6

L.V. Galimova, D.Z. Bayramov. Development of a simulation model of energy-saving system based on ccgt-110 and abcm for energy and thermodynamic analysis.....6

O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev, R.Sh. Kazumov. Designs of thermoelectric devices for extracting foreign objects from the human body by freezing.....16

I.E. Lobanov. Modeling of the dynamics of tornado structures in a pipe with turbulators of square, semicircular and triangular profiles.....26

A.V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik. On ways to improve the efficiency of water propellers....39

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT.....52

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov. Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles.....52

R.A. Bagutdinov, M.F. Stepanov. Algorithm of fire detection for multi-sensor system.....59

Sh.M. Jafarova. Development of an information security model using a production model.....68

I.A. Loskutov. Normalization of assembly technical process of the frame of power and control equipment for nuclear power plants by the method of simulation.....73

E.A. Rogozin, R.E. Rogozin, D.G. Silka, D.I. Korobkin, M.O. Meshcheryakov. Investigation of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensory input of information.....83

BUILDING AND ARCHITECTURE.....93

I.Yu. Glinyanova. Ensuring the environmental safety of residential areas of settlements based on the monitoring of acidic impurities in the atmospheric air кислых примесей в атмосфере.....93

M.R. Nakhaev. Manufacturing of fiber-reinforced concrete bridge arches.....99

M.Sh. Salamanova, Z.Kh. Ismailova. Industrial experience in the implementation of clinker-free binders of alkaline activation.....106

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Optimization of the parameters of truss beams with two posts.....117

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS.....133

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

УДК 621.56, 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-6-15

Оригинальная статья / Original Paper

Разработка имитационной модели энергосберегающей системы на базе ПГУ-110 и АБХМ для проведения энергетического и термодинамического анализа

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов

Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия

Резюме. Цель. Имитационное моделирование находит все большее применение для исследования сложных экономических, технических, биологических и т.д. систем. Такие системы характеризуются многофакторностью связей их функционирования, нелинейными зависимостями между элементами системы и стохастичностью их параметров и т.д. Целью данной работы является разработка имитационной модели на базе языка программирования C# для энергосберегающей системы ПГУ-110 и АБХМ на основе результатов ручного анализа по данным натурного эксперимента. **Метод.** Для разработки имитационной модели применяются методы линейной и нелинейной аппроксимации, методы энергетического и термодинамического анализа, а также методы математического имитационного моделирования. **Результат.** Результатом данной работы является разработанное программное обеспечение SAESSv. 3.0, которое позволяет вести анализ работы системы ПГУ-110 и АБХМ вместе и по отдельности в широком диапазоне параметров и в реальном времени. **Вывод.** Для оценки адекватности разработанной программы проведен сравнительный анализ программного и ручного расчета. Отклонения не превышают в среднем 3 %, что подтверждает достоверность имитационной модели.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоиспользующая холодильная машина, имитационная модель, аппроксимация, адекватность модели

Для цитирования: Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов. Разработка имитационной модели энергосберегающей системы на базе ПГУ-110 и АБХМ для проведения энергетического и термодинамического анализа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3): 6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-6-15

Development of a simulation model of energy-saving system based on CCGT-110 and ABCM for energy and thermodynamic analysis

L.V. Galimova, D.Z. Bayramov

Astrakhan State Technical University,
16 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objectives. Simulation modeling is increasingly being used for the study of complex economic, technical, biological, etc. systems. Such systems are characterized by multifactorial relationships of their functioning, nonlinear dependencies between system elements and stochasticity of their parameters, etc. The purpose of this work is to develop a simulation model based on the C# programming language for the energy-saving CCGT-110 and ABCM system based on the results of manual analysis according to the data of a full-scale experiment. **Method.** Methods of linear and nonlinear approximation, methods of energy and thermodynamic analysis, as well as methods of mathematical simulation modeling are used to develop the simulation model. **Result.** The result of this work is the developed software SAESS v. 3.0, which allows you to analyze the operation of the CCGT-110 and ABCM systems together and separately in a wide range of parameters and in real time. **Conclusion.** To assess the

adequacy of the developed program, a comparative analysis of software and manual calculation was carried out. Deviations do not exceed an average of 3 %, which confirms the reliability of the simulation model.

Keywords: energy saving, heat-using refrigeration machine, simulation model, approximation, adequacy of the model

For citation: L.V. Galimova, D.Z. Bayramov. Development of a simulation model of energy-saving system based on CCGT-110 and ABCM for energy and thermodynamic analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 6-15. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-6-15

Введение. Цель имитационного моделирования в общем случае состоит в клонировании поведения сложных структурированных экономических, энергетических, биологических и т.д. систем во времени. Имитационное моделирование позволяет объединить практический и теоретический опыт с математическими методами для анализа сложных схем [1, 14]. С развитием компьютерной техники имитационное моделирование получило широкое применение при решении задач в строительстве, транспортировке, производственных процессах, технических системах и т.д. [2, 12]. Также имитационное моделирование позволяет исследовать сложные действующие технические схемы, на которых возможно лишь проведение натурных экспериментов.

Объектом исследования является сложная энергосберегающая система на базе ПГУ-110 и АБХМ HSA-1157, расположенная в городе Астрахань. В работах [2, 4, 5] приводятся результаты исследования АБХМ и ПГУ в составе данной системы. В работах [5, 6] проводился полный энергетический анализ ПГУ-110 и АБХМ в рамках системного анализа. По результатам выявлен ряд отклонений в работе ПГУ: температура уходящих газов после КУ превышает проектные значения в среднем на 19 %, давление уходящих газов на 18,4 %, эффективность работы градирни оборотного водоснабжения не превышает 65 %.

Постановка задачи. Повторное проведение анализа с новыми данными является достаточно трудоемкой задачей. Для возможности многократного проведения системного анализа энергосберегающей системы целесообразно разработать математическую имитационную модель, которая позволяет учесть технические характеристики изучаемой системы и влияние на нее внешних факторов. В задачи моделирования входят:

1. Энергетический и эксергетический анализ АБХМ;
2. Энергетический и эксергетический анализ ПГУ;
- 2.1. Энергетический и эксергетический анализ ГТУ;
- 2.2. Энергетический и эксергетический анализ ГТУ – КУ – ПТ;
- 2.3. Энергетический и эксергетический анализ 2 ГТУ – 2КУ – ПТ;

Разработка любой имитационной модели требует создания блок-схемы со схематичным изображением логики работы модели. Обобщенная блок – схема программы для проведения системного анализа энергосберегающей системы на базе абсорбционный холодильной машины и парогазовой установки представлена на рис. 1, а остальные блоки описаны в работе [7]. Блок – схема состоит из 3 основных блоков: блок анализа АБХМ, блок анализа ПГУ, блок анализа ПГУ-АБХМ. Блок анализа ПГУ имеет подблоки:

1. Анализ одной ГТУ;
2. Анализ одной ГТУ с котлом-утилизатором и паровой турбиной;
3. Анализ двух ГТУ с двумя котлами-утилизаторами и одной паровой турбиной;

Анализ ПГУ – АБХМ состоит из 3-х подблоков: анализ ПГУ-АБХМ; оптимизация; прогнозирование.

Методы исследования. Для разработки имитационной модели были определены математические зависимости термодинамических параметров рабочих веществ системы ПГУ-АБХМ, которые описывают поведение веществ при изменении влияющих факторов.

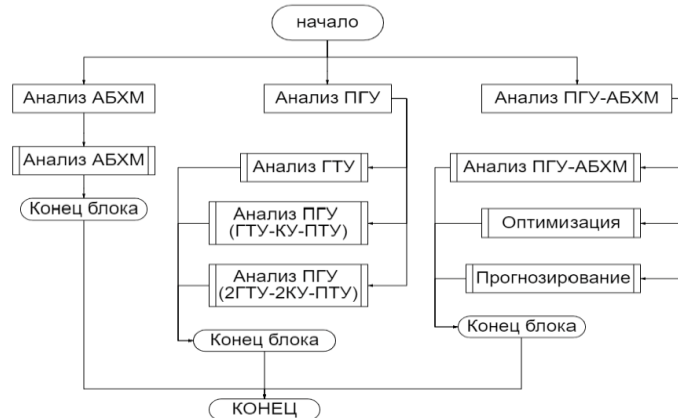


Рис. 1. Блок-схема «Общий вид»

Fig. 1. Block diagram «General form»

Рабочими веществами системы является: ГТУ – воздух, топливо; КУ – вода, вода в состоянии насыщенной жидкости, насыщенный пар, перегретый пар; ПТ – перегретый пар, конденсат; АБХМ – водный раствор бромид лития, холодильный агент, этиленгликоль.

Математические зависимости для АБХМ были получены при помощи программ для статистического анализа данных DataFit и OriginPro 2018 [8, 9]. Математические зависимости термодинамических параметров воздуха, воды и водяного пара приняты по справочникам [1, 13]. Математические зависимости энтальпии для перегретого водяного пара представлены в табл.1, коэффициенты математических зависимостей энтальпии – в табл.2.

Таблица 1. Математические зависимости энтальпии для перегретого водяного пара

Table 1. Mathematical dependences of enthalpy for superheated water vapor

Энтальпия перегретого водяного пара при давлении/ Enthalpy of superheated water vapor at pressure P = 0,01 - 0,1 бар	
$I = (z_0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$	
Энтальпия перегретого водяного пара при давлении/ Enthalpy of superheated water vapor at pressure P = 0,1 - 1 бар	
$I = (z_0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$	
Энтальпия перегретого водяного пара при давлении/ Enthalpy of superheated water vapor at pressure P = 1 - 10 бар	
$I = z_0 + a \cdot P + b \cdot t + c \cdot P^2 + d \cdot t^2 + f \cdot P \cdot t$	
Энтальпия перегретого водяного пара при давлении/ Enthalpy of superheated water vapor at pressure P = 10 - 150 бар	
$I = (z_0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + B03 \cdot t^3) / (1 + A1 \cdot P + A2 \cdot P^2 + A3 \cdot P^3 + B1 \cdot t + B2 \cdot t^2)$	

Таблица 2. Коэффициент для математических зависимостей энтальпии перегретого водяного пара

Table 2. Coefficient for mathematical dependences of the enthalpy of superheated water vapor

Энтальпия перегретого водяного пара при давлении/ Enthalpy of superheated water vapor at pressure							
P = 0,01 - 0,1 бар		P = 0,1 - 1 бар		P = 1 - 10 бар		P = 10 - 150 бар	
z0	2377,61	z0	2493,37157	z0	2478,2538	z0	2011,198440
A01	57,4327	A01	-420600,5856	a	-7,0709	A01	-58,03103
B01	3,73E+07	B01	3200,44282	b	1,97676	B01	-16,47908
B02	-71135,38	B02	1,96992	c	0,02444	B02	0,21885
C02	22053,98	C02	-291,86264	d	0,0000944	B03	0,0002331780
A1	0,02099	A1	-168,40026	f	0,01149	A1	-0,01322
A2	-0,000010	A2	-0,44595			A2	0,0000342738
B1	14924,75	B1	1,28001			A3	-0,0000000832
B2	-20,84448	B2	-0,00016221			B1	-0,00992
C2	-2,1249	C2	0,01334			B2	0,0001051690

Математические зависимости энтропии для перегретого водяного пара представлены в табл. 3, а коэффициенты - в табл. 4.

Таблица 3. Математические зависимости энтропии для перегретого водяного пара
Table 3. Mathematical dependences of entropy for superheated water vapor

Энтропия перегретого водяного пара при давлении/ Entropy of superheated water vapor at pressure P = 0,01 - 0,1 бар
$s = (z0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$
Энтропия перегретого водяного пара при давлении/ Entropy of superheated water vapor at pressure P = 0,1 - 1 бар
$s = (z0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$
Энтропия перегретого водяного пара при давлении/ Entropy of superheated water vapor at pressure P = 1 - 10 бар
$s = (z0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$
Энтропия перегретого водяного пара при давлении/ Entropy of superheated water vapor at pressure P = 10 - 150 бар
$s = (z0 + A01 \cdot P + B01 \cdot t + B02 \cdot t^2 + C02 \cdot P \cdot t) / (1 + A1 \cdot P + B1 \cdot t + A2 \cdot P^2 + B2 \cdot t^2 + C2 \cdot P \cdot t)$

Таблица 4. Коэффициент для математических зависимостей энтропии перегретого водяного пара
Table 4. Coefficient for mathematical dependencies of the entropy of superheated water vapor

Энтропия перегретого водяного пара при давлении/ Entropy of superheated water vapor at pressure							
P = 0,01 - 0,1 бар		P = 0,1 - 1 бар		P = 1 - 10 бар		P = 10 - 150 бар	
z0	2,1052E+06	z0	50,12808	z0	13158900	z0	6,27906
A01	2,8221E+09	A01	5330,24277	A01	169317000	A01	-0,10249
B01	1,0940E+05	B01	2,60595	B01	1320730,00	B01	0,00948
B02	49,03689	B02	0,0002977	B02	-443,20062	B02	-0,0000207198
C02	4,9260E+06	C02	9,6393800	C02	397107,055	C02	0,00084487
A1	3,3762E+08	A1	735,4058300	A1	28418100	A1	-0,00281
A2	2,2906E+08	A2	53,8998900	A2	251735,016	A2	0,0000340924
B1	11122,24	B1	0,2899700	B1	161835,484	B1	0,00058660
B2	1,25504	B2	-0,0000481	B2	-87,96357	B2	-0,0000023977
C2	370892,63	C2	0,7789500	C2	35813,8497	C2	0,0000994419

Причиной достаточно сложных полиномиальных зависимостей является их нелинейность и зависимость от двух параметров. Полученные зависимости для основных термодинамических параметров рабочих веществ легли в основу разработанной имитационной модели и позволили получить максимальную достоверность.

На основе представленных блок-схем и математических зависимостей разработана автоматизированная система анализа работы энергосберегающей установки на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины и парогазовой установки ПГУ-110 на языке программирования C#. C# – это объектно- и компонентно-ориентированный язык программирования. C# предоставляет языковые конструкции для непосредственной поддержки такой концепции работы. Благодаря этому C# подходит для создания и применения программных компонентов [20]. Блок АБХМ предназначен для анализа абсорбционной холодильной машины отдельно от всей системы.

Для проведения термодинамического анализа необходимо определить параметры узловых точек. Дальнейший термодинамический расчет производится по описанной в данной литературе [3, 10] методике, а эксергетический анализ – по методике, представленной в [5, 17, 18].

Основное окно, которое показано на рис. 2, состоит из 3-х областей: ввод исходных данных; таблица с выводом термодинамических свойств; область результатов расчета. Инструкция по работе с блоком АБХМ представлена в программе во вкладке «Справка». Для оценки адекватности разработанного блока был проведен программный расчет по результатам замеров за 2019 год и проведено сравнение с ручным расчетом.

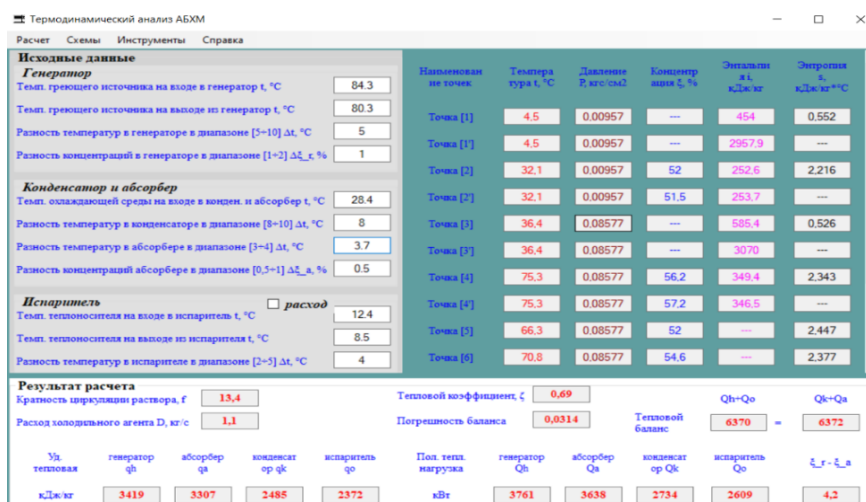


Рис. 2. Блок АБХМ

Fig. 2. Block ABCN

В табл. 5 представлены результаты программного расчета.

Таблица 5. Результаты программного расчета

Table 5. Results of the program calculation

Наименование Name	ед. измер. Units	Май May	Июнь June	Июль July	Август August
Температура конденсации Condensing temperature	°C	36,4	36,4	37,3	37,1
Температура кипения Boiling temperature	°C	4,5	6,1	5,5	3,3
Концентрация слабого раствора Weak solution concentration	%	52,3	52,4	51,7	52,5
Концентрация крепкого раствора Strong solution concentration	%	56,2	56,4	57,1	57,1
Кратность циркуляции Circulation rate		14,4	13,2	12,8	12,4
Расход холодильного агента Refrigerant consumption	кг/с	1,1	0,9	0,9	1
Интервал дегазации Degassing interval	%	4	4,2	4,4	4,4
Уд. тепловая нагрузка на испаритель Ud. heat load on the evaporator	кДж/кг	2372	2328	2289	2290
Уд. тепловая нагрузка на конденсатор Ud. thermal load on the capacitor	кДж/кг	2485	2385	2400	2414
Уд. тепловая нагрузка на абсорбер Ud. heat load on the absorber	кДж/кг	3307	3218	3223	3209
Уд. тепловая нагрузка на генератор Ud. generator heat load	кДж/кг	3419	3380	3313	3304
Полная тепловая нагрузка на испаритель Total heat load on the evaporator	кВт	2609	2095	2060	2290
Полная тепловая нагрузка на конденсатор Total thermal load on the condenser	кВт	2734	2147	2160	2414
Полная тепловая нагрузка на абсорбер Total heat load on the absorber	кВт	3638	2896	2901	3209
Полная тепловая нагрузка на генератор Total heat load on the generator	кВт	3761	3042	2982	3304
Тепловой коэффициент Heat coefficient		0,69	0,69	0,69	0,69

На рис. 3 представлена сравнительная гистограмма ручного и программного расчета удельных тепловых нагрузок на аппараты АБХМ в период 2019 года. По гистограммам можно видеть, что разница программного и ручного расчета невелика.

Следовательно, разработанный блок прошел проверку на достоверность и может быть использован. Блок анализ ПГУ предназначен для анализа ПГУ без абсорбционной холодильной машины.

Система ПГУ-110 является действующей, поэтому задача данного блока сводится к энергетическому и эксергетическому анализу. Энергетический анализ сводится к определению энтальпии и энтропии в точках цикла, а также к определению удельных тепловых нагрузок по известной методике [11, 16].

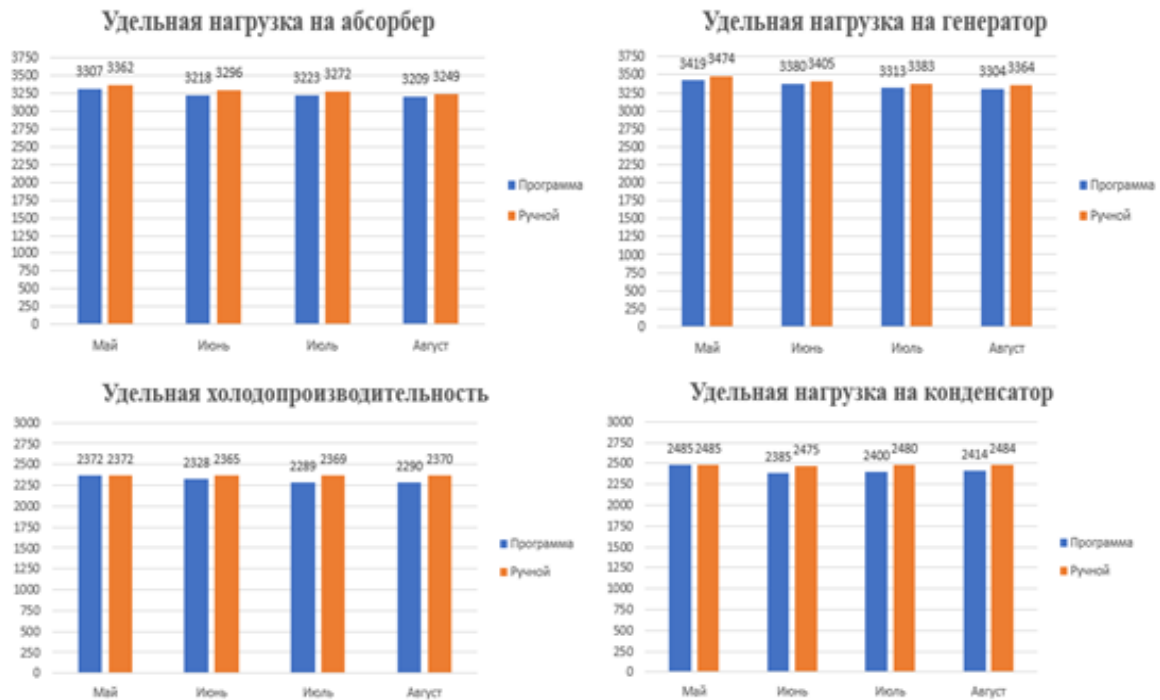


Рис. 3. Сравнительная гистограмма ручного и программного расчета

Fig. 3. Comparative histogram of manual and software calculation

Принципы построения эксергетических балансов для газотурбинной и паровых установок описаны в литературе [16, 15, 19].

На рис. 4 и 5 представлены окна разработанного блока.

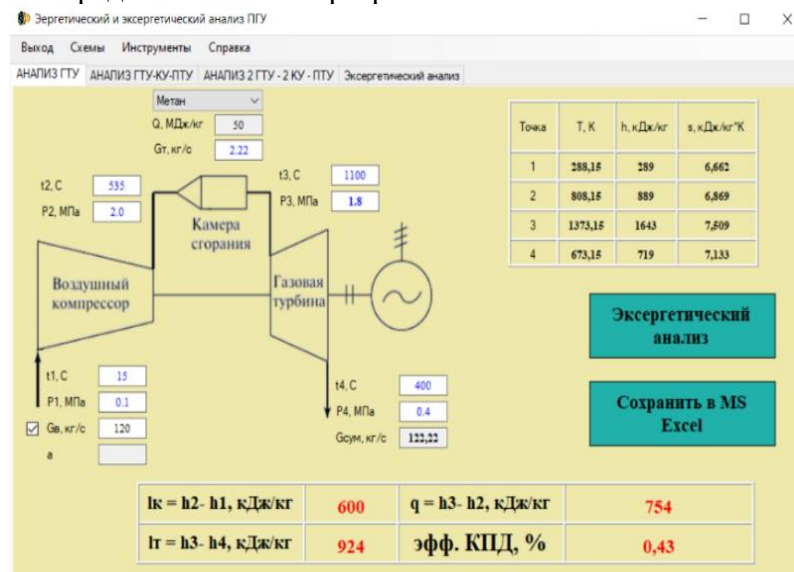


Рис. 4. Окно «АнализГТУ»

Fig. 4. The "GTU analysis" window

Точка	T, K	h, кДж/кг	s, кДж/кг·K
1	288,15	289	6,662
2	808,15	889	6,869
3	1373,15	1643	7,609
4	673,15	719	7,133

Рис. 5. Окно «Эксергетический анализ ГТУ»

Fig. 5. Window "Exergetic analysis of GTU"

Остальные окна данного блока выполняют такую же роль только с учетом котла-утилизатора и паровой турбины. Инструкция по работе с блоком «анализ ПГУ» представлена в программе во вкладке «Справка». Для оценки адекватности разработанного блока «анализ ПГУ» был проведен программный расчет эксергетического ПГУ по результатам режима работы за один месяц 2019 года и проведено сравнение с ручным расчетом. В табл. 6 представлены результаты программного расчета.

Таблица 6. Результат эксергетического анализа, сделанный в программе

Table 6. The result of the exergetic analysis in the made in the program

Наименование Name	Ef, МВт	Ep, МВт	Ed, МВт	yd, %	ε, %
1	2	3	4	5	6
камера сгорания The combustion chamber	169	156	13	11,7	92,3
компрессор compressor	65	58	7	6,3	89,2
газовая турбина gas turbine	156	137	19	17,1	87,8
Общая система General System	111	41	39	35,1	36,9
котел-утилизатор waste boiler	31	23	8	25,8	74
паровая турбина steam turbine	12	11	1	3,2	91,6
конденсатор Capacitor	3,1	2,4	0,7	2,2	77,4
ПГК Freight One	3,7	3,0	0,7	2,2	81
Общая система General System	31	8,6	10,4	33,5	27,7

Для сравнения выбраны энергопреобразующие элементы системы. На рис.6 представлена сравнительная гистограмма программного и ручного эксергетического анализа газовой и паровой турбин, а на рис.7 для котла-утилизатора и камеры сгорания.

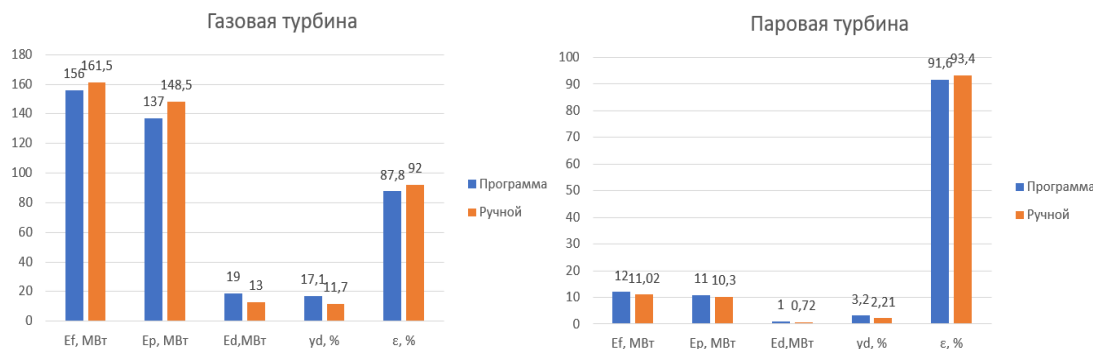


Рис. 6. Сравнительная гистограмма эксергии для газовой и паровой турбин

Fig. 6. Comparative histogram of exergy for gas and steam turbines

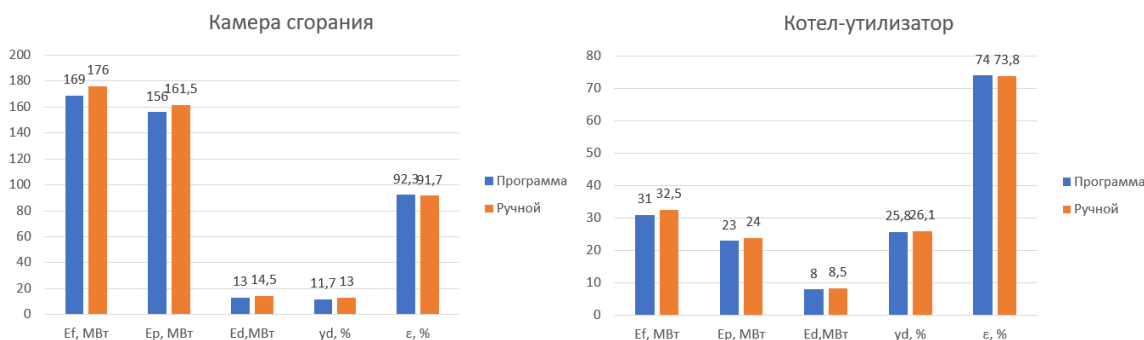


Рис.7. Сравнительная гистограмма эксергии для котла-утилизатора и камеры сгорания

Fig. 7. Comparative histogram of exergy for the recovery boiler and the combustion chamber

По гистограммам можно видеть, что отклонение программного и ручного расчета не превышает допустимых пределов. Следовательно, разработанный блок прошел проверку на достоверность и может быть использован.

Вывод. Разработанное программное обеспечение SAESSv. 3.0 позволяет имитировать работу АБХМ и ПГУ в составе энергосберегающей системы ПГУ-110 и АБХМ в широком диапазоне рабочих параметров.

Полученные методом аппроксимации математические зависимости для водного раствора бромида лития с диаграммы i - ξ , для воздуха в диапазоне температур от -50 до 1500 С, для воды, водяного перегретого пара в диапазоне от 0,01 до 100 МПа позволяют имитировать работу не только рассматриваемой в данной работе системы, но и другие подобные энергосистемы.

Для оценки разработанной модели проводилось сравнение результатов программного и ручного расчетов. В среднем отклонение программного расчета от ручного составляет не более 3 %, что позволяет говорить о высокой достоверности результатов разработанного ПО.

Библиографический список:

1. Александров А. А., Григорьев Б. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 158 с.
2. Байрамов Д. З., Галимова Л. В. Анализ способов эксергоэкономической оптимизации сложных энергосберегающих систем // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф., 13–15 ноября 2019 г. СПб.: Университет ИТМО, 2019. Т. 1. С. 17–23. ISBN 978-5-7577-0618-4
3. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. – М.: Политехника, 2006. – 944 с.
4. Галимова Л.В., Байрамов Д.З. Термодинамический анализ работы парогазовой установки в составе энергосберегающей системы на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 57–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65
5. Галимова Л.В., Байрамов Д.З. Комплексный анализ абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в составе энергосистемы ПГУ-110 И АБХМ. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 18-27. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-18-27
6. Галимова Л.В., Байрамов Д.З., Цветков С.А., Цветков Ю.А. «Комплексный анализ действующей энергосберегающей системы на базе парогазовой установки и абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины», Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Омск, 24–27 февр. 2021 г.) / М-во образования Ом. обл. [и др.]; редкол.: В. А. Лихолобов [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. – 292 с.: ил.
7. Галимова Л.В., Байрамов Д.З. «Разработка блок-схемы программы для проведения системного анализа энергосберегающей системы ПГУ-БХМ». Сборник материалов всероссийской междисциплинарной научной конференции «Наука и практика-2020», Астрахань, 19-30 октября 2020 г.
8. Галимова Л.В., Байрамов Д.З., Байрамов Ш.З. Методика первичного проектирования научно обоснованной схемы оптимизации энергосберегающей системы на базе парогазовой энергетической

- установки и абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. Холодильная техника, №1, 2020. С. 28-33
9. Галимова Л.В., Байрамов Д.З., Байрамов Ш.З. Создание базы данных для оптимизации работы абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в составе энергоблока. LXI Международные научные чтения (памяти А.Н. Колмогорова): Сборник статей Международной научно-практической конференции. Москва: ЕФИР, 2019. - С. 40 - 45
 10. Галимова Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. – Издательство АГТУ, 1997. – 226 с.
 11. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 368 с.
 12. Ревина И. В., Бояркин Г. Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 230–234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234
 13. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. Справочник. 4-е изд., перераб. М.: Энергоиздат, 1987. 288 с.
 14. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование: Теория и технологии. – СПб.: Корона принт; М.: Альтекс-А, 2004. – 384с.
 15. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
 16. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.
 17. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. Int. J. Energy. 2008 Sep 1; 33 (6): 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
 18. Panahizadeh, F., Hamzehei, M., Farzaneh-Gord, M. et al. Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. J Therm Anal Calorim (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09966-4>
 19. Xiao Feng, Zhu X., Zheng J. A practical exergy method for system analysis [of steam power plants] // Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1996; 3: 2068–2071. DOI: 10.1109/IECEC.1996.553438
 20. <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>

References:

1. Alexandrov A. A., Grigoriev B. A. Tables of thermophysical properties of water and water vapor. Moscow: MEI Publishing House, 2003; 158. (In Russ)
2. Bayramov D. Z., Galimova L. V. Analysis of methods of exergoeconomical optimization of complex energy-saving systems // Low-temperature and food technologies in the XXI century: collection of tr. IX International Scientific and Technical Journal. conf., November 13-15, 2019. St. Petersburg: ITMO University, 2019; 1: 17-23. ISBN 978-5-7577-0618-4. (In Russ)
3. Baranenko A.V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeevsky L. S. Refrigerating machines. M.: [Politekhnik] Polytechnic. 2006; 944. (In Russ)
4. Galimova L. V., Bairamov D. Z. Thermodynamic analysis of combined cycle plant operation as part of an energy-saving system based on an absorption bromide-lithium refrigerating machine. [Omskiy nauchnyy vestnik] Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020; 4(4):57–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65. (In Russ)
5. L.V. Galimova, D.Z. Bayramov. Comprehensive analysis of the absorption lithium bromide refrigerating machine as part of the CCGT-110 and ALBRM power system. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 18-27. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-18-27. (In Russ)
6. Galimova L. V., Bayramov D. Z., Tsvetkov S. A., Tsvetkov Yu. A. "A comprehensive analysis of the current energy-saving system based on a combined-cycle gas installation and an absorption bromine-lithium refrigerating machine", Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference. conf. (Russia, Omsk, February 24-27, 2021) / Ministry of Education of the Omsk region [et al.]; editorial board: V. A. Likholobov [et al.]. - Omsk: Publishing house of OmSTU, 2021; 292. (In Russ)
7. Galimova L. V., Bayramov D. Z. "Development of a flowchart of a program for conducting a system analysis of an energy-saving PSU-BHM system". Participation in the All-Russian interdisciplinary scientific conference "Science and Practice-2020" with a report-Astrakhan, October 19-30, 2020. (In Russ)
8. Galimova L. V., Bayramov D. Z., Bayramov Sh. Z. Methodology of the primary design of a scientifically based scheme for optimizing an energy-saving system based on a combined-cycle power plant and an absorption bromide-lithium refrigerating machine. [Kholodil'naya tekhnika] Refrigeration equipment. 2020; 1: 28-33. (In Russ)

9. Galimova L. V., Bayramov D. Z., Bayramov Sh. Z. Creation of a database for optimizing the operation of an absorption lithium bromide refrigerating machine as part of a power unit. LXI International Scientific Readings (in memory of A. N. Kolmogorov): A collection of articles of the International scientific and Practical Conference. Moscow: EFIR, 2019; 40-45. (In Russ)
10. Galimova L. V. Absorption refrigerating machines and heat pumps. AGTU publishing house, 1997. 226 p.
11. Sysin L. V. combined-cycle and gas-turbine thermal power plant. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute. un-ta, 2010; 368. (In Russ)
12. Revina I. V., Boyarkin G. N. Simulation modeling of the production process of manufacturing parts. [Omskiy nauchnyy vestnik] *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 6 (162): 230-234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234. [In Russ]
13. Rivkin S. L. Thermodynamic properties of gases. Guide. 4th ed., pererab. M.: *Energoizdat*, 1987; 288. (In Russ)
14. Ryzhikov Yu. I. Simulation modeling: Theory and technologies. - St. Petersburg: Korona print; Moscow: *Altex-A*, 2004; 384. (In Russ)
15. Tsatsaronis D. Interaction of thermodynamics and economics for minimizing the cost of an energy-converting system. Odessa: *Studio "Negociant"*, 2002; 152. (In Russ)
16. Tsanev S. V., Burov V. D., Remezov A. N. Gas turbine and steam-gas installations of thermal power stations. Moscow: *MEI Publishing House*, 2002; 584. (In Russ)
17. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Int. J. Energy*. 2008; 1; 33 (6): 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
18. Panahizadeh, F., Hamzehei, M., Farzaneh-Gord, M. et al. Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. *J Therm Anal Calorim* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09966-4>
19. Xiao Feng, Zhu X., Zheng J. A practical exergy method for system analysis [of steam power plants] // *Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. 1996; 3: 2068–2071. DOI: 10.1109/IECEC.1996.553438
20. <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>

Сведения об авторах:

Галимова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, e-mail: galimova_lv@mail.ru

Байрамов Джамиль Загидович, аспирант, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Information about the authors:

Larisa V. Galimova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., e-mail: galimova_lv@mail.ru

Dzhamil Z. Bayramov, Postgraduate, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 13.07.2021.

Одобрена после рецензирования / Reviced 02.08.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 03.08.2021.

**Конструкции термоэлектрических устройств для извлечения инородных объектов
из тела человека методом примораживания**

О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, Р.Ш. Казумов

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

Резюме. Целью статьи является рассмотрение конструкций термоэлектрических устройств (ТЭУ) для извлечения инородных объектов (ИО) из тела человека методом примораживания с различными вариантами съема теплоты с горячих спаев термоэлектрического модуля (ТЭМ). **Метод.** Описаны модификации термоэлектрических устройств, предназначенных для извлечения ИО из тела человека методом примораживания к специальному зонду. Это техническое исполнение отличается способом отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ, для чего применяется воздушный теплоотвод, плавящиеся рабочие вещества и предварительное захолаживание радиатора. Приведены основные соотношения для расчета технических средств, предназначенных для съема теплоты с горячих спаев ТЭМ. **Результат.** Получены графики зависимости изменения температуры горячих спаев ТЭМ во времени при различных значениях его теплопроизводительности при использовании системы воздушного теплоотвода и времени полного проплавления различных рабочих веществ, используемых в приборе. **Вывод.** Полученные данные показывают, что для условий эксплуатации ТЭУ температура горячих спаев ТЭМ с воздушным теплоотводом не выходит за допустимые пределы. При мощности модуля равной 8 Вт, 12 Вт и 16 Вт температура горячих спаев термоэлементов достаточно быстро стабилизируется и принимает значение 308 К, 313 К и 318 К. При этом, в случае использования для отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ плавящихся рабочих веществ, с точки зрения продолжительности поддержания их стабильной температуры, наиболее предпочтительным является азотнокислый никель, менее значительным - элаидиновая кислота и парафин. Расчеты конструкции устройства с предварительно захолаживаемой радиаторной системой также показывают эффективность отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ на время всей процедуры извлечения ИО из тела человека

Ключевые слова: инородный объект, извлечение, примораживание, термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, радиатор, воздушный отвод теплоты, плавящееся вещество, предварительное захолаживание, конструкция

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, Р.Ш. Казумов. Конструкции термоэлектрических устройств для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3): 16-25. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-16-25

Design of thermoelectric devices for extracting foreign objects from the human body by freezing

O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev, R.Sh. Kazumov

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

Abstract. Objectives. The purpose of the article is to consider the designs of thermoelectric devices (TEC) for extracting foreign objects (IO) from the human body by

freezing with various options for removing heat from the hot junctions of the thermoelectric module (TEM). **Method.** Modifications of thermoelectric devices are described for extracting the IO from the human body by freezing it to a special probe. Their technical design differs in the way of heat removal from the TEM hot junctions, for which air heat removal, melting working substances and preliminary cooling of the radiator are used. The basic relationships for calculating the technical means intended for the removal of heat from the hot junctions of the TEM are presented. **Result.** The graphs of the dependence of the temperature change of the TEM hot junctions in time are obtained for different values of its heat output when using an air heat removal system and the time of complete penetration of various working substances used in the device. **Conclusion.** The data obtained show that for the operating conditions of the TEC, the temperature of the hot junctions of the TEM with an air heat sink does not go beyond the permissible limits. With a module power of 8 W, 12 W and 16 W, the temperature of the hot junctions of thermoelements stabilizes rather quickly and takes the value of 308 K, 313 K and 318 K. maintaining their stable temperature is most preferred is nickel nitrate, less - elaidic acid and paraffin. Calculations of the design of a device with a pre-cooled radiator system also show the efficiency of heat removal from the hot junctions of the TEM for the duration of the entire procedure for removing the IO from the human body.

Keywords: foreign object, extraction, freezing, thermoelectric device, thermoelectric module, radiator, air heat removal, melting substance, preliminary cooling, design

For citation: O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev, R.Sh. Kazumov. Designs of thermoelectric devices for extracting foreign objects from the human body by freezing. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2021; 48 (3): 16-25. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2021-48-3-16-25

Введение. При попадании в организм человека инородных объектов могут быть вызваны существенные дисфункции организма. В частности, болезненные ощущения, дискомфорт, воспаление и заражение близлежащих тканей, вызывающие дальнейшее нагноение и некроз. Поэтому операции по извлечению инородных объектов из тела человека являются важными и ответственными мероприятиями, качество и оперативность проведения которых напрямую влияет на здоровье и жизнь человека. Проведенный литературный обзор [1-4] показал, что в настоящее время извлечение инородных объектов (ИО) из тела человека производится в основном хирургическим методом с использованием различного оборудования, в состав которого входят разнообразные механические приспособления. В случае извлечения ферромагнитных ИО могут быть также применены намагниченные зонды [5].

Методики проведения операций по извлечению посторонних тел также могут быть различными. Они зависят от местоположения ИО объекта, его формы, размеров и состава, и включают в себя такие мероприятия, как отыскание местоположения ИО, приведение его в наиболее удобное для извлечения положение и непосредственно извлечение из тела человека. Анализируя данные методики и технические средства для их реализации, необходимо отметить их недостаточную надежность, связанную, прежде всего, с качеством фиксации постороннего объекта в приспособлении, зависимость от квалификации персонала, проводящего операцию, болезненность и продолжительность процедуры.

Постановка задачи. Представляет интерес разработка новых технических средств для извлечения ИО из тела человека и методик, реализованных на их основе. В этих условиях перспективным является использование методики локального примораживания ИО к специальному зонду с охлажденным наконечником [6, 7]. Надежность фиксации ИО в извлекающем приспособлении в данном случае будет обеспечиваться за счет высокой степени сцепления наконечника зонда и объекта при их примораживании друг к другу. В качестве источника холода в зонде может быть использован компактный ТЭМ,

обладающий высоким ресурсом работы, надежностью, экологичностью, обеспечивающий требуемую мощность для надежной фиксации ИО на извлекающем приспособлении [8-12]. В Дагестанском государственном техническом университете разработан ряд конструктивных вариантов подобных ТЭУ [13, 14]. Целью настоящей статьи является рассмотрение их конструкций.

Методы исследования. Структурная схема первого конструктивного варианта прибора изображена на рис.1, а его внешний вид показан на рис.2. В нем для охлаждения горячих спаев ТЭМ используется система воздушного отвода теплоты. Устройство содержит манипулятор, изготовленный в виде полой трубки 1 из материала с низкой теплопроводностью (например, пластмасс, используемых в медицине), которая в общем случае может быть гибкой. Внутри трубки 1 размещен металлический стержень 2, который с помощью направляющих 3 может перемещаться по длине трубки 1. На торцевой поверхности стержня 2, обращенной к извлекаемому объекту, закреплен ТЭМ 4, на рабочую поверхность которого для лучшего сцепления с извлекаемыми объектами наносится губчатое вещество 5, перед процедурой смачиваемое жидкостью. Стержень 2, выполняющий также функции воздушного теплоотвода (радиатора) с опорной поверхности ТЭМ 4 в радиальном направлении по отношению к трубке 1 может иметь оребрение 6.

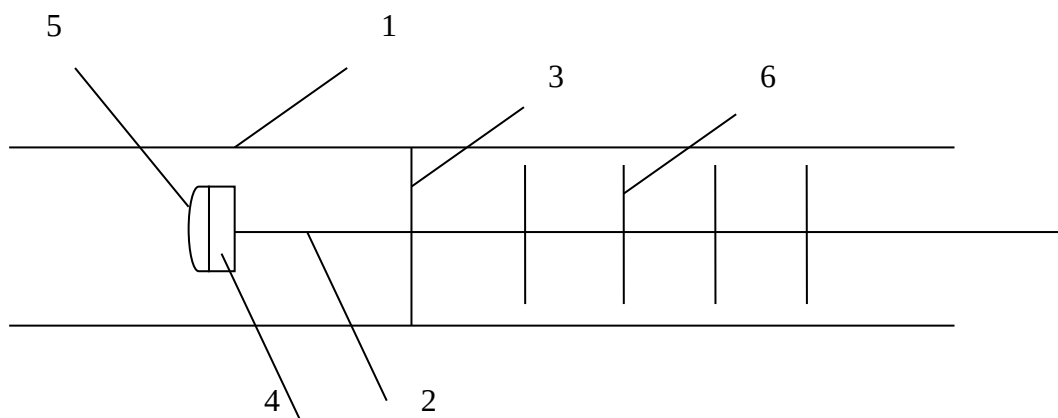


Рис.1. Конструкция термоэлектрического устройства для извлечения инородного объекта из тела человека с естественным воздушным отводом теплоты от горячих спаев термоэлектрического модуля

Fig. 1. The design of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body with natural air removal of heat from hot junctions of a thermoelectric module



Рис.2. Внешний вид термоэлектрического устройства для извлечения инородного объекта из тела человека с естественным воздушным отводом теплоты от горячих спаев термоэлектрического модуля

Fig. 2. External view of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body with natural air removal of heat from hot junctions of a thermoelectric module

Прибор функционирует следующим образом. Перед началом процедуры отдельные части устройства тщательно дезинфицируются. Стержень 2 приводится в положение, при котором рабочая поверхность ТЭМ 4 будет максимально удалена от объекта,

подлежащего к извлечению. Затем прибор вводится в зону поражения в случае ранения человека, либо в естественное отверстие, в случае извлечения инородных тел, например из носа, горла, и т.п., на требуемую глубину так, чтобы стенки трубки 1 располагались на глубине, несколько большей расположения верхней поверхности инородного объекта. Далее, путем перемещения металлического стержня 2 по направляющим 3 рабочая поверхность ТЭМ 4 через губчатое вещество 5 приводится в соприкосновения с извлекаемым объектом. При подаче на ТЭМ 4 тока соответствующей полярности происходит примерзание объекта к его рабочей поверхности. Непосредственно извлечение инородного тела осуществляется путем перемещения металлического стержня 2 в обратном направлении. Оребрение 6 стержня 2 увеличивает эффективность теплосъема с опорных спаев ТЭМ 4.

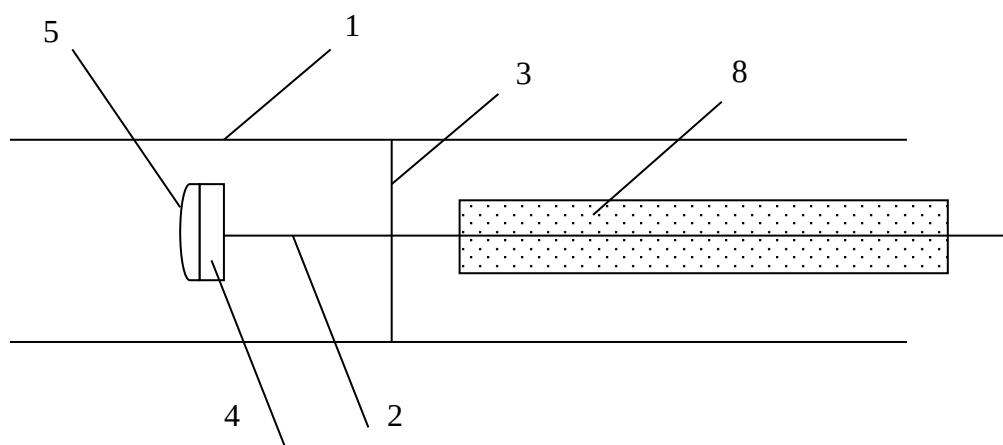


Рис. 3. Конструкция термоэлектрического устройства для извлечения инородного объекта из тела человека с использованием для отвода теплоты от горячих спаев термоэлектрического модуля плавящегося рабочего вещества

Fig. 3. Design of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body using a melting working substance to remove heat from hot junctions of a thermoelectric module



Рис.4. Внешний вид термоэлектрического устройства для извлечения инородного объекта из тела человека с использованием для отвода теплоты от горячих спаев термоэлектрического модуля плавящегося рабочего вещества

Fig. 4. External view of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body using a thermoelectric module of a consumable working substance to remove heat from hot junctions

Повышение комфортности процедур осуществляется за счет снижения до минимума перемещений манипулятора при проведении процедур, риск обморожения - за счет изготовления манипулятора в виде полый трубки из материала с низкой теплопроводностью, теплоизолирующей близлежащие ткани от рабочей поверхности ТЭМ. Конструкция второго варианта ТЭУ представлена на рис.3, его внешний вид на рис.4. Отличительной особенностью данного устройства является использование вместо цельнометаллического стержня 2 с оребрением 6 тонкостенной емкости 8, заполненной веществом, имеющим большую теплоту плавления и температуру плавления, лежащую в пределах 310-335K (например, парафина, азотнокислого никеля, элаидиновой,

пальмитиновой кислоты, воска, кристаллического углекислого и сернокислого натрия и др.).

В данном случае будет обеспечена стабильность температуры горячих спаев ТЭМ в течение всего времени плавления рабочего вещества, а высокая продолжительность поддержания такой температуры будет обеспечиваться большим значением его теплоты плавления. При этом выбор рабочего вещества будет определяться условиями эксплуатации, к которым относятся: требуемый уровень стабилизации температуры горячих спаев ТЭМ, величина температурного перепада, получаемого в модуле, а также температура окружающей среды.

На рис.5-6 представлен третий вариант ТЭУ для извлечения ИО из тела человека, имеющего следующую особенность. В нем стержень 2 выполнен таким образом, чтобы имелась возможность накручивать на него цельнометаллический радиатор 9, предварительно охлаждаемый внешним источником холода, представляющий собой цилиндр с отверстием посередине, соответствующим диаметру стержня, с помощью резьбового соединения.

В данном случае за счет предварительного захлаживания радиатора 9 повышается интенсивность отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ. В этом случае теплота, выделяющаяся на горячих спаях ТЭМ, будет расходоваться на увеличение температуры теплоприемника, являющегося своеобразным аккумулятором тепла.

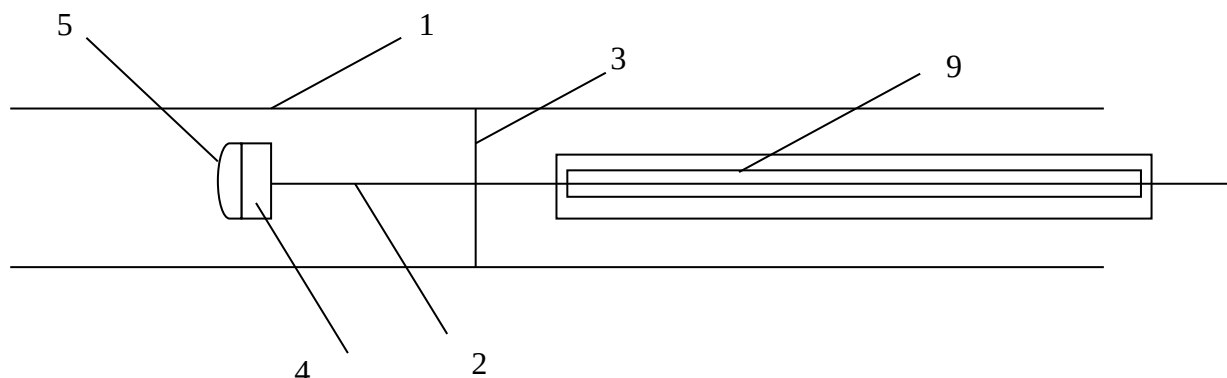


Рис.5. Конструкция термоэлектрического устройства для извлечения инородного объекта из тела человека с использованием для отвода теплоты от горячих спаев термоэлектрического модуля предварительно захлаживаемого радиатора

Fig. 5. The design of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body using a pre-cooled radiator to remove heat from hot junctions of a thermoelectric module



Рис. 6. Внешний вид ТЭУ для извлечения инородного объекта из тела человека с использованием для отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ предварительно захлаживаемого радиатора

Fig. 6. External view of a thermoelectric device for extracting a foreign object from a human body using a pre-cooled radiator to remove heat from hot junctions of a thermoelectric module

Обсуждение результатов. Для оценки возможностей рассмотренных конструкций приборов произведен их расчет. При этом для конструкции, изображенной на рис.1-2, расчетные соотношения взяты из [15] для случая естественного теплообмена с окружающей средой. В случае же обдува теплоотводящего радиатора потоками воздуха основные соотношения, соответствующие в источнике[16].

При пренебрежении паразитными перепадами на теплопереходах модуля величина теплосъема определяется из соотношения:

$$Q_p = \frac{B\alpha_p}{C_1} \left(\ell_p \frac{F_1}{F_3} + \frac{F_2}{F_3} \right) (C_2 T_{г.ТЭМ} - T_{ср}), \quad (1)$$

где Q_p - теплота, отводимая радиатором; F_x - площадь поверхности радиаторных пластин; F_2 - площадь основания между ребрами; $F_3 = F_1 + F_2$ - полная теплообменная площадь радиатора; α_p - средний коэффициент теплоотдачи радиаторной системы; $T_{г.ТЭМ}$ - температура горячих спаев ТЭМ; B - коэффициент оребрения, равный частному от деления полной теплообменной поверхности радиатора на общую площадь основания радиатора; C_1 - коэффициент, характеризующий геометрию мест соединения радиатора с ТЭМ, определяемый как частное от деления суммарной площади горячих спаев термоэлементов на суммарную площадь горячих коммутационных пластин; C_2 - коэффициент, характеризующий тепловое сопротивление между горячими спаями ТЭМ и основанием радиаторной системы, равный частному от деления средней температуры основания ребра на температуру горячих спаев ТЭМ.

Входящая в вышеприведенную формулу величина ℓ_p является средней эффективностью ребер радиатора и определяется как

$$\ell_p = \frac{T_{p,p} - T_{ср}}{T_{o,p} - T_{ср}}, \quad (2)$$

где $T_{p,p}$ - средняя температура ребра радиатора; $T_{o,p}$ - средняя температура основания радиатора.

Средний коэффициент теплоотдачи радиаторной системы может быть определен по формуле

$$\alpha_p = \frac{Q_p}{F_3 (T_{o,p} - T_{ср}) \left(\ell_p \frac{F_1}{F_3} + \frac{F_2}{F_3} \right)}. \quad (3)$$

Как в радиаторных системах с естественно-конвекционным теплосъемом, так и с принудительным обдувом основное сопротивление тепловому потоку от ребра в окружающую среду сосредоточено в тонком пограничном слое воздуха у стенки ребра. С уменьшением толщины этого пограничного слоя увеличивается коэффициент теплоотдачи поверхности ребра. Установлено, что в теплообменных аппаратах, в которых продувается воздух, коэффициент теплообмена сильно зависит от отношения длины теплообменника к его диаметру. С уменьшением величины этого отношения коэффициент теплоотдачи возрастает за счет того, что на внутренней поверхности короткой трубы не успевает образовываться пограничный слой воздуха значительной толщины.

Поэтому, радиаторную систему с принудительным теплосъемом целесообразно выполнять в виде отдельных коротких пластинчатых ребер, расположенных линейно с разрывом друг от друга. Важной величиной, характеризующей радиаторную систему с принудительным обдувом, является гидродинамическое сопротивление трению, которое испытывает поток воздуха, движущийся вдоль пластин радиатора. Для радиаторной системы, состоящей из линейно расположенных ребер с разрывом по длине, величина гидродинамического сопротивления определяется из выражения:

$$\eta = \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{(W_{\gamma})^2}, \quad (4)$$

где $\Delta H_{\text{ст}}$ – перепад статического давления на входе и выходе радиатора; W_{γ} – весовая скорость воздуха, равная

$$W_{\gamma} = \frac{G}{3600f}, \quad (5)$$

где f – суммарная площадь проходного сечения радиатора; G – массовый расход воздуха.

Применяя приведенные выражения, может быть осуществлен конструктивный расчет системы съема теплоты с горячих спаев ТЭМ, используемого в модификации ТЭУ для извлечения ИО из тела человека в полном объеме. На рис.7 изображена зависимость изменения температуры горячих спаев ТЭМ $T_{\text{г.ТЭМ}}$ во времени при различных значениях теплопроизводительности ТЭМ $Q_{\text{г.ТЭМ}}$.

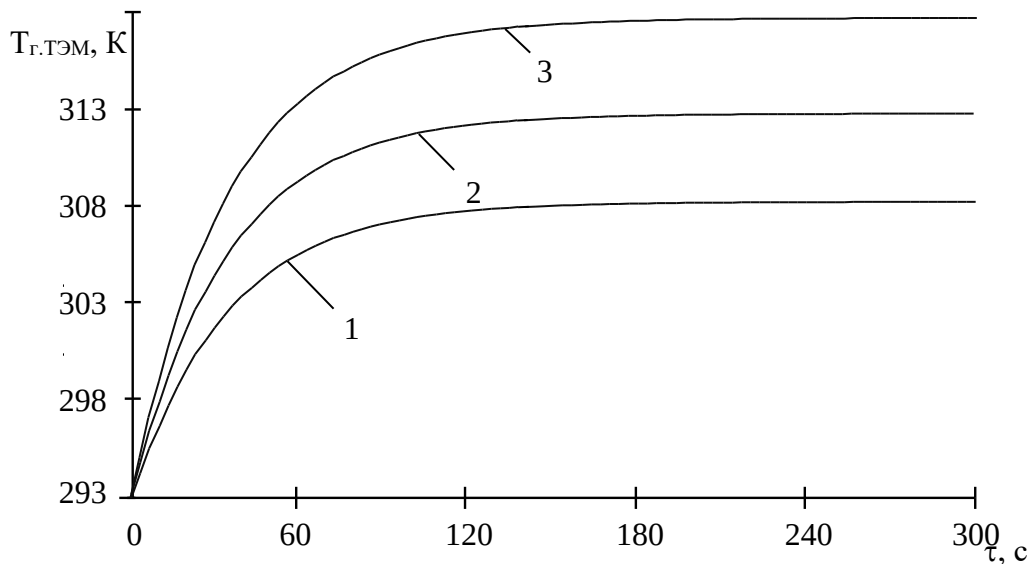


Рис.7. Зависимость изменения температуры горячих спаев ТЭМ во времени при различных значениях $Q_{\text{г.ТЭМ}}$: 1 - $Q_{\text{г.ТЭМ}}=8$ Вт, 2 - $Q_{\text{г.ТЭМ}}=12$ Вт, 3 - $Q_{\text{г.ТЭМ}}=16$ Вт

Fig.7. Time dependence of the temperature change of the hot junctions of TEM at different values of $Q_{\text{г.ТЭМ}}$: 1 - $Q_{\text{г.ТЭМ}} = 8$ W, 2 - $Q_{\text{г.ТЭМ}} = 12$ W, 3 - $Q_{\text{г.ТЭМ}} = 16$ W

Приведенные графики показывают, что для условий эксплуатации ТЭУ температура горячих спаев ТЭМ не выходит за допустимые пределы.

При мощности модуля равной 8Вт, 12Вт и 16Вт температура горячих спаев термоэлементов достаточно быстро стабилизируется и принимает значение 308К, 313К и 318К. Для оценки продолжительности поддержания стабильной температуры горячих спаев ТЭМ для второй модификации устройства может быть использовано соотношение [17]:

$$\tau_{\text{рв}} = \frac{v_{\text{рв}} \rho_{\text{рв}} V_{\text{рв}}}{Q_{\text{г.ТЭМ}}}, \quad (6)$$

где $v_{\text{рв}}$, $\rho_{\text{рв}}$, $V_{\text{рв}}$ – скрытая теплота плавления, плотность и объем плавящегося рабочего вещества.

На рис.8 показаны графики зависимости продолжительности полного проплавления различных типов рабочих веществ от мощности, выделяемой на горячих спаях ТЭМ при $V_{\text{пв}}=4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Согласно представленным данным, с точки зрения продолжительности

поддержания стабильной температуры горячих спаев ТЭМ, наиболее предпочтительным является азотнокислый никель, менее – элаидиновая кислота и парафин.

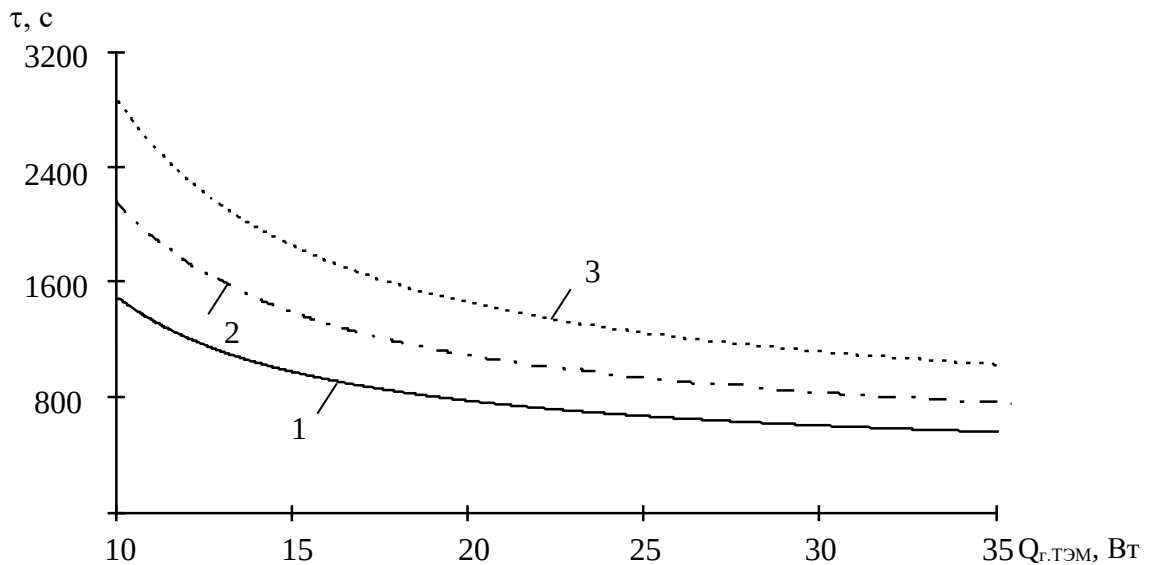


Рис. 8. Зависимость времени полного проплавления различных рабочих веществ от $Q_{г.ТЭМ}$ 1 - парафин, 2 - элаидиновая кислота, 3 - азотнокислый никель

Fig. 8. Dependence of the time of complete penetration of various working substances on $Q_{г.ТЭМ}$ 1 - paraffin, 2 - elaidic acid, 3 - nickel nitrate

Однако температура плавления азотнокислого никеля (329,7K) заметно превышает соответствующее значение температуры элаидиновой кислоты (318K) и парафина (316K).

Поэтому в данных условиях необходима предварительная оценка продолжительности эксплуатации прибора и критичности надежности работы устройства к повышению температуры горячих спаев ТЭМ. И уже после этого может осуществляться подбор типа рабочего вещества и его количества. В первом приближении для количественной оценки основных параметров предварительно захлаживаемой радиаторной системы для третьего конструктивного варианта ТЭУ можно пренебречь теплообменом радиатора с окружающей средой, изменением теплоемкости с температурой и изменением со временем количества тепла, поступающего от ТЭМ к теплоприемнику [18]. В этом случае решение задачи значительно упрощается и для определения массы захлаживаемого радиатора можно с достаточной степенью точности использовать соотношение [19]:

$$m_p = \frac{Q_{г.ТЭМ} \tau}{c_p \Delta T_p}, \quad (7)$$

где m_p – масса радиатора, c_p – теплоемкость радиатора; τ – время, в течение которого должна работать система; ΔT_p – изменение температуры радиатора за время τ .

Здесь следует отметить, что приведенное соотношение справедливо при условии, что $\tau > \tau_0$, где τ_0 – величина, зависящая от геометрических размеров и некоторых физических параметров материала радиатора:

$$\tau_0 = \frac{L_p^2 c_p \rho_p}{\lambda_p}, \quad (8)$$

где λ_p – теплопроводность; ρ_p – плотность; L_p – определяющий линейный размер радиатора.

Расчеты данной конструкции устройства с предварительно захлаживаемой радиаторной системой, как и в предыдущих случаях, показывают эффективность отвода

теплоты от горячих спаев ТЭМ на время всей процедуры извлечения ИО из тела человека [20].

Вывод. В настоящее время разработка технических средств и процедур, связанных с извлечением ИО из тела человека, является актуальной и практически значимой. Рассмотрен метод извлечения ИО из полости организма человека посредством его примораживания к ТЭУ. Описаны модификации устройств, предназначенных для его реализации. Их техническое исполнение отличается способом отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ, для чего применяется воздушный теплоотвод, плавящиеся рабочие вещества и предварительное захлаживание радиатора. Приведены основные соотношения для расчета технических средств, предназначенных для съема теплоты с горячих спаев ТЭМ.

Библиографический список:

1. Блоцкий А.А. Травмы и инородные тела ЛОР-органов / А.А. Блоцкий, С.А. Карпищенко, В.В. Антипенко, Р.А. Блоцкий. - СПб.: Диалог, 2018. - 217 с.
2. Блоцкий, А.А. Неотложные состояния в оториноларингологии / А.А. Блоцкий, С.А. Карпищенко. - СПб.: Диалог, 2016. - 203 с.
3. Юнусов, А.С. Эпидемиология инородных тел полости носа в условиях крупного мегаполиса / А.С. Юнусов, [и др.] // Российская оториноларингология. - 2017. - № 5. - С. 83-87.
4. Kalyanasundaram, R. An unusual foreign body in the nasal cavity / R. Kalyanasundaram [et al.] // International journal of otolaryngology and head & neck surgery. - 2014. - №3. - P. 267-270.
5. Антонова, Е.В. Случай длительного нахождения инородных магнитных тел в желудке / Е.В. Антонова, В.В. Холостова, Р.В. Халафов // Детская хирургия. - 2013. - №2. - С. 52-53.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
7. Евдулов, О.В., Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека / О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев, С.Г. Магомедова, И.Ш. Миспахов, Н.А. Набиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2019. - т.46, №1. - С. 32-41.
8. Евдулов, О.В. Экспериментальное исследование термоэлектрического устройства для внутриполостной гипотермии / О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова, К.А. Магомедова // Холодильная техника. - 2019. - № 4. - С.31-35.
9. Евдулов, О.В. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова, Н.А. Набиев // Медицинская техника. - 2019. - №2. - С. 12-14.
10. Yevdulov, O.V. Device for stopping bleeding by local freezing of the blood flow zone / O.V. Yevdulov, Sh.A. Yusufov, N.A. Nabiev // Refrigeration science and technology: 3rd IIR Conference on cold applications in life sciences - cryotherapy and cryopreservation, proceedings. - 2018. - Vol.3. - pp.68-73.
11. Yevdulov, O.V. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx / O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova // Journal of Thermoelectricity. - 2015. - № 2. -pp. 86-91.
12. Исмаилов, Т.А. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова // Медицинская техника. - 2020. - №1. - С. 40-43.
13. Исмаилов, Т.А. Математическое моделирование и теоретические исследования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Вестник Международной академии холода. - 2021. - №1. - С. 94-101.
14. Исмаилов, Т.А. Математическая модель термоэлектрического устройства для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, А.М. Насрулаев // Медицинская техника. - 2021. - №3. - С. 49-52.
15. Александров, А.А., Теплотехника. / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 880 с.
16. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. - New York: John Wiley & Sons, 2011. - 1076 p.
17. Алексеев, В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов / В.А. Алексеев. - Курск: Научком, 2016. - 248 с.
18. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. - СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. - 195 с.
19. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
20. Жердев, А.А. Исследование характеристик криозондов при различных режимах работы / А.А. Жердев, А.В. Шакуров, А.В. Пушкарев, [и др.] // Медицинская техника. - 2016. - №5. - С. 41-44.

References:

1. Blotsky, A.A. Injuries and foreign bodies of ENT organs / A.A. Blotsky, S.A. Karpishchenko, V.V. Antipenko, R.A. Blotsky. SPb.: Dialogue, 2018; 217.

2. Blotsky, A.A. Emergencies in otorhinolaryngology / A.A. Blotsky, S.A. Karpishchenko. SPb.: *Dialogue*, 2016; 203.
3. Yunusov, A.S. Epidemiology of foreign bodies in the nasal cavity in a large metropolis / A.S. Yunusov, et al. [Rossiyskaya otorinolaringologiya] *Russian otorhinolaryngology*. 2017; 5: 83-87.
4. Kalyanasundaram, R. An unusual foreign body in the nasal cavity / R. Kalyanasundaram [et al.] // *International journal of otolaryngology and head & neck surgery*. 2014; 3: 267-270.
5. Antonova, E.V. A case of long-term presence of foreign magnetic bodies in the stomach / E.V. Antonova, V.V. Kholostova, R.V. Khalafov [Detskaya khirurgiya] *Pediatric surgery*. 2013; 2: 52-53.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015; 441.
7. Evdulov, O.V. Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body / O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev, S.G. Magomedova, I. Sh. Mispakhov, N.A. Nabiev. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(1): 32-41.
8. Evdulov, O. V. Experimental study of a thermoelectric device for intracavitary hypothermia / O.V. Evdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedov, K.A. Magomedova. [kholodil'naya tekhnika] *Refrigeration equipment*. 2019; 4: 31-35.
9. Evdulov, O.V. Thermoelectric device for stopping bleeding / T.A. Ismailov, O. V. Evdulov, T.A. Ragimova, N.A. Nabiev. *Medical technology*. 2019; 2:12-14.
10. Yevdulov, O.V. Device for stopping bleeding by local freezing of the blood flow zone / O.V. Yevdulov, Sh.A. Yusufov, N.A. Nabiev. *Refrigeration science and technology: 3rd IIR Conference on cold applications in life sciences - cryotherapy and cryopreservation, proceedings*. 2018; 3:68-73.
11. Yevdulov, O.V. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx / O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-91.
12. Ismailov, T.A. Model of thermoelectric device for thermal impact on reflexogenic zones / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedova. *Medical technology*. 2020; 1: 40-43.
13. Ismailov, T.A. Mathematical modeling and theoretical studies of the thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body by freezing method. Ismailov, O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev. [Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda] *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2021;1: 94-101.
14. Ismailov, T.A. Mathematical model of a thermoelectric device for extracting foreign objects from the human body by freezing method / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, A.M. Nasrulaev. *Medical technology*. 2021; 3: 49-52.
15. Alexandrov, A.A., Heat engineering. / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [and others]. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2017; 880.
16. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011; 1076.
17. Alekseev V.A. Fundamentals of designing heat accumulators for space vehicles / V.A. Alekseev. Kursk: Naukom, 2016; 248 p.
18. Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer / G.N. Dulnev. SPb.: SPbNIUITMO. 2012; 195.
19. Theory of heat and mass transfer / Under. ed. A.I. Leontyev. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2018. 464 p.
20. Zherdev A.A. Investigation of the characteristics of cryoprobes at different operating modes / A.A. Zherdev, A.V. Shakurov, A.V. Pushkarev, [and others] *Medical technology*. 2016; 5: 41-44.

Сведения об авторах:

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

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

Казумов Ревшан Шихович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: kazumov.rev@yandex.ru.

Information about the authors:

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

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

Revshan Sh. Kazumov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: kazumov.rev@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.08.2021.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.08.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 01.09.2021.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Оригинальная статья / Original Paper

**Моделирование динамики смерчевых структур в трубе с турбулизаторами
квадратных, полукруглых и треугольных профилей**

И.Е. Лобанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование изменения по времени смерчевых композиций в каналах с выступами полукруглых, треугольных, квадратных профилей для средних критериев Рейнольдса на базе многоблочной вычислительной технологии с решением конечно-объёмными факторизованными способами уравнения Рейнольдса и уравнений энергий. **Метод.** Расчёты проводились на основе теоретических подходов, основанных на решении конечно-объёмными факторизованными способами уравнений Рейнольдса, которые замыкались при помощи моделирования ментеровских напряжений и энергии структурированной сетке. **Результат.** Расчёты параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, показали, что превышающая диссипации выработки турбулентностей для выступов острых профилей - квадратный профиль, треугольный профиль - и скруглённых профилей - полукруглый профиль, сегментный профиль - обеспечивается с кардинально различными гидравлическими потерями: у каналов с выступами скруглённых профилей. Например, у полукруглых, коэффициенты гидравлических сопротивлений гораздо меньше, чем у каналов с выступами с острыми профилями, у треугольных или у квадратных, прямоугольных. **Вывод.** Произведено моделирование смерчевых композиций, зависящих от времени, в каналах с трансверсальными профилями в виде квадрата, треугольника и полукруга, что максимально информативно в плане изучения турбулизированных течений и теплообмена, возникающих при средних критериях Рейнольдса на базе компьютерной многоблочной технологии при использовании решения конечно-объёмными факторизованными способами (ФКОМ-ами) рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений. Рассмотрению были подвергнуты выступы: квадратных трансверсальных профилей, в которых смерчеобразования наиболее проявлены, а побочные смерчи воздействуют на поток максимальным образом; треугольных трансверсальных профилей, где смерчеобразования проявляются не так сильно, а побочные смерчи влияют на основной поток слабее, чем при квадратных выступах; полукруглых трансверсальных профилей, в которых набегающий главный смерч перемещается по потоку с генерированием ограниченных побочных смерчей. Полученная расчётная информация в высокой степени коррелирует с имеющимися опытными данными, что указывает на верификацию задействованного моделирования.

Ключевые слова: теплообмен, течение, турбулизатор, поперечное сечение, моделирование, динамика, нестационарный, смерч, полукруглый, треугольный, прямоугольный, квадратный

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование динамики смерчевых структур в трубе с турбулизаторами квадратных, полукруглых и треугольных профилей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3): 26-38. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Modeling of the dynamics of tornado structures in a pipe with turbulators of square, semicircular and triangular profiles

Igor E.Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe highway, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia

Resume. Objectives. To carry out mathematical simulations of changes in time of tornado compositions in channels with projections of semicircular, triangular, square profiles for average Reynolds criteria based on multiblock computing technology with the solution of finite-volume factorized methods of the Reynolds equation and energy equations. **Method.** The calculations were carried out on the basis of theoretical approaches based on the solution of Reynolds equations by finite-volume factorized methods, which were closed using the simulation of Menter stresses, and the energy of a structured grid. **Result.** The calculations of time-dependent flow and heat transfer parameters carried out in the article showed that the excess dissipation of turbulence generation for projections of sharp profiles - square profile, triangular profile - and rounded profiles - semicircular profile, segment profile - is provided with radically different hydraulic losses: channels with protrusions of rounded profiles, for example, semicircular, have much lower hydraulic resistance coefficients than channels with protrusions with sharp profiles, for example, triangular or square, rectangular. **Conclusion.** In the article, mathematical simulations of time-dependent tornado compositions were performed in channels with transversal profiles in the form of a square, triangle and semicircle, which is as informative as possible in terms of studying turbulent flows and heat transfer arising under average Reynolds criteria based on computer multiblock technology when using solutions of finite-volume factorized methods (FCOM-am) Reynolds equations and energy equations. The following protrusions were considered in the article: square transversal profiles, in which tornadoes are most pronounced, and side tornadoes affect the flow in the maximum way; triangular transversal profiles, where tornadoes are not so strong, and side tornadoes affect the main flow weaker than with square protrusions; semicircular transversal profiles, in which the incoming main tornado moves along the stream with the generation of limited side tornadoes. The calculated information obtained in the article correlates to a high degree with the available experimental data, which indicates the verification of the mathematical modeling involved in the article.

Keywords: heat transfer, flow, turbulator, cross-section, modeling, dynamics, unsteady, tornado, semicircular, triangular, rectangular, square

For citation: I.E. Lobanov. Modeling of the dynamics of tornado structures in a pipe with turbulators of square, semicircular and triangular profiles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 26-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Введение. Общеизвестным и довольно надёжным в практическом отношении методом смерчевого интенсифицирования теплоотдачи представляет собой способ нанесения повторяющихся турбулизаторов на стенках омываемой поверхности [1, 5] (рис.1). Изучение структур интенсифицированных потоков, как правило, проводилось опытными способами [2, 5, 6]. Однако, теоретические исследования на современном этапе в данном направлении достаточно ограничены [1-4] и только частичным образом посвящались напрямую структурам интенсифицированных течений. В ряде способов, в том числе, в исследованиях [4, 7-9], были применены не более чем среднеинтегральные способы подхода к рассматриваемой задаче. На современном этапе интенсивным образом получили развитие методы на базе многоблочных вычислительных технологий при решении задачи смерчевой гидроаэромеханики и теплообмена, которые основываются на структурированной пересекающейся сетке.

Постановка задачи. Настоящая статья направлена на исследование нестационарной

теплоотдачи для средних критериев Рейнольдса в трубе, которая интенсифицируется посредством поверхностных периодических турбулизаторов с полукруглыми, прямоугольными, треугольными поперечными сечениями, где смерчеобразования могут проявляться в максимальном или минимальном отношении.

Методы исследования. Моделирование при изучении местных и интегральных характеристик потоков и теплоотдачи, зависящих от времени, в каналах с выступами является многообещающим для разработки специализированного распараллеленного вычислительного пакета на базе многоблочной технологии, целенаправленного какого-либо охарактеризуем нижеследующим способом.

Процесс развития специфической многоблочной вычислительной технологии [1-4], основанной на пересекающейся многомасштабной структурированной сетке, для высокoeffективных и уточнённых решений для нестационарной 2-мерной и 3-х-мерной задачи конвекционного теплопереноса в прямой круглой трубе с систематическими шероховатостями в форме выступа в однородных рабочих средах в довольно широких диапазонах критериев Рейнольдса (от $Re=10000$ до $Re=1000000$) и критериев Прандтля (от $Pr=7/10$ до $Pr=12$).

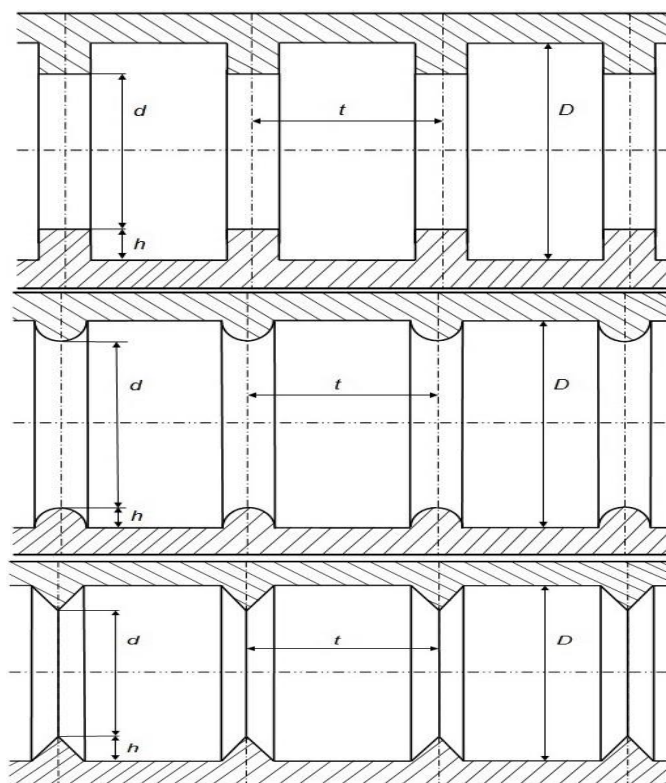


Рис. 1. Разрезы прямых круглых труб с поперечно установленными поверхностными выступами потоков квадратных, полукруглых и треугольных профилей

Fig. 1. Sections of straight round pipes with transversely installed surface protrusions of flows of square, semicircular and triangular profiles

Отличительная особенность данного варианта расчёта заключена в том, что методика расширяется применением циклических граничных условий, которые позволили прогнозировать асимптотичность характеристик каналов с дискретными шероховатостями. Данный вариант расчёта позволяет увеличить вычислительную результативность при моделировании и осуществлять корректирование линии токов по кривизне. Для канала с выступами с различными профильными сечениями при вычислениях рассчитываются: размещения местных и осреднённых температурных параметров и параметров течения на поверхности (гидравлические потери, давление,

тепловой поток, сопротивление движения, трение), профили скоростной составляющей, профили давлений, профили температур, атрибуты турбулентностей (генерация турбулентности, турбулентная энергия, диссипация, вязкость турбулентности, тензор напряжения Рейнольдса, и т.д.).

Основополагающие системы дифференциальных уравнений в частных производных (уравнение Рейнольдса, уравнение Навье–Стокса) замыкаются посредством модифицирования при учёте искривления линии токов в соответствии с ментеровской моделью и моделью переносов напряжения сдвига.

Основополагающую информацию по управляющим системам уравнений, соответствующим граничным условиям можно почерпнуть в [13]. Применяются специфические процедурные корректирования среднеобъёмных температур и давлений для периодических граничных условий.

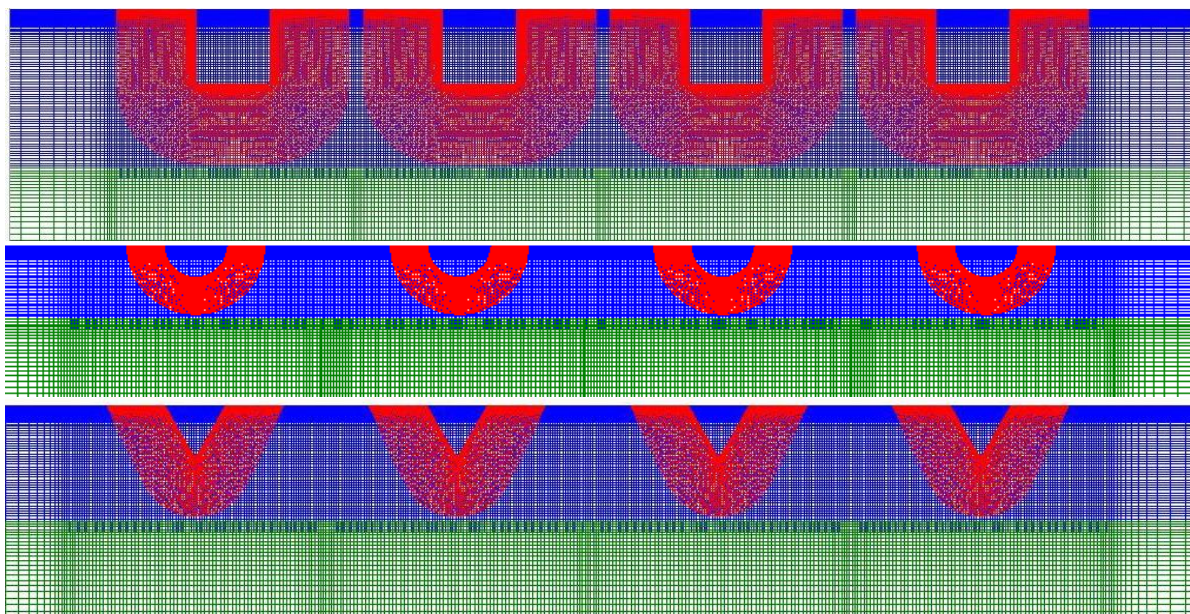


Рис. 2. Сетки каналов, состоящие из некоторого количества секций с центральным выступом, входных и выходных гладких областей; для периодических задач используют единственную секцию

Fig. 2. Grids of channels, consisting of a number of sections with a central protrusion, inlet and outlet smooth regions; for periodic tasks use a single section

Методика решений системы основных уравнений концептуально заключается в расщеплении на физические процессы для процедуры корректирования давлений. При периодических задачах для граничных условий используются процедурные корректирования среднемассовых температур и градиентов давлений. Методологические основы вычислительных расчётных инструментариев базируются на вычислительных многоблочных технологиях с применением разномасштабной пересекающейся структурированной сетке, что позволяет уловить специфические структурные элементы смерчевых потоков и температурных полей с обеспечением необходимых эффективности и точности, не уступающих адаптивным сеткам.

Специфические качества, которые характерны периодическим граничным условиям, следует рассмотреть более подробно, поскольку они конкретно используются при расчётах в данной статье. Периодичность у граничных условий приводит к рационализации в конструировании сеток труб (рис. 2). Канал фрагментируется (рис. 2) на определённое секционное число при расположении в их центрах выступами, выходного гладкого участка, входного гладкого участка.

Периодическая постановка задачи предусматривает единственную секцию; в других

случаях применялось разнообразное их количество: в исследованиях [1-4, 7-12] секционное количество достигало двенадцати. Верифицирование расчётов подразумевало такое же их число.

В целях снижения количества узловых элементов расчёта в канале фиксируются подробнейшие пристеночные интервалы (синие сетки), и осевые сетки фиксируются разрежённые (зеленые сетки), поэтому уровни детализаций видоизменяются в продольном направлении. Если решается 3-х-мерная объёмная задача, то уровни детализаций будут видоизменяться также в окружном направлении. В дополнении к этому, в трёхмерных случаях в приосевых пространствах вводятся спецсетки, нивелирующие паразитное сеточное близосевое сгущение. Вышесказанное для остальных эквивалентных условий снижает требуемое количество ячеек расчёта около полутора раз, что ещё более важно при вычислении параметров течений и теплоотдачи в трёхмерной постановке. Есть возможность дополнительного сокращения количества ячеек при применении продольных осевых условий периодичности и устранения входных и выходных участков.

В гидродинамическом отношении постановка периодической задачи является задачей при сохранности наперёд назначенных массовых расходов теплоносителя, которые рассчитываются при единичных входных скоростях. В контексте расчёта теплоотдачи задача может решаться в двух вариантах в соответствии с избранными температурными граничными условиями.

Первый вариант: при стенках с постоянными температурами решение проблемы производится на основе неизменности во входных сечениях среднеобъёмных температур. Второй вариант: при известных градиентах среднеобъёмных температур, вычисляемых по значению теплового потока на стенках. Очевидно, что входные температуры в данных случаях не регистрируются. В дополнении периодических полных регистраций текущих состояний вычисляемых параметров в программах предусмотрены средства вычисления при заданных интервалах выбранных фиксаций при накоплении в файлах, что представляет интерес при вычислении параметров течения и теплоотдачи, зависящих от времени.

Главный интерес следует сделать на детерминирование местных и осреднённых параметров конвективной теплоотдачи, переменных по времени; конкретнее: гидравлических потерь, составляющих скоростей, среднего по выделенным поверхностям стенок труб теплообмену, вычисление турбулентных параметров составляющих уравнений турбулентных пульсационных энергий (конвективных переносов, диффузионных переносов, генераций, диссипаций). При внешнем натекании на прямоугольные турбулизаторы похожий метод ранее применялся в статье [14].

Часть главной цели настоящей статьи заключается в верифицировании применённой расчётной методики для параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, в каналах с выступами при средних критериях Рейнольдса, которые изучались при аналогичных опытах [5, 6]. Вслед за вышеупомянутым верифицированием появляется возможность проведения расчётов параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, у преимущественно типовых вариантов интенсифицированной теплоотдачи в каналах с выступами полукруглых, треугольных, квадратных трансверсальных профилей с проведением аналитического исследования проведённого расчётного материала при раскрытии специфики потока и теплоотдачи в связи с разным типом трансверсального профиля.

Численные данные, приведённые в работе [15], детерминировали местные и осреднённые параметры потоков и теплоотдачи в круглой прямой трубе с выступами квадратных и полукруглых трансверсальных профилей.

Анализирование смерчевых композиций в канале с выступами квадратных профилей показывает, что при относительно больших выступах и с больших критериях Рейнольдса небольшие увеличения относительных критериев Нуссельта происходят при больших

увеличениях относительных гидросопротивлений вследствие существенного воздействия реверсивных потоков, причём может иметь место натекание обратных течений на верхнюю площадку выступа [1-4, 7-10, 15].

У выступов с полукруглым трансверсальным профилем воздействие реверсивных смерчей на весь поток гораздо слабее, чем у выступов с квадратным трансверсальным профилем, поскольку реализуется сильная деформация главного смерча без его разрушения.

Гидравлические сопротивления в каналах с выступами полукруглых трансверсальных профилей существенно ниже, для других эквивалентных параметрах, чем в каналах с выступами квадратных трансверсальных профилей, поэтому они в этом плане более оптимальны.

В дальнейшем, основываясь на вышеприведённом обобщённом анализе, можно переходить к конкретным вычислениям и частным анализам полученной численной информации относительно параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, в том числе, относительно изменяющихся по времени смерчевых композиций в каналах с выступами с треугольными, квадратными, полукруглыми трансверсальными профилями.

Обсуждение результатов. Анализ экспериментальных исследований, проведённый в работах [5, 6, 16], указывает на то, что смерчевые структуры в канале с выступами могут существовать как нестационарные при определённых диапазонах потока.

Теоретическое исследование теплоотдачи в трубе при наличии турбулизаторов, выполненное в научных трудах [1-4, 7-12, 15], было проведено в целях расчётов местных и осреднённых параметров течений и теплоотдачи при условиях установившихся стационарных потоков. Там же расчётные данные верифицировались имеющимся экспериментальным материалом, что обосновывает применение этого расчётного метода для детерминирования характеристик нестационарного потока и теплоотдачи в каналах с выступами.

Вычисление параметров потоков и теплоотдачи, изменяющихся по времени, в каналах с выступами даёт возможность обнаружения тех аспектов у течений, отличающихся от стационарных случаев течений, которые могут в некотором роде выступать в роли математических ожиданий потоков.

Интегрально в статье ставилась исследовательская цель: продемонстрировать, как генерируется, развиваются, движутся, распадаются по времени композиции смерчеобразований в каналах с выступами с различными трансверсальными профилями, а именно: квадратных, полукруглых, треугольных.

Имеющаяся в наличии опытная информация [5, 6] указывает на то, что смерчевые структуры могут иметь нестационарную структуру, к примеру, при условиях течений водяного теплоносителя в прямоугольных каналах с выступами с критериями Рейнольдса $Re=170000$.

Дадим характеристику нестационарным смерчевым композициям для вышеприведённых условий с $t/h=7,0$ (рис. 3). В окрестностях точки A и точки B генерируется пара смерчей, быстрорастущих и в сильной степени в отношении собственных размеров.

Смерчи в окрестности точки A возрастают ещё более быстро смерчей в районах точки B . Как только смерчи в окрестности точки A достигнут в величинах, соизмеримых с двумя высотами турбулизаторов, смерчи в окрестности точки B достигнут величин, соизмеримых с высотой турбулизаторов.

В последующем генерируются ещё более слабые смерчи в окрестностях точки C , а смерчи в окрестности точки A перемещаются к последующим турбулизатором; затем эти смерчи интегрируются со смерчами в окрестности точки B .

Впоследствии объединённые смерчи перекатываются поверх выступа, а затем имеет место их дезинтеграция. В эти же самые моменты времени смерч в окрестности

точки C возрастает до величин высот турбулизаторов и тоже диссоциируется. После этого вышеупомянутые явления воспроизводятся вслед за генерацией обновлённых смерчей в окрестностях точки A и точки B .

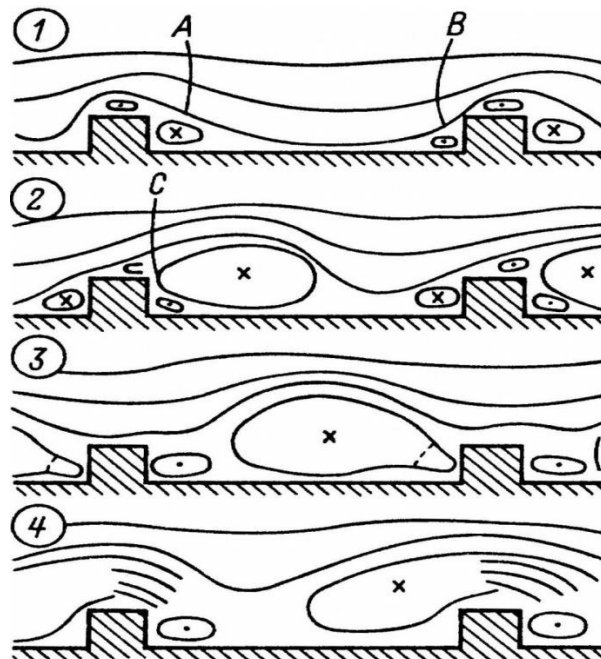


Рис. 3. Схематичное визуализирование опытных данных [5, 6] динамики формирования смерчевых композиций для течения водяного теплоносителя в прямоугольных каналах с выступами в виде квадрата на различных временных моментах (1-4)

Fig. 3. Schematic visualization of experimental data [5, 6] of the dynamics of the formation of tornado compositions for the flow of a water coolant in rectangular channels with square-shaped protrusions at different time points (1-4)

Здесь для описания нестационарного характера при развитии смерчевых композиций следует принять во внимание, что выработки турбулентностей имеют место именно на границе вихревой зоны, как в процессе их формирования, так и в процессе распада этой смерчевой зоны вслед за её выбросом.

В контексте настоящей статьи были осуществлены теоретические математические моделирования зависящих от времени течений и теплоотдачи в каналах при наличии выступов с умеренными критериями Рейнольдса, основанные на использовании вычислительной многоблочной технологии, основанной на решениях конечно-объёмными факторизованными методами (ФКОМами) рейнольдсового уравнения, замыкаемого при помощи ментеровских переносных моделей сдвигового напряжения и энергетических уравнений с разномасштабными пересекающимися структурированными сетками, что уже в [1-4, 7-12, 15] успешным образом выполнялось при расчёте сопоставимых стационарных расчётных условий.

Подробно подвергнутые анализу в [16] результаты опытных данных позволяют сделать вывод, что интенсивные пульсации и торможения у стенок порождают распад ядер к крупномасштабным переворотам, создающих несколько выбросов на внешних краях и биения о стенки (рис. 4).

В данном случае имеет место преобладание переворотов, шириной, которая составляет половину толщин пограничных слоёв, а её длина соответствует толщинам пограничных слоёв. На протяжении процессов биений смерч разлагается на несколько присоединившихся смерчей, которые чередуются на определённых интервалах.

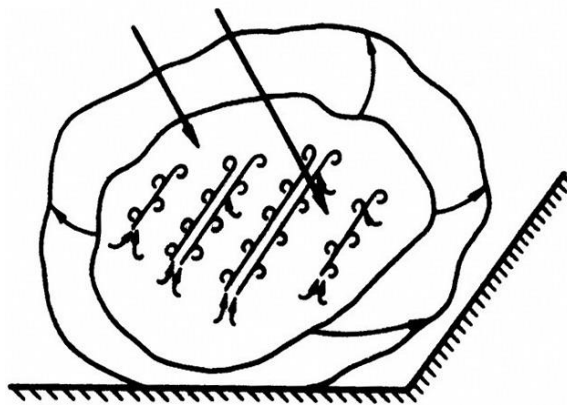


Рис. 4. Схематичное визуализирование зарождения обоснованно перемежающихся возвратных потоков при ударе смерчей («комков») о наклонные уступы

Fig. 4. Schematic visualization of the origin of reasonably intermittent return flows when tornadoes ("lumps") strike on inclined ledges

Вязкие (ламинарные) подслои самопроизвольно распадаются на смерчевые потоки. Для сравнительно небольших критериев Рейнольдса возникают каскады смерчей типа гёртлеровских вихревых систем [16].

Вычисленный расчётный результат для нестационарных течений воздушного теплоносителя в круглой трубе с выступами полукруглых, квадратных, треугольных трансверсальных профилей для периодичной постановки приводится на рис.5 при условиях $Re=170000$; $t/h=7,0$, что эквивалентно $t/D=7/20$; $d/D=9/10$.

Фрагментарным образом линии токов (0—20) представляются на рис.5 для выступов с различными трансверсальными профилями при одинаковых значениях безразмерных времён. На рис.5 очень хорошо заметна вычисленная динамическая картина движения неустановившихся смерчевых композиций в трубах при турбулизаторах с разными трансверсальными профилями.

Фрагментарно генерация нестационарных смерчей за выступом квадратного поперечного профиля их разрастания с позднейшим максимальным увеличением с продвижениями в направлении последующих выступов отчётливо видна на рис.5.

После этого вышеупомянутый смерч поджимается при набегательном движении на последующие квадратные выступы, а ещё, после этого, осуществляются обтекания вышесказанных квадратных выступов. Впоследствии времени данное явление циклически воссоздаётся. Помимо больших смерчей генерируются и смерчи, как поверх турбулизаторов, так и перед турбулизаторами; с этими смерчами объединяются большие смерчи.

У выступов треугольных трансверсальных профилей деформация крупных набегающих смерчей имеет место даже и без генерирования второстепенных смерчей поверх выступов, каковые имеют место у выступов квадратных трансверсальных профилей, но из-за того, что смерчи как бы «разрубаются» рёбрами треугольников надвое и треугольный выступ обтекается со значительным забросом главных смерчей в ядра течений (рис.5).

Смерчи вторичного характера при турбулизаторах треугольного трансверсального профиля генерируются непосредственно на поверхностной грани у треугольников. Размеры вихреобразований вторичного характера, как видно на рис.5, для выступов квадратного поперечного профиля определённее больше, чем для выступов треугольного поперечного профиля. В исследованиях [17-19] отмечается, что для средних критериев Рейнольдса, т.е. Re находятся в области 10000, забрасывание главного смерча в ядра потоков с турбулизаторами в виде треугольников сильнее, чем с турбулизаторами в виде квадратов.

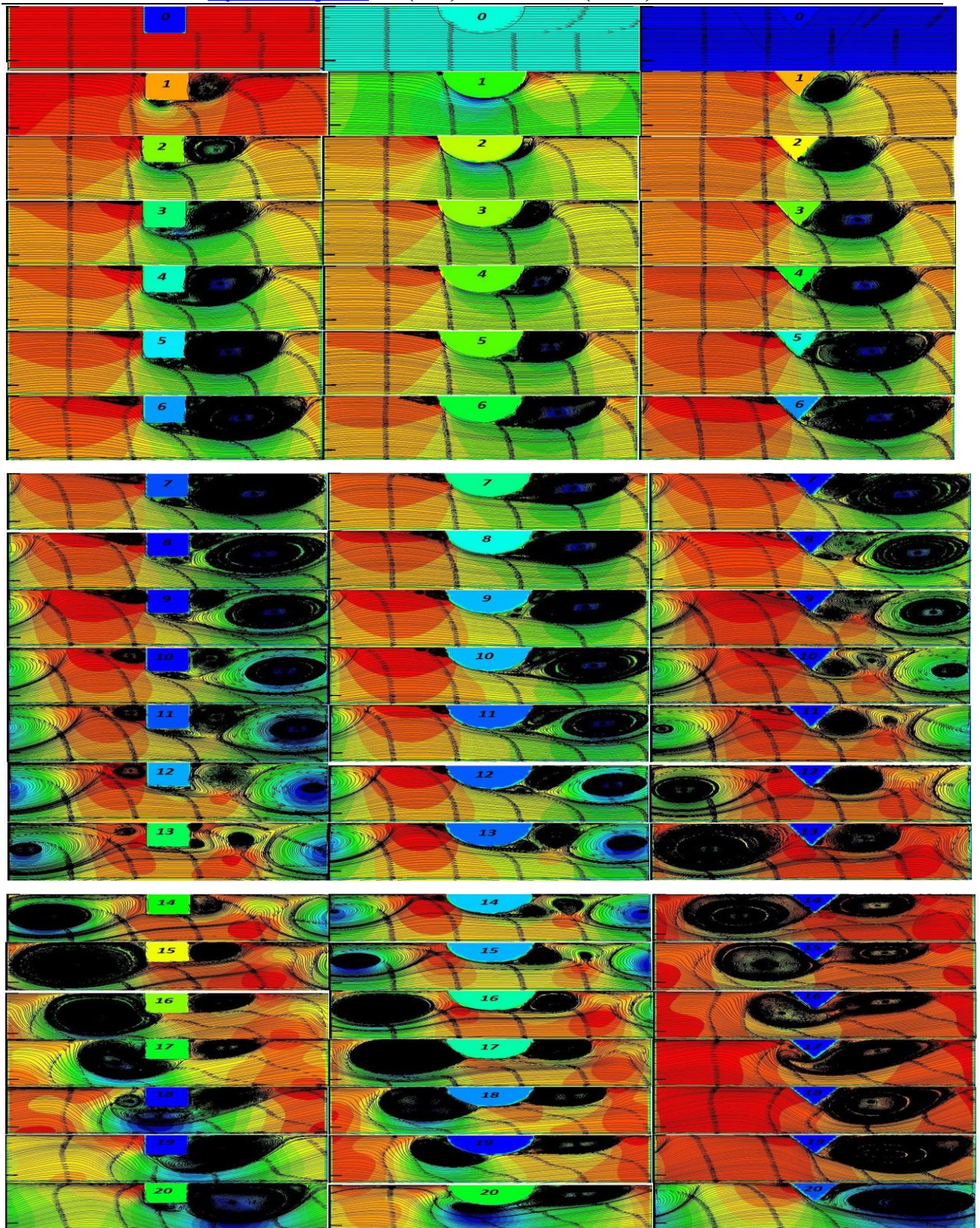


Рис. 5. Расчётная картина визуализирования динамики смерчевых композиций для нестационарного течения воздушного теплоносителя в трубе с выступами квадратных, полукруглых, треугольных трансверсальных профилей для $d/D = 9/10$; $t/h = 7$ или $t/D = 7/20$, $Re = 170000$ для синхронных временных моментов

Fig. 5. Calculated picture of visualizing the dynamics of tornado compositions for an unsteady flow of an air coolant in a pipe with protrusions of square, semicircular, triangular transverse profiles for $d/D = 9/10$; $t/h = 7$ or $t/D = 7/20$, $Re = 170,000$ for synchronous times

Для увеличенных критериев Рейнольдса, т.е. Re находятся в области 100000, для турбулизатора в виде квадрата забрасывание главного смерча в ядра потоков оказывается большим, чем у турбулизатора в виде треугольника непосредственно за счёт зарождения вторичных смерчей над турбулизаторами в виде квадратов.

Последний вывод обосновывает увеличение уровня гидравлических сопротивлений в каналах с турбулизатором в виде квадрата.

У выступов полукруглых трансверсальных профильных сечений деформация больших набегающих смерчей осуществляется с определённо меньшим уровнем, чем у других профилей. Забрасывание главных смерчей в ядра потоков тоже ощутимо слабее в сравнении выступами квадратных и треугольных трансверсальных профилей (рис.5). Второстепенные смерчи у выступов полукруглого поперечного профиля возникают с определённо меньшими размерами, чем у выступов с квадратными и треугольными поперечными профилями; они генерируются на кривой линии полуокружности (рис.5) полукруглого турбулизатора.

Вышеуказанное позволяет сделать вывод о снижении уровня гидравлических сопротивлений в каналах с турбулизаторами с полукруглыми поперечными профилями относительно каналов с треугольными и квадратными поперечными профилями при других эквивалентных параметрах.

Смерчеобразования нестационарного характера очень хорошо коррелируют с соответствующими расчётами стационарного характера, которые были проделаны до настоящего времени для выступов полукруглых, треугольных, квадратных трансверсальных профилей в исследованиях [1-4, 7-12, 15], что видно на рис.5. В этом отношении следует резюмировать, что расчётные композиции смерчей при стационарных постановках в каналах с выступами вышеупомянутых трансверсальных профилей являются своеобразными математическими ожиданиями вычисленных смерчевых композиций при нестационарных постановках.

Представленная на рис.5 расчётная теоретическая информация в значительной степени сочетается с вышепредставленной опытной информацией (рис.3, 4) [5, 6], что подтверждает использованную теорию математического моделирования и обосновывает необходимость её применения для решения сходных задач интенсифицированной теплоотдачи. Определённые незначительные различия объясняются исследованием в теоретическом расчёте гораздо широкого и общего случая при течении теплоносителя, чем это было сделано в опытном исследовании [5, 6].

Композиции изменяющихся во времени смерчей в каналах с выступами в форме квадрата или прямоугольника представляются максимально достойными внимания с точки зрения математических моделирований, ввиду того, что в процессе обтекания выступов с достаточно плавным очертанием [5, 6], как до выступов, так и после выступов двумерные смерчи могут и не генерироваться.

Представленная расчётная информация по параметрам потока и теплоотдаче, переменных по времени, для каналов с выступами, позволяет сделать следующий вывод: сформированные смерчевые композиции, к примеру, зоны отрывов, представляют собой энергоэффективное средство для вынужденного турбулирования течений.

Вырабатывание турбулентностей, которое в значительной степени превосходило бы её диссипацию, реализуется, как правило, на удалённых границах смерчевых композиций, на которых градиенты скоростей и напряжения турбулентности максимизированы; последние явления могут происходить одновременным образом.

В генерируемых до выступов и за выступами с острыми кромками (например, прямоугольных, в частности, квадратных, треугольных) сильных смерчах диссипирование турбулентных энергий соразмерно или даже выше выработок турбулентностей, за исключением случаев верхних границ, что детерминирует увеличение гидросопротивления в канале. Следовательно, возникает необходимость перехода, если

это возможно, к выступам округлённых очертаний, например: полукруглого или сегментного поперечного профиля, на которых или не порождаются двумерные отрывные зоны, или имеет место сочетание трёхмерных смерчевых композиций с достаточно малыми зонами отрыва в пространстве промеж выступов. На высотах верхних границ выступов реализуются максимальные значения выработок турбулентностей за выступами сглаженных очертаний.

Вышепредставленное позволяет резюмировать, что превышающая диссипации выработки турбулентностей для выступов острых профилей - квадратный профиль, треугольный профиль - и скруглённых профилей - полукруглый профиль, сегментный профиль - обеспечивается с кардинально различными гидравлическими потерями.

У каналов с выступами скруглённых профилей, например у полукруглых, коэффициенты гидравлических сопротивлений гораздо меньше, чем у каналов с выступами с острыми профилями, например, у треугольных или у квадратных, прямоугольных.

Выступы скруглённых очертаний характеризуются меньшими гидропотерями по той причине, что в них вырабатывается организованная структура, интенсифицирующая теплоотдачу, с 3-х-мерными смерчами, которые ориентированы аксиально потоку, которая располагается близко к стенке канала.

Вычисленная на базе низкорейнольдсовой методики информация относительно нестационарных интенсифицированных характеристик потоков и теплоотдачи в каналах с выступами треугольных, полукруглых, квадратных трансверсальных профилей полностью согласуется [5, 6] с физическому представлению протекающего в канале явления теплообмена.

Проделанное в настоящей научной статье результативное моделирование потока и теплоотдачи, переменных во времени, в каналах с выступами разнообразных трансверсальных профилей на основании низкорейнольдсовых ментеровских моделей обосновывает их использование в будущем для аналогичных моделирований в широких диапазонах режима течений теплоносителей, а также размерных параметров труб с выступами.

Вывод. Произведено моделирование смерчевых композиций, зависящих от времени, в каналах с трансверсальными профилями в виде квадрата, треугольника и полукруга, что максимально информативно в плане изучения турбулизованных течений и теплообмена, возникающих при средних критериях Рейнольдса на базе компьютерной многоблочной технологии при использовании решения конечно-объёмными факторизованными способами (ФКОМ-ами) рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений.

Рассмотрению были подвергнуты выступы: квадратных трансверсальных профилей, в которых смерчеобразования наиболее проявлены, а побочные смерчи воздействуют на поток максимальным образом; треугольных трансверсальных профилей, где смерчеобразования проявляются не так сильно, а побочные смерчи влияют на основной поток слабее, чем при квадратных выступах; полукруглых трансверсальных профилей, в которых набегающий главный смерч перемещается по потоку с генерированием ограниченных побочных смерчей.

Полученная в статье расчётная информация в высокой степени коррелирует с имеющимися опытными данными, что указывает на верификацию задействованного в статье математического моделирования.

Библиографический список:

1. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. — М.:

МЭИ, 2003. — Т.1. — С. 57—60.

2. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — 2004. — Т. 11. — № 2. — С. 28—35.

3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43. — № 2. — С. 223—230.

4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2005. — 632 с.

5. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1972. — 220 с.

6. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.

7. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. — 405 с.

8. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.

9. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компандных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: МГАКХиС, 2010. — 288 с.

10. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. — М.: МГАКХиС, 2011. — 343 с.

11. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. — 2011. — № 4. — С. 64—66.

12. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. — 2011. — № 12. — С. 4—15.

13. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев, А.И.Леонтьев. — СПб: Судостроение, 2005. — 398 с.

14. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow. Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4. — New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. — pp. 425—432.

15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока полукруглого и квадратного поперечного сечения // Отраслевые аспекты технических наук. — 2012. — № 9. — С. 11—30.

16. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 / Ю.В.Вилемас, Г.И.Воронин, Б.В.Дзюбенко и др.; Под ред. А.А. Жукаускаускаса и Э.К. Калинина. — Вильнюс: Москслас, 1988. — 188 с.

17. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. — 2013. — № 12. — С. 9—15.

18. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2014. — № 38. — С. 16—31.

19. Лобанов И.Е. Теория динамики вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Научное обозрение. — 2015. — № 22. — С. 226—237.

References:

1. Dreitzer G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: proceedings of the XIV of the

- School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of academician A. I. Leontiev. M.: MPEI, 2003;1: 57–60. (In Russ)
2. Dreitzer G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions. *Vestnik MAI*. 2004;11 (2): 28–35. (In Russ)
3. Dreitzer G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulators. *Thermophysics of high temperatures*. 2005; 43 (2): 223–230. (In Russ)
4. Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels: Diss. ... doct. technical sciences. – Moscow: MAI, 2005: 632. . (In Russ)
5. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. – M.: *Mashinostroenie*, 1972: 220. (In Russ)
6. Effective heat transfer surfaces / E.K.Kalinin, G.A.Dreitzer, I.Z. Kopp et al. M.: *Energoatomizdat*, 1998; 408. (In Russ)
7. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using basic analytical and numerical methods. – M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009; 405. (In Russ)
8. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume II. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using non-basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2010; 290. (In Russ)
9. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using multilayer, super-multilayer and compound models of a turbulent boundary layer. M.: *MGAKHiS*, 2010; 288. (In Russ)
10. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume IV. Special aspects of mathematical modeling of hydro-gas dynamics, heat transfer, and heat transfer in heat exchangers with intensified heat exchange. M.: *MGAKHiS*, 2011; 343. (In Russ)
11. Lobanov I.E. Theoretical study of the structure of vortex zones between periodic, superficially located turbulators of a rectangular cross-section flow. *News of universities. Aviation equipment*. 2011; 4: 64–66. (In Russ)
12. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and kinetic energy components of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. *Branch aspects of technical sciences*. 2011; 12: 4–15. (In Russ)
13. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages / Yu.A.Bystrov, S.A.Isaev, H.A.Kudryavtsev, A.I.Leontiev. – St. Petersburg: Shipbuilding, 2005; 398. (In Russ)
14. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // *Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4*. New York, Wellington (UK): *Begell House Inc.*, 2003; 425–432.
15. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the structure of vortex zones between periodic surface-located turbulators of semicircular and square cross-section flow // *Branch aspects of technical sciences*. 2012; 9: 11–30.
16. Intensification of heat exchange. Success of heat transfer, 2 / Yu.V.Vilemas, G.I.Voronin, B.V.Dzyubenko, etc.; Edited by A.A. Zhukauskas and E.K. Kalinin. Vilnius: *Moskslas*, 1988; 188.
17. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the dynamics of the development of vortex structures in pipes with turbulators. *Moscow Scientific Review*. 2013;12: 9–15.
18. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the dynamics of the development of vortex structures in pipes with turbulators. *Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering*. 2014;38:16–31(In Russ).
19. Lobanov I.E. Theory of dynamics of vortex structures in pipes with turbulators. *Scientific review*. 2015; 22: 226–237 (In Russ).

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MA, e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 29.08.2021.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 10.09.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 11.09.2021.

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

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

Обзорная статья / Review

О способах повышения эффективности водоходных движителей

А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник

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

Резюме. Цель. Целью аналитического обзора является определение перспективных направлений исследований повышения эффективности водоходных движителей. **Метод.** В работе представлены обзор и анализ современных гребных винтов. **Результат.** Проведен анализ конструктивно-компоновочных и схемных решений гребных винтов, выявлены способы повышения эффективности гребных винтов, сформированы основные направления дальнейших исследований. Рассмотрены перспективы развития гребных винтов, описаны конструктивно-компоновочные и схемные решения, обеспечивающие повышение эффективности рабочего процесса, что позволяет сформировать основные направления дальнейших научных исследований. Создаваемые перспективные схемные решения тесно связаны с использованием современных численных методов на всех этапах проектирования; новые подходы созданию гребных винтов позволят обеспечить повышение КПД на 8 - 10%. **Вывод.** Повышение эффективности гребных винтов за счет моделирования рабочих процессов с использованием численных методов гидродинамики и разработки перспективных схемных решений позволит не только увеличить КПД, но и улучшить кавитационные и акустические характеристики винтов. Применение CFD-расчетов позволяет сократить сроки, затраты и объемы доводочных работ изделия.

Ключевые слова: гребные винты, винторулевые колонки, направляющие насадки, соосные винты, направляющие лопасти, петлевидные винты

Для цитирования: А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник О способах повышения эффективности водоходных движителей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 39-51. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

On ways to improve the efficiency of water propellers

A.V. Mesropyan, Yu.A. Shabelnik

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

Abstract. Objective. The purpose of the analytical review is to identify promising areas of research to improve the efficiency of water propellers. **Method.** The research provides an overview and analysis of modern propellers. **Result.** The analysis of the design – layout and schematics solutions of propeller is carried out, methods of increasing the efficiency of propellers are revealed, the main directions of further research are formed. Prospects for the development of propellers are considered, structural and layout and circuit solutions are described that ensure an increase in the efficiency of the working process, which allows to form the main directions of further scientific research. Created promising circuit solutions are closely related to the use of modern numerical methods at all stages of design, new approaches to the creation of propellers will provide an increase in efficiency by 8-10%. **Conclusion.** Increasing the efficiency of propellers, due to modeling workflows using numerical methods of hydrodynamics, and developing advanced schematics solutions, will not only increase the efficiency, but also improve the cavitation and acoustic characteristics of the propellers. The use

of CFD calculations allows you to reduce the time, costs and volumes of product development work.

Keywords: propellers, rudder propellers, pilot nozzles, coaxial propellers, guide vanes, loop propellers

For citation: A.V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik. On ways to improve the efficiency of water propellers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(3): 39-51. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

Введение. Многоплановые требования, предъявляемые к движителям судов, способствовали появлению многообразных типов и схем движителей. Движители, работающие по гидрореактивному принципу, можно классифицировать на лопастные, водометные и комбинированные движители. К лопастным движителям относятся как гребные винты (ГВ), так и крыльчатые движители. Гребные винты наиболее широко распространены на судах разного типа от катеров до крупных контейнеровозов и танкеров. Совершенствование ГВ включает в себя не только задачи увеличения КПД, но также и оптимизации рабочих процессов, улучшения акустических, вибрационных и кавитационных характеристик.

Постановка задачи. В настоящее время актуальными остаются такие задачи как увеличение тяги, сведение к минимуму кавитации, шума и вибраций, увеличение маневренности и безопасности ГВ. Повышение эффективности ГВ предполагает уменьшение потерь мощности, сопровождающих работу ГВ. По природе возникновения потерь можно выделить основные их типы: потери на создание вызванных осевых и окружных скоростей, концевые и профильные потери. Потери на создание вызванных осевых скоростей возникают у любого гидравлического движителя, их снижение до нуля невозможно в принципе.

Интенсивное развитие технологий автоматизированного проектирования и производства ГВ в последние десятилетия способствовало доведению практически до совершенства формы профиля сечений и других геометрических параметров лопасти ГВ. Дальнейшее улучшение конструкции традиционных ГВ уже не дает существенного повышения гидродинамических характеристик. Можно утверждать, что профильные потери современных ГВ также сведены к минимальным значениям [1]. Дальнейшее повышение эффективности ГВ возможно за счет уменьшения вихревых потоков, возникающими при работе ГВ.

Методы исследования. Аналитический обзор научных публикаций показал широкое разнообразие энергоэффективных схемных решений ГВ, которые в течение многих лет развивались для повышения скорости, экономичности и снижения уровня шума.

Рассматривая эффективность ГВ, стоит отметить, что максимальные значения КПД η_p ГВ достигаются на расчетных режимах работы, при проектировании ГВ стремятся, чтобы он работал в области максимальных значений КПД, который может достигать 70 – 75% при оптимальных величинах основных параметров, но на практике реальный КПД винтов оказывается меньше – от 65% и ниже, так как кроме геометрических и кинематических параметров самого ГВ на КПД оказывают влияние и обводы корпуса судна, его скорость, условия эксплуатации.

Зависимость КПД движителя от скорости судна для различных движителей представлена на рис. 1 [2], данные кривые показывают, что применение традиционных ГВ целесообразно, когда скорости судна не превышают 40 узлов, суперкавитирующие гребные винты (СКВ) наряду с водометными движителями эффективно используются на быстроходных судах.

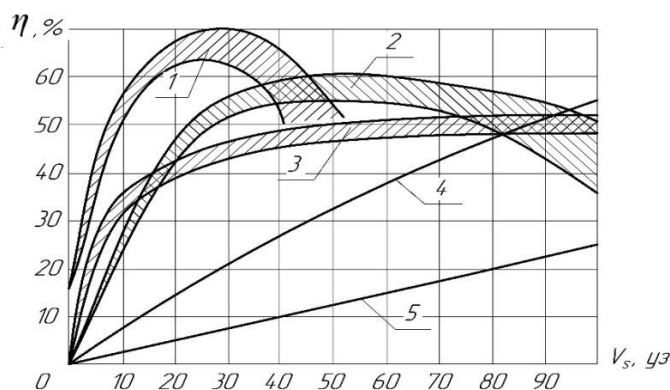


Рис. 1. Зависимость КПД для различных движителей: 1 – гребной винт; 2 – суперкавитирующий гребной винт; 3 – водометный движитель; 4 – воздушный винт; 5 – воздушно-реактивный двигатель

Fig. 1. Dependence of efficiency for different propulsor: 1 – propeller; 2 – Supercavitating propeller; 3 – water jet; 4 – air propeller; 5 – air-jet engine

Области применения ГВ и СКВ (рис.2) определяется по зависимости числа кавитации от относительной поступи (λ_p), определяющей режим работы ГВ.

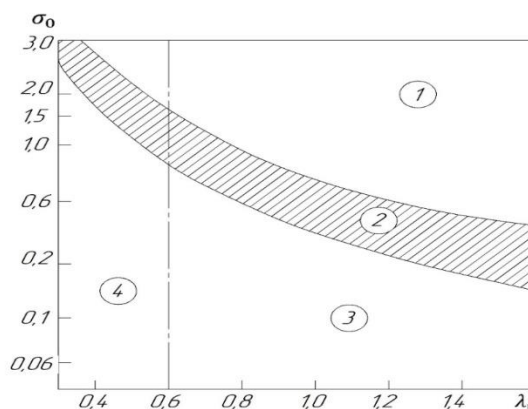


Рис. 2. Области применения обычных и суперкавитирующих ГВ: 1 – наилучшая зона для обычных ГВ; 2 – зона частичной кавитации; 3 – наилучшая зона для СКВ; 4 – зона низких КПД для любых ГВ

Fig. 2. Applications for conventional and supercavitating propellers: 1 – best area for conventional propellers; 2 – zone of partial cavitation; 3 – the best zone for supercavitating propellers; 4 – zone of low efficiency for any propellers

Число кавитации характеризует величину разрежения на лопасти и может быть определено как [3]:

$$\sigma_0 = \frac{2(p_0 - p_v)}{\rho v_a^2} \quad (1)$$

p_0 – давление в потоке перед ГВ, Па; p_v – давление насыщенных паров воды, Па;
 ρ – плотность воды, кг/м³; v_a – осевая скорость, м/с.

Применение СКВ целесообразно в области 3 диапазона значений относительной поступи гребного винта и числа кавитации. Область 2, промежуточная, определяет такие режимы работы, при которых будет наблюдаться частичная кавитация на лопастях как обычных, так и кавитирующих винтов. Эта область ограничена двумя кривыми, которые соответствуют значениям местного числа кавитации на относительном радиусе $x=r/R=0,7$ (R – радиус винта, r – радиус сечения лопасти) $\sigma_{0,7}=0,05$ и $0,10$ [4].

Сильно развитая кавитация характерна тем, что вся засасывающая поверхность лопасти охвачена каверной, основная часть упора гребного винта создается за счет давления на нагнетающей поверхности. Профилирование засасывающей поверхности

лопасти в этом случае, с точки зрения гидродинамики, значения не имеет: ее форма лишь должна способствовать образованию каверны оптимальных размеров, при которой сопротивление формы профиля сечения лопасти будет наименьшим.

Основываясь на этом, В. Л. Поздунин разработал для СКВ клиновидный профиль сечения лопасти с искривленной нагнетающей поверхностью (рис. 3) [5].

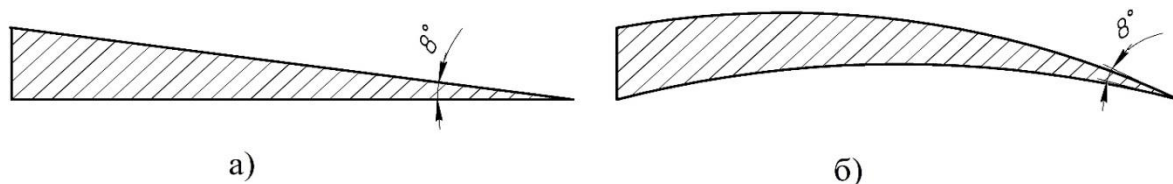


Рис. 3. Профили сечений лопасти СКВ: а – с прямой поверхностью; б – с искривленной поверхностью

Fig. 3. Supercavitating propeller blade section profiles: a – with a straight surface; b – with a curved surface

Входная кромка СКВ выполняется острой, а наибольшая толщина профиля смещена к выходящей кромке, в результате уменьшается взаимное влияние каверн в межлопастном пространстве, а гидродинамические характеристики ГВ повышаются.

Лопастей СКВ с клиновидным поперечным сечением провоцируют повышенное вихреобразование позади тупой выходящей кромки, работая на режимах бескавитационного обтекания или при частично развитой кавитации.

Вследствие этого КПД СКВ на скоростях движения судна отличных от рабочего режима оказывается ниже, чем у обычных ГВ, что приводит к нецелесообразности их применения на большинстве судов.

Современные формы ГВ для двигателей большой мощности проектируются с заметным отгибом выходящей кромки (интерцептором), который препятствует потере упора (подобно закрылку самолетного крыла), позволяет уменьшить проскальзывание и в итоге увеличивает КПД (рис. 4).

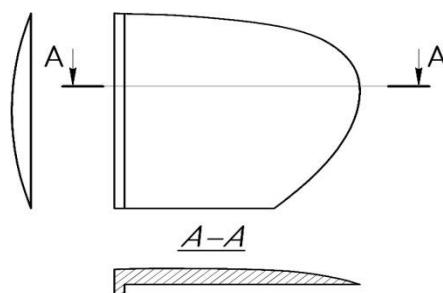


Рис. 4. Лопастей ГВ с интерцептором: 1 – интерцептор

Fig. 4. Interceptor propeller blade: 1 - interceptor

Высота интерцептора, как правило, составляет 2% от хорды профиля сечения лопасти ГВ, регулирование высоты интерцептора позволяет изменять гидродинамические характеристики ГВ, упрощая согласование параметров ГВ и силовой установки в зависимости от нагрузки судна.

Эффективное использование ГВ при больших скоростях движения судна (свыше 45 узлов) возможно в случае применения полупогруженных или частично-погруженных винтов (ЧПВ), схема ЧПВ представлена на рис. 5. Соответственно ЧПВ используются, в основном, на быстроходных судах.

Основным параметром ЧПВ является степень погружения

$$I_T = \frac{T}{D} < 1, \quad (2)$$

где T – глубина погружения нижней кромки ГВ;
 D – диаметр ГВ.

В зависимости от степени погружения изменяется коэффициент упора [6, 7], требуемое погружение ГВ рассчитывается для использования полной мощности и создаваемой при этом тяги.

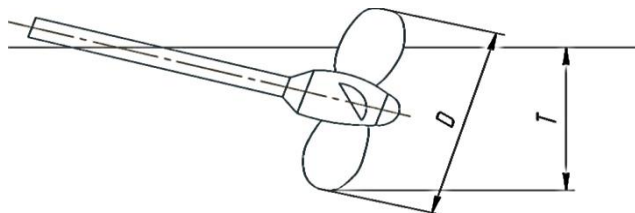


Рис. 5. Частично погруженный винт

Fig. 5. Partially submerged propeller (PSP)

Зарубежные специалисты [3, 7] сходятся во мнении, что ЧПВ являются наиболее перспективным типом движителя для глиссеров. Приводы с ЧПВ особенно хорошо зарекомендовали себя при скоростях от 45 узлов до 110 узлов. При повышении скоростей выше 45 узлов применяют винты с большим наклоном лопастей и малым дисковым отношением.

Дальнейшее повышение скорости выше 60 узлов, делает целесообразным применение суперкавитирующих ГВ с клиновидным выпукло-вогнутым профилем лопастей (рис. 6).



Рис. 6. Суперкавитирующие ЧПВ

Fig. 6. Supercavitating PSP

Эффективность СКВ ЧПВ повышается за счет захватывания воздуха и вентиляции каверн с пониженным давлением, которые образуются на засасывающей стороне лопасти.

ЧПВ не находят широкого распространения, что обусловлено рядом характерных для них недостатков, среди которых можно отметить асимметричное обтекание, приводящее к появлению боковой силы и изменению ходовых качеств, увеличение кренящего момента, высокий уровень вибраций и низкие величины упора на низких оборотах, что затрудняет выход на расчетный режим судна. Теория ЧПВ недостаточно широко изучена, но они представляют большой интерес для быстроходных катеров [8].

Наиболее известной конструкцией, позволяющей уменьшить возникающие потери и завихрения, является ГВ с направляющей кольцевой насадкой, которая была изобретена в ходе работ по улучшению характеристик ГВ Л. Кортон в 1925 году [9], в ходе работ по улучшению характеристик ГВ. Она представляет собой кольцевую насадку (короткое сопло), внутри которой размещается гребной винт (рис. 7).

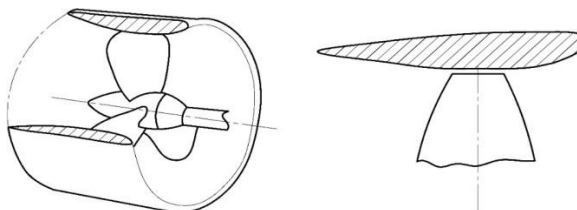


Рис. 7. Общий вид ГВ с направляющей насадкой

Fig. 7. General view of a propeller with a nozzle

ГВ с насадками успешно используются при необходимости создания дополнительного упора на малых скоростях хода. На профиле насадки возникает

циркуляция скорости, увеличивая скорость протекания воды через диск ГВ, что приводит к некоторому увеличению его КПД.

Стоит отметить, что это увеличение скорости, созданное насадкой, тем больше, чем меньше скорость хода судна.

Исследования показывают, что пропульсивные качества судна повышаются пока уменьшение потерь на перетекание жидкости у концов лопастей ГВ не превышает величину потерь мощности на преодоление сопротивления насадки, обусловленного вязкостью жидкости [10].

Применение направляющих насадок эффективно при работе с большими коэффициентами нагрузки, они используются на буксирах-якорезаводчиках, на рыболовных траулерах, где применение насадок обеспечивается до 40 – 50% упора ГВ при низких и близких к нулю скоростях хода.

С уменьшением коэффициента нагрузки эффективность направляющих насадок снижается, при скоростях, превышающих 10 узлов, сопротивление насадки быстро возрастает и на режиме полного хода направляющие насадки неэффективны. Применение направляющих насадок на быстроходных катерах нецелесообразно.

Повышение требований к маневренности таких судов как ледоколы, траулеры привело к появлению схем ГВ на поворотных колонках (рис. 8).

Поворотные винторулевые колонки по своей сути являются ГВ (иногда ГВ в насадке), направление упора которых может изменяться в широких пределах путем поворота самой колонки относительно своей вертикальной оси.

Полноповоротные винторулевые колонки вращаются на 360°, и могут работать как толкающие и как тянущие ГВ. Поворотные колонки обеспечивают высокую маневренность при любых скоростях хода судна.



Рис. 8. Полноповоротные винторулевые колонки ледокола «Об»
Fig. 8. Full-revolving Rudderpropeller of the icebreaker "Ob"

Наиболее широко используемой полноповоротной винторулевой колонкой является движитель Azipod, представляющий собой безредукторную систему с электродвигателем, расположенным в гондole за пределами корпуса судна. Электродвигатель позволяет использовать крутящий момент без ограничений, не зависимо от частоты вращения ГВ, ввиду отсутствия зубчатых передач, частотный преобразователь позволяет регулировать скорость и направление вращения силовой установки.

Помимо высокой маневренности, рамная конструкция Azipod выдерживает высокие ударные нагрузки, имеет низкие вибрацию и шум, что и обеспечивает ее широкое применение на ледоколах.

Развитие теории ГВ способствовало появлению сложных схем ГВ, которые представляют собой конструкции с двумя и более вращающимися винтами (рис. 9):

- при тандемном расположении ГВ соосны, вращаются в одном направлении и с одинаковой угловой скоростью;

- парные ГВ – это конструкция из двух соосных ГВ, которые вращаются в противоположные стороны (при этом внутри полого вала помещают второй вал, один из винтов вращает наружный вал, а второй – внутренний);

- ГВ с перекрывающимися дисками, таким образом, оба ГВ работают в области действия более интенсивного попутного потока, что дает улучшение пропульсивных качеств.

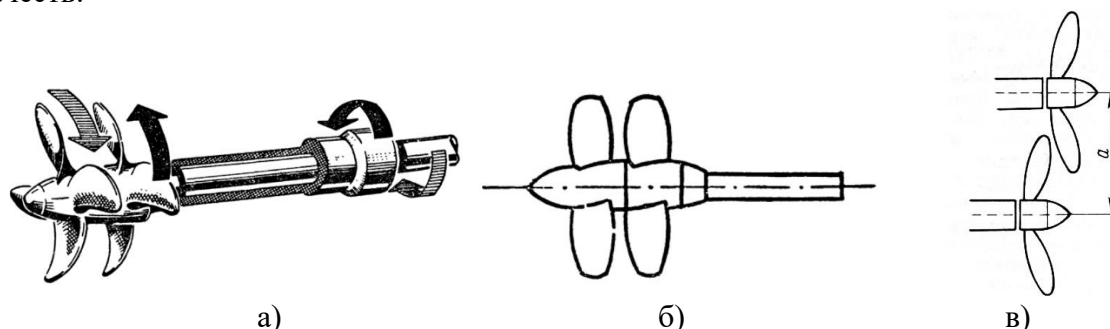


Рис. 9. Гребные винты сложных схем: а – соосные ГВ парные; б – ГВ тандемы; в – ГВ с перекрывающимися дисками

Fig. 9. Propellers complex schemes: a – coaxial twin propellers; b – tandem propellers; c – propellers with overlapping discs

Основное преимущество соосных винтов заключается в улучшении кавитационных характеристик за счет увеличения площади поверхности лопастей [11]. Соосные парные ГВ имеют более высокий КПД, но имеют более сложную конструкцию. Для привода парных ГВ иногда используют электродвигатели с целью некоторого упрощения конструкции, поскольку электродвигатель позволяет исключить редуктор. Соосные ГВ могут эффективно использоваться на быстроходных катерах с большой мощностью двигателя, поскольку позволяют реализовать больший упор, уменьшив при этом оптимальный диаметр ГВ.

ГВ с перекрывающимися дисками при корректном выборе формы и взаимного расположения винтов, позволяют повысить пропульсивный коэффициент на 20% по сравнению с традиционной двухвальной компоновкой, а уменьшение потребляемой мощности составляет до 6%. ГВ с перекрывающимися дисками практически не применяются, что связано с недостаточной их изученностью, а также сложностью реализации эффективной совместной работы во всем диапазоне скоростей [11].

Объединяя идеи винторулевых колонок и соосных ГВ, реализуют и более сложные схемы движителей (рис. 10).

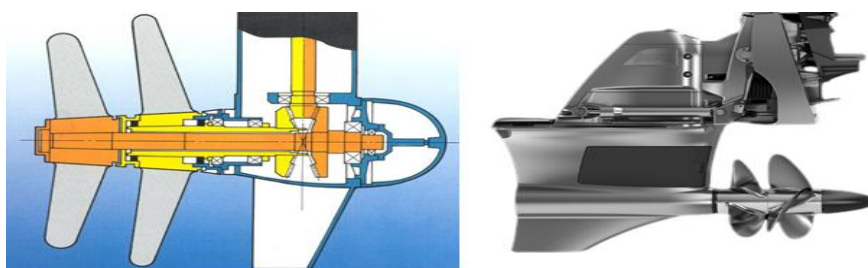


Рис. 10. Винторулевая колонка с соосными винтами

Fig. 10. Coaxial rudderpropeller

Преимуществами такой конструкции являются высокая маневренность, возможность развивать большую максимальную скорость, топливная экономичность.

Способы существенно повысить КПД традиционных ГВ уже себя исчерпали, традиционные ГВ за многолетнюю историю развития доведены до своего совершенства, их проектирование осуществляется по стандартным методикам и отработанным технологиям. Расширение области эффективного применения ГВ – увеличение максимального КПД и режимов бескавитационной работы при больших скоростях судна, возможно с использованием перспективных схемных решений ГВ.

Оптимизация гребного винта – это многокритериальная задача, целью которой является улучшение гидродинамических характеристик. В настоящее время ведутся работы как по исследованию рабочего процесса, улучшения гидродинамических характеристик ГВ, так и по созданию нетрадиционных схем ГВ. Развитие не только подходов к проектированию ГВ, но и технологий производства обуславливает появление конструктивно сложных вариантов лопастей винтов, изготовление которых в настоящее время не представляется трудоёмким.

Используя подходы к созданию нетрадиционных схем ГВ, в работе [12] рассматривается разработка схемы ГВ с отверстиями на концевой части лопасти (рис. 11, а), с применением CFD-методов. Рассчитанное увеличение КПД такого ГВ в сравнении с обычным составляет 8-9%, экспериментального подтверждения увеличения КПД автором не приводится. ГВ с отверстиями в лопастях рассматривались уже и ранее, например, в работе [13] (рис. 11, б) также предполагает снижение рассеяния энергии и, следовательно, повышение эффективности работы ГВ. Серийного применения ГВ с отверстиями пока не находят.

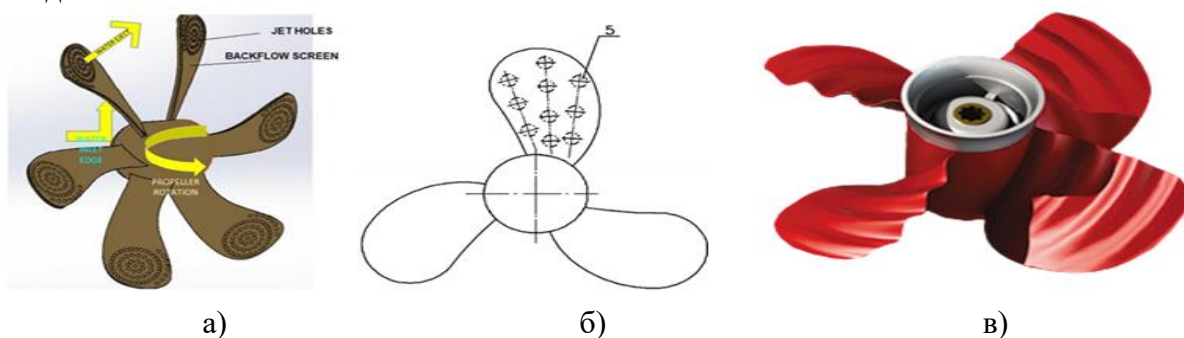


Рис. 11. Гребные винты: а – с отверстиями на концевой части; б – с отверстиями по всей лопасти; в – с волнистыми лопастями

Fig. 11. Propellers: a – with holes on the end portion; b – with holes all over the blade; c – wavy blades

В работе [14] рассматривается бионический подход к моделированию ГВ – ГВ с волнистыми лопастями (рис. 11, в). Моделирование формы лопастей, с использованием численных методов, основывалось на идее воссоздания морских раковин. В результате достигнуто:

- снижение изгибно-крутильных колебаний и повышение КПД за счет увеличения площади радиальных сечений;
- увеличение жесткости за счет снижения деформации выходящей тонкой кромки;
- уменьшение кавитации и снижение уровня шума, благодаря удержанию пограничного слоя набегающего потока на лопасти волнистой формы и более равномерному его распределению на поверхности.

Работа [15], посвященная подходу к разработке ГВ с использованием бионического моделирования, предлагает форму ГВ, приведенную на рис. 12.



Рис. 12. Бионический гребной винт

Fig. 12. Bionic Propeller

Конструкция ГВ имеет петлевидную форму с концевой частью, повторяющей оперение птичьих крыльев, ГВ разработан с использованием бионических подходов к

моделированию, связанных с изучением парящего полета птиц. По данным, приведенным в работе по бионическому ГВ, увеличение тяги составляет 19%, а снижения уровня шума 30% [15].

Разработчики современных серийных ГВ добиваются повышения эффективности путем профилирования. К примеру, гребной винт C-FOIL [16] (рис. 13, а), серийно выпускаемый английской компанией Teignbridge, является новейшей разработкой в области дизайна винтов, он имеет улучшенную, препятствующую кавитации форму сечения лопасти, которая увеличивает тягу и улучшает эффективность ГВ: обеспечивает примерно на 10% большую тягу и на 12% больший КПД по сравнению со стандартными моделями винта, обеспечивая повышение производительности и экономию топлива.

Специально спроектированные лопасти ГВ C-FOIL позволяют развивать высокие скорости от 35 узлов без кавитации [17]. Нестандартную форму ГВ предлагает нидерландская компания Poseidon Propulsion Inc (рис. 13, б), создавшая, путем сложного профилирования, форму бесшумного, некавитирующего ГВ [18].



Рис. 13. Гребные винты: а – Teignbridge C-Foil; б – Poseidon Silent Thruster
Fig. 13. Propellers: a – Teignbridge C-Foil; b – Poseidon Silent Thruster

Гребные винты Poseidon Silent Thruster (PSTP) предназначены для прогулочных яхт и коммерческих судов, но могут быть адаптированы к любому двигателю и размеру.

Исследования влияния вихревых явлений на рабочий процесс ГВ способствовали созданию конструкций с направляющими лопастями. Направляющие лопасти (рис. 14, а), установленные на втулке после ГВ, эффективно используют вихревые потоки, которые возникают при вращении ГВ.

Конструкция PBCF (Propeller Boss Cap Fins), предотвращает образование втулочного вихря, позволяя достичь экономию топлива до 5% [19, 20]. Конструкция PSP (Pre-swirl Stator Propeller) представляет собой статорные лопатки, расположенные перед ГВ (рис. 14, б).

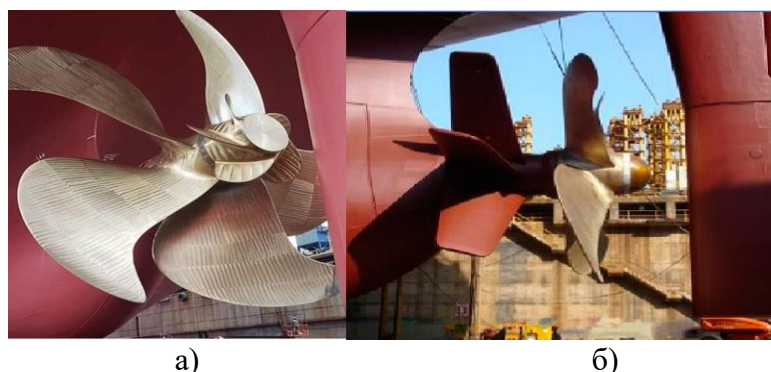


Рис. 14. Направляющие лопасти гребного винта: а – устанавливаемые после винта (Boss Cap Fins); б – устанавливаемые перед винтом (Pre-swirl Stator)
Fig. 14. Propeller guide vanes: a – Boss Cap Fins; b – Pre-swirl Stator

Лопатки статора создают направленный поток, закрученный в направлении противоположном направлению вращения ГВ, обеспечивая благоприятные условия для его работы, снижая потери мощности и повышая эффективность ГВ [21, 22].

Большую часть потерь мощности создают концевые потери, для их снижения применяются ГВ с концевыми пластинами [23, 24], называемые Contracted Loaded Tip (CLT) Propeller (рис. 15, а).



а)



б)

Рис. 15. Гребные винты: а – с концевыми пластинами (Contracted Loaded Tip Propeller); б – Sharrow propeller

Fig. 15. Propellers: a – Contracted Loaded Tip Propeller; b – Sharrow propeller

Применение CLT-винтов позволяет повысить КПД на 5-8%, снижает расход топлива до 10% и улучшает кавитационные характеристики, однако на нерасчетных режимах работы эффективность CLT-винтов оказывается ниже традиционных ГВ [23].

Объединяя тенденции современных подходов к созданию ГВ, компания Sharrow Engineering LLC разработала по-настоящему уникальную конструкцию ГВ (рис. 15, б) [25, 26], обеспечивающую, по сравнению с традиционными гребными винтами, следующие преимущества:

- снижение удельного расхода топлива в широком диапазоне оборотов;
- увеличение скорости судна;
- отличная маневренность и управляемость;
- вихри и кавитация не образуются на петлевой конструкции;
- практически полное отсутствие вибрации;
- снижение уровня шума.

Идея эффективности петлевых винтов (ГВ Sharrow, Бионический ГВ bigrep) основывается на исключении концевых вихрей, которые, как было указано выше, создают большие потери.

В работе [27] автор приводит методику расчета тороидальных ГВ на основе ленты Мебиуса и также отмечает снижение гидродинамических потерь и увеличение упора на 5 – 10%.

К преимуществам петлевых винтов также можно отнести неконсольное закрепление лопасти, что обеспечивает большую прочность конструкции.

Компанией Sharrow Engineering LLC в настоящий момент изготовлены петлевые винты для лодочных двигателей небольшой мощности, но основной акцент направлен на создание серийных моделей для мощных подвесных двигателей и кормовых приводов от 100 л.с. до 450 л.с., так как на них эффект от экономии топлива будет наиболее заметен.

Обсуждение результатов. Сопоставительный анализ схем и характеристик КПД водоходных движителей различных схем показывает, что применение перспективных схемных решений ГВ способствует повышению КПД, топливной экономичности и достижению больших скоростей судна.

Рассмотрены перспективы развития ГВ, описаны конструктивно-компоновочные и схемные решения, обеспечивающие повышение эффективности рабочего процесса, что позволяет сформировать основные направления дальнейших научных исследований. Создаваемые перспективные схемные решения тесно связаны с использованием современных численных методов на всех этапах проектирования, новые подходы созданию ГВ позволят обеспечить повышение КПД на 8 - 10%.

Кроме того, применение CFD-расчетов позволяет сократить сроки, затраты и объемы доводочных работ изделия.

Создание сложного профилирования лопастей невозможно без расчета гидродинамических характеристик проектируемого ГВ в специализированных пакетах для CFD-расчетов, позволяющих определить диапазоны оптимальных параметров ГВ, а также оценить кавитационные явления на ранних стадиях проектирования и, в итоге, сократить объемы натурных испытаний.

Вывод. ГВ нетрадиционных схем с элементами бионического дизайна обладают определенными преимуществами перед традиционными ГВ, что предопределяет актуальность исследований, направленных на моделирование рабочих процессов и реализацию новых схемных решений, обеспечивающих повышение КПД.

Обзор патентов и научных публикаций, посвященных разработке схемных решений ГВ, показал, что реализация конструкций с элементами сложного профилирования, таких как петлевидные ГВ, лопасти с комбинированными профилями, с элементами бионического моделирования, разработанных с использованием современных численных методов, способствует не только повышению эффективности ГВ, но и улучшению акустических и кавитационных характеристик ГВ.

Библиографический список:

1. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля: Учебник. – 3-е издание. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336с.
2. Куликов С.В., Храмкин М.Ф. Водометные движители (теория и расчет). – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – 312с.
3. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. – 4 ed., 2010. – 585 p.
4. Корытов Н.В. Суперкавитирующие гребные винты // Журнал «Катера и яхты», 1975, №01(053). с. 46 – 50.
5. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. – Л.: ГСИ СудПром, 1963. – 760с.
6. Ferrando M. Performance of a family of surface piercing propellers / Ferrando M., Scamardella A., Bose N., Liu P. International Journal of Maritime Engineering, 2002. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A. pp. 63 – 70.
7. Ghassemi H. Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planning craft/ Ghassemi H., Shademani R. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2009-79963. 2009. pp. 2 – 8.
8. Жинкин В.Б. Частично погруженные гребные винты / Журнал «Катера и Яхты» 2007- №3(207) - с. 106 – 109.
9. Kort L. Патент на изобретение №2030375 (US) – Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle, 1936.
10. Басин А.М., Степанюк Е.И. Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания. Л.: Изд-во «Транспорт», 1977. – 269 с.
11. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/ Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768с.
12. Stan L.C. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD/ L.C. Stan, I. Calimanescu and V. Popa // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 400, Issue 8, 2018. pp. 2 – 10.
13. Рогов В.А. Патент на изобретение №216.012.4039 – Гребной винт, 20.05.2013.
14. Славгородская А.В. Фантазии на тему гребных винтов с волнистыми лопастями / Славгородская А.В., Славгородский В.М., Немкин Д.В. // САПР и графика. 2015 № 1(219): с. 69 – 72.
15. Florian Schärfer. Bionic propeller: nature inspiring innovation. [электронный ресурс] URL:// <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/>
16. Propeller Designs [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://teignbridge.co.uk/products-2/marine-propellers/propeller-designs/>
17. Teignbridge propellers teams up with plymouth university / Katina Read [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/teignbridge-propellers-teams-up-with-plymouth-university/>
18. Poseidon propulsion BV [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://www.poseidon-bv.nl/custom-made-propellers/custom-made-propellers/>
19. Kawamura T. Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF) / Kawamura T., Ouchi K., Takeuchi S.// Third International Symposium on Marine Propulsor, Launceston, Australia, May 2013, pp. 486 – 493.

20. Lim Sang-Seop. Parametric Study of propeller boss cap fins for container ships / Lim Sang-Seop, Kim T.W., Lee D.M., Kang C.G., Kim S.Y. // Int.J.Nav.Archit. Ocean Engineering (2014) 6: pp. 187 – 205.
21. Saettone S. Pre-Swirl Stator and Propeller Design for Varying Operating Conditions. Saettone, S., Regener, P. B., & Andersen P. // In U. Dam Nielsen, & J. Juncher Jensen (Eds.), Proceedings of the 13th International Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS' 2016) Technical University of Denmark. 2016; 27 – 36.
22. Li H. The Transient Prediction of a Pre-Swirl Stator Pump-Jet Propulsor and a Comparative Study of Hybrid RANS/LES Simulation on the Wake Vortices / Li H., Huang Q., Pan G., Dong X., // Ocean Engineering Volume 203, 107224, 2020.
23. Gennaro G. Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip Propellers / Gennaro G., Gonzalez-Adalid J. 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Australia, 2-7 November 2014; 1 – 17.
24. Kang J.G. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip / Kang J.G., Kim M.C., Kim H.U., Shin I.R. *Journal of Marine Science and Engineering* 2019; 7 (386):12.
25. Gregory Charles Sharrow, Cherry Hill. Патент на изобретение №009926058B2 (US) – Propeller, 27.05.2018.
26. Sharrow Engineering Propeller [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://boattest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/>
27. Богатырев М.Д. Совершенствование конструкции гребного винта на судах лесосплавного флота. Дис. ... кандидата технических наук, Марийский гос. тех. ун-т, Йошкар-Ола, 2006 – 156 с.

References:

1. Zhinkin V.B Theory and structure of the ship: Textbook. 3rd edition. SPb: [Sudostroyeniye] Shipbuilding, 2002. 336p (In Russ)]
2. Kulikov S.V., Khramkin M.F. Water jets (theory and calculation). 3rd ed., Rev. and Add. [Sudostroyeniye] Shipbuilding, 1980; 312. (In Russ)]
3. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4 ed., 2010; 585.
4. Korytov N.V. Supercavitating propellers. [Katera i Yakhty], *Boats and Yachts*, 1975; 01(053: 46 – 50. (In Russ)]
5. Basin A.M., Miniovich I.YA. Teoriya i raschet grebnykh vintov., [L.: GSI SudProm] *GSI SudProm*, 1963; 760. (In Russ)]
6. Ferrando M. Performance of a family of surface piercing propellers / Ferrando M., Scamardella A., Bose N., Liu P. *International Journal of Maritime Engineering*. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A. 2002; 63 – 70.
7. Ghassemi H. Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planning craft/ Ghassemi H., Shademani R. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2009-79963. 2009; 2 – 8.
8. Zhinkin V.B. Partially submerged propellers [Katera i Yakhty], *Boats and Yachts*, 2007; 3(207):106 - 109. (In Russ)]
9. Kort L. Patent №2030375 (US) – Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle, 1936.
10. Basin A.M., Stepanyuk Ye.I. Guidelines for the calculation and design of propellers for inland navigation vessels. - L.: Publishing house "Transport", 1977; 269. (In Russ)
11. Handbook of Ship Theory: In Three Volumes. Volume 1. Hydromechanics. Resistance to ship traffic. Ship propellers / Ed. ME AND. Voikunsky. - L.: [Sudostroyeniye] *Shipbuilding*, 1985; 768. (In Russ)
12. Stan L.C. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD/ L.C. Stan, I. Calimanesu and V. Popa . IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 2018; 400(8): 2 – 10.
13. Rogov V.A. Patent for invention №216.012.4039 [Grebnoy vint] *Propeller*, 20.05.2013. (In Russ)
14. Slavgorodskaya A.V. Fantasies on the theme of propellers with wavy blades / Slavgorodskaya A.V., Slavgorodsky V.M., Nemkin D.V. [SAPR i grafika] *CAD and graphics*. 2015; 1 (219): 69 - 72. 9 In Russ)]
15. Florian Schärfer. Bionic propeller: nature inspiring innovation. [electronic resource] // Access mode – URL:// <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/>
16. Propeller Designs [electronic resource] // Access mode – <https://teignbridge.co.uk/products-2/marine-propellers/propeller-designs/>
17. Teignbridge propellers teams up with plymouth university / Katina Read [electronic resource] // Access mode – <https://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/teignbridge-propellers-teams-up-with-plymouth-university/>
18. Poseidon propulsion BV [electronic resource] // Access mode – <https://www.poseidon-bv.nl/custom-made-propellers/custom-made-propellers/>
19. Kawamura T. Model and full scae CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF) / Kawamura T., Ouchi K., Takeuchi S. Third International Symposium on Marine Propulsor, Launceston, Australia, May 2013; 486 – 493.
20. Lim Sang-Seop. Parametric Study of propeller boss cap fins for container ships / Lim Sang-Seop, Kim T.W., Lee D.M., Kang C.G., Kim S.Y. // Int.J.Nav.Archit. *Ocean Engineering*. 2014; 6:187 – 205.
21. Saettone, S. Pre-Swirl Stator and Propeller Design for Varying Operating Conditions./ Saettone, S., Regener, P. B., & Andersen, P.// In U. Dam Nielsen, & J. Juncher Jensen (Eds.), Proceedings of the 13th International

Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS' 2016) *Technical University of Denmark*. 2016; pp. 27 – 36.

22. Li H. The Transient Prediction of a Pre-Swirl Stator Pump-Jet Propulsor and a Comparative Study of Hybrid RANS/LES Simulation on the Wake Vortices / Li H., Huang Q., Pan G., Dong X. *Ocean Engineering*. 2020; 203: 107224.

23. Gennaro G. Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip Propellers / Gennaro G., Gonzalez-Adalid J. // 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Australia, 2-7 November 2014; 1 – 17.

24. Kang J.G. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip / Kang J.G., Kim M.C., Kim H.U., Shin I.R. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 386 (7): 12.

25. Gregory Charles Sharrow, Cherry Hill. Patent №009926058B2 (US) *Propeller*, 27.05.2018.

26. Sharrow Engineering Propeller [electronic resource] // Access mode – <https://boattest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/>

27. Bogatyrev M.D. Improving the design of the propeller on the ships of the timber floating fleet. Dis. ... Candidate of technical sciences, Mari state. those. un-t, Yoshkar-Ola, 2006; 156. (In Russ)]

Сведения об авторах:

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

Юлия Андреевна Шабельник, старший преподаватель, кафедра теоретической механики; e-mail: cammy@list.ru

Information about the authors:

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

Yulia A. Shabelnik, Senior Lecturer, Department of Theoretical Mechanics; e-mail: cammy@list.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.06.2021.

Одобрена после рецензирования/Reviced 21.07.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 29.07.2021.

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

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Оригинальная статья / Original Paper

Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка метода определения координат гипоцентра землетрясения с использованием в качестве геометрического места точек положения гипоцентра различных комбинаций фигур второго и четвертого порядка. **Метод.** Известно, что линией пересечения фигур второго и четвертого порядков, в случае совпадения фокусов, является окружность. Для определения координат очага землетрясения используются данные сейсмографов, по которым строятся фигуры второго и четвертого порядка, точка пересечения которых, является гипоцентром. При использовании данных с двух сейсмотатчиков имеют место две фигуры, линией пересечения которых является окружность. Через центр этой окружности строится сфера с радиусом равным радиусу окружности. Для других двух пар сейсмотатчиков также формируются еще две сферы. Точка пересечения полученных трех сфер и является искомым гипоцентром землетрясения. **Результат.** Разработан метод определения координат очага землетрясения с использованием для различных пар сейсмотатчиков разных фигур второго и четвертого порядков. **Вывод.** Метод позволяет обеспечить выбор одной из фигур второго или четвертого порядка для разных пар сейсмотатчиков, что позволяет уменьшить ошибку в определении координат очага.

Ключевые слова: сейсмология, сейсмотатчик, сейсмическая волна, скорость, окружность, сфера, гиперболоид, эллипсоид, овал Кассини

Для цитирования: Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 52-58. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a method for determining the coordinates of the earthquake hypocenter using various combinations of second and fourth order figures as a geo-locus of the hypocenter position points. **Method.** It is known that the line of intersection of figures of the second and fourth orders, in the case of coincidence of focuses, is a circle. To determine the coordinates of the earthquake source, data from seismographs are used, which are used to construct figures of the second and fourth order, the intersection point of which is the hypocenter. When using data from two seismic sensors, there are two figures, the intersection line of which is a circle. A sphere with a radius equal to the radius of the circle is constructed through the center of this circle. For the other two pairs of seismic sensors, two more spheres are also formed, The intersection point of the three spheres obtained is the sought-for hypocenter of the earthquake. **Result.** A method has been developed for determining the coordinates of an earthquake source using different shapes of the second and fourth orders for different pairs of seismic sensors. **Conclusion.** The method allows one to select one of the

second or fourth order figures for different pairs of seismic sensors, which makes it possible to reduce the error in determining the source coordinates.

Keywords: seismology, seismic sensor, seismic wave, velocity, circle, sphere, hyperboloid, ellipsoid, Cassini oval

For citation: G.K. Aslanov, T.G. Aslanov. Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 52-58. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58

Введение. В настоящее время существуют множество методов определения координат гипоцентра землетрясения, которые для этого используют фигуры второго и четвертого порядка. При этом в качестве фигуры второго порядка, в большинстве своем, в них по данным одного из сейсмодатчиков строится сфера [1-11]. При этом использование сферы накладывает известные ограничения на выбор сейсмодатчиков на местности [3-7].

В работе предложен метод определения координат гипоцентра землетрясения, позволяющая использовать при определении координат гипоцентра землетрясения для различных пар сейсмодатчиков разные комбинации фигур второго и четвертого порядков: метод сфер, метод сферы и гиперboloида, гиперboloида и эллипсоида, а также гиперboloида и овала Кассини.

Постановка задачи. В предложенном методе в качестве исходных данных при известных координатах сейсмодатчиков используются разности времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны на каждый сейсмодатчик и (или), разность времен прихода сейсмической (продольной или поперечной) волны для каждой пары сейсмодатчиков. Используя для различных пар сейсмодатчиков разные комбинации фигур второго и четвертого порядков, определяются линии пересечения этих фигур – окружности. Строится сфера с фокусом в центре окружности и радиусом равном радиусу окружности. Координаты гипоцентра землетрясения определяются как точка пересечения сфер построенных для разных пар сейсмодатчиков.

Методы исследования. Для определения координат гипоцентра землетрясения были использованы четыре известных метода локализации сейсмических событий:

– метод сфер; радиус от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [8-11]:

$$R_{si} = \frac{V_p V_s \Delta t_i}{V_p - V_s}, \quad (1)$$

где: V_p – скорость продольной волны;

V_s – скорость поперечной волны;

Δt_i – разность времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны к i -ому сейсмодатчику;

– метод сферы и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [1,4,6]:

$$R_{gi} = \frac{L_i - t_{ri}^2 V_p^2}{2(t_{ri} V_p - L_i m_i)}, \quad (2)$$

где: t_{ri} – разность времен прихода продольной сейсмической волны к i -ому и $i + 1$ сейсмодатчику;

L_i – расстояние между i -м и $i + 1$ сейсмодатчиком;

$$m_i = \frac{(V_p - V_s)(L_i - t_{ri}^2 V_p^2) - 2 t_{ri} \Delta t_i V_p^2 V_s}{2 L_i V_p V_s \Delta t_i}, \quad (3)$$

– метод эллипсоида и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [2,7]:

$$R_{ei} = \frac{L_i^2 - t_{r(i-1)}^2 V_p^2}{2(t_{r(i-1)} V_p - L_i b_i)}, \quad (4)$$

где: $k = V_p / V_s$;

$$b_i = \frac{k((\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)(L_i^2 - t_{r(i-1)}^2 V_p^2)(1-k) - t_{r(i-1)} k V_p^2 (\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)^2) + t_{r(i-1)} L_i^2 (1-k)^2}{V_p L_i (k^2 (\Delta t_{i-1} + \Delta t_i)^2 - t_{r(i-1)}^2 (1-k)^2)},$$

– метод овала Кассини и гиперboloида; расстояние от сейсмодатчика до очага землетрясения можно вычислить по следующей формуле [3]:

$$R_{ki} = \sqrt{F^2 + L_i^2/4 - F((X_i - X_{i+1}) \cos \alpha + (Y_i - Y_{i+1}) \sin \alpha)}, \quad (5)$$

$$\text{где: } F = \frac{1}{2} \sqrt{L_i^2 \cos 2\alpha \pm \sqrt{L_i^4 \cos^2 2\alpha + 16 \frac{V_p^4 V_s^4 t_i^2 t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} - L_i^4}},$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) / 2;$$

$$a = 4(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 4(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 - 16 \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} L_i^4 + L_i^8;$$

$$b = 12(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 8(t_{ri} V_p)^6 L_i^2 + \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} (64 L_i^2 (t_{ri} V_p)^2 - 32 L_i^4) - 8(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 + 2 L_i^8;$$

$$c = 4(t_{ri} V_p)^8 - 8(t_{ri} V_p)^6 L_i^2 + \frac{V_p^4 V_s^4 \Delta t_i^2 \Delta t_{i+1}^2}{(V_p - V_s)^4} (64 L_i^2 (t_{ri} V_p)^2 - 64 (t_{ri} V_p)^4 - 16 L_i^4) +$$

$$8(t_{ri} V_p)^4 L_i^4 - 4(t_{ri} V_p)^2 L_i^6 - L_i^8;$$

X_i, Y_i – координаты i -ого сейсмодатчика.

Геометрические соотношения для метода, где для определения координат гипоцентра используются овал Кассини и гиперboloид, приведены на рис.1.

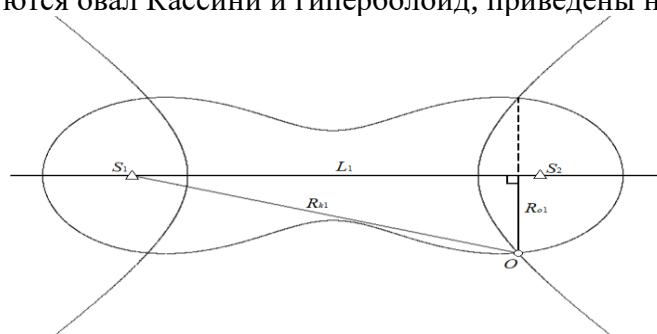


Рис. 1. Геометрические соотношения, возникающие при использовании для определения координат очага землетрясения овала Кассини и гиперboloида

Fig. 1. Geometric relations arising when using the Cassini oval and the hyperboloid to determine the coordinates of the earthquake source

Здесь, S_i – i -ый сейсмодатчик, O – очаг землетрясения, R_{oi} – радиус окружности – результат пересечения гиперboloида и овала Кассини.

Следует отметить, что линией пересечения любых фигур вращения, полученных вращением кривых n -ого порядка [12, 13], при условии прохождения оси вращения через два фокуса, является окружность с радиусом R_{oi} . Для пояснения метода окружностей, рассмотрим систему, состоящую из трех сейсмодатчиков и очага землетрясения (рис. 2).

Пусть, с использованием известных методов получены расстояния до гипоцентра землетрясения R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} . Тогда получим три треугольника $R_{k1}R_{e3}L_3$, $R_{g2}R_{e3}L_2$ и $R_{k1}R_{g2}L_1$.

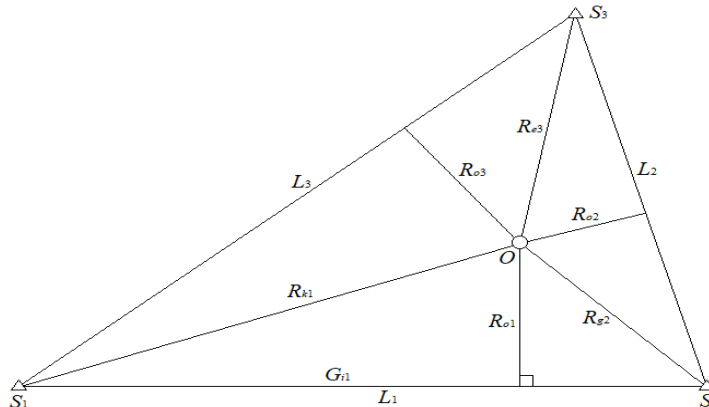


Рис. 2. Пояснение метода окружностей
 Fig. 2. Explanation of the method of circles

Высота, опущенная с очага землетрясения на отрезок между двумя сейсмодатчиками, определяет радиус окружности, полученной в результате пересечения фигур (используемых для определения координат очага), полученных вращением кривых n -ого порядка, может быть определена по следующим выражениям.

$$G_i = \frac{L_i^2 - R_{ji}^2 + R_{ji}^2}{2L_i}; \quad (6)$$

$$R_{oi} = \sqrt{R_{ji}^2 - G_i^2}, \quad (7)$$

где: R_{ji} – расстояние от i -ого сейсмодатчика, а j – метод определения координат гипоцентра землетрясения (прим. R_{k1}).

Точка пересечения трех окружностей с радиусами R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} является гипоцентром землетрясения.

Для упрощения задачи нахождения этой точки пересечения, построим сферы с центрами в центрах соответствующих окружностей и радиусами равными радиусам окружностей. Координаты центра окружности могут быть вычислены по выражениям:

$$\begin{aligned} X_{oi} &= X_{i+1} G_i/L_i + X_i(1 - G_i/L_i); \\ Y_{oi} &= Y_{i+1} G_i/L_i + Y_i(1 - G_i/L_i). \end{aligned} \quad (8)$$

Координаты гипоцентра могут быть найдены по выражениям:

$$\begin{aligned} X &= \frac{R_{o2}^2 Y_{o3} - Y_{o3} X_{o2}^2 - Y_{o3} Y_{o2}^2 + Y_{o2} X_{o3}^2 + Y_{o3}^2 Y_{o2} + R_{o1}^2 Y_{o2} - R_{o3}^2 Y_{o2} - R_{o1}^2 Y_{o3}}{2(Y_{o2} X_{o3} - X_{o2} Y_{o3})} + X_{o1}; \\ Y &= \frac{R_{o2}^2 X_{o3} - X_{o3} Y_{o2}^2 - X_{o3} X_{o2}^2 + X_{o2} Y_{o3}^2 + X_{o3}^2 X_{o2} + R_{o1}^2 X_{o2} - R_{o3}^2 X_{o2} - R_{o1}^2 X_{o3}}{2(X_{o2} Y_{o3} - Y_{o2} X_{o3})} + Y_{o1}; \\ Z &= \sqrt{R_{ji}^2 - X^2 - Y^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для проверки адекватности работы предлагаемой модели был проведен машинный эксперимент, где были заданы координаты сейсмодатчиков: $X_1 = 10$ км; $Y_1 = 10$ км; $X_2 = 110$ км; $Y_2 = 10$ км; $X_3 = 60$ км; $Y_3 = 96$ км и гипоцентра землетрясения $X = 60$ км; $Y = 53$ км; $Z = 30$ км.

При моделировании к значениям разностей времен прихода сейсмической волны к двум сейсмодатчикам и разностям времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн к сейсмодатчикам были добавлены преднамеренные ошибки, равные 0,5 секундам, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Результаты моделирования показали, что среднее значение ошибки определения координат гипоцентра землетрясения с использованием различных методов равно 2,17 км.

Обсуждение результатов. Большая ошибка в измерении координат гипоцентра землетрясения (2,17 км.) вызвана с использованием в окончательном расчете метода сфер [8-10], что из-за относительно малой глубины очага приводит к значительным ошибкам.

Ошибка может быть уменьшена заменой в окончательном расчете сферы другими фигурами вращения с использованием центров окружностей как новых фокусов.

Таким образом, используя по обстоятельствам различные кривые можно использовать многократно метод окружностей. Основные точностные характеристики метода окружностей соответствуют характеристикам пар кривых n -ого порядка, которые используются для двух сейсмодатчиков.

Вывод. Необходимость дополнительного построения сфер с центрами в центрах окружностей, вместо непосредственного нахождения точки пересечения окружностей, вызвана тем, что из-за ошибок в измерении времени прихода сейсмических волн, такой точки, на практике, может не оказаться.

При использовании метода окружностей, формирование сфер через центр окружности необходимо в связи с наличием ошибок при измерении разности времен прихода сейсмических волн к сейсмодатчику и разности времен прихода сейсмической волны к разнесенным сейсмодатчикам. Это приводит к тому, что окружности не пересекаются, для чего и формируются сферы.

Одним из положительных эффектов, которое позволяет реализовать предлагаемый метод, это возможность оценки точности определения расстояния от сейсмодатчика до гипоцентра землетрясения с использованием разных фигур вращения для одной и той же пары сейсмодатчиков.

Предлагаемый метод дает возможность определить координаты очага землетрясения позволяет в случае, когда отсутствует информация об одном из двух типов волн [14-20] на более чем одном сейсмодатчике. В этом случае используется расстояние, определенное при помощи сейсмодатчика, на котором есть информация о двух типах волн, с добавлением разности времен прихода сейсмической волны на разнесенные в пространстве сейсмодатчики помноженное на известные скорости сейсмических волн.

Предлагаемый метод позволяет осуществить оптимальный выбор сейсмодатчиков при использовании для нахождения координат гипоцентра землетрясения фигур второго и четвертого порядков.

Библиографический список:

1. Асланов Т.Г., Давудова Д.Д., Мирзаханова Л.С. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер и гиперboloида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017616673 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017611151; заявл. 13.02.17; опубл. 09.06.17.
2. Асланов Т.Г., Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сферы, гиперboloида и эллипсоида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017660545 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615709; заявл. 13.06.17; опубл. 22.09.17.
3. Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>
4. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.

- 2017;44(2):118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
5. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Асланов Г.К. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. 2018; №11 (72) – С. 503-509
 6. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Зависимость ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гипербооидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (44), 2017 – Махачкала: ДГТУ, 2017. – С. 87-98
 7. Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(2):61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>
 8. Асланов Т.Г. Разработка алгоритма определения координат очага землетрясения, с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Научные труды молодых исследователей программы «Шаг в будущее». Том 8. «Профессионал». Москва. 2005. – С. 32-34
 9. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Кудаев Д.А. Определение скоростей сейсмических волн по произошедшему землетрясению // XXXVI итоговая научно-техническая конференция ДГТУ: тезисы докладов. Махачкала, РИО ДГТУ, 2005. – С. 72-73
 10. Асланов Г. К., Даниялов М. Г., Асланов Т. Г., Магомедов Х. Д. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2010. № 56. С. 54-59.
 11. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Магомедов Г.Б. Определение координат очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн с использованием данных четырех и более сейсмодатчиков // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2016662097 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2016619293; заявл. 02.09.16; опубл. 31.10.16.
 12. Конев В.В. Линейная алгебра. Учебное пособие. – Томск. Изд. ТПУ. 2008 – 65 стр.
 13. Аналитическая геометрия и линейная алгебра: учеб. пособие / А. Е. Умнов. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : МФТИ, 2011. – 544 с. ISBN 978-5-7417-0378
 14. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3.
 15. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.
 16. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.
 17. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.
 18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013. 300 p.
 19. Бляс Э. А., Середа А.-В. И. Определение коэффициентов отражения продольных и поперечных волн по сейсмограммам продольных волн // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 3. С. 389-402.
 20. Етирмишли Г. Д., Казымова С. Э., Казымов И. Э. Изучение изменения скоростей продольных волн с глубиной по цифровым сейсмологическим данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы III Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 54-57.

References:

1. Aslanov T.G., Davudova D.D., Mirzakhanova L.S. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of spheres and hyperboloid // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017616673 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017611151; app. 02/13/17; publ. 09.06.17. (In Russ)
2. Aslanov T.G., Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of a sphere, hyperboloid and ellipsoid // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017660545 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615709; app. 06/13/17; publ. 09/22/17. (In Russ)
3. Shakhhtar B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2019; 46 (4): 134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142> (In Russ)
4. Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2017; 44 (2): 118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125> (In Russ)

5. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - ellipse and hyperbola. *Automation. Modern technologies*. 2018; 11(72): 503-509 (In Russ)
6. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Dependence of errors in determining the coordinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboids). [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017; 4 (44): 87-98 (In Russ)
7. Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the distribution density of errors in determining the coordinates of the earthquake source by the methods of spheres and ellipsoids. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46 (2): 61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70> (In Russ)
8. Aslanov T.G. Development of an algorithm for determining the coordinates of the earthquake source, with the simultaneous determination of the velocities of seismic waves // Scientific works of young researchers of the "Step into the future" program. Volume 8. "Professional". Moscow. 2005; 32-34 (In Russ)
9. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kudaev D.A. Determination of the velocities of seismic waves from the occurred earthquake // XXXVI final scientific and technical conference of DSTU: abstracts. Makhachkala, RIO DSTU, 2005; 72-73(In Russ)
10. Aslanov GK, Daniyalov MG, Aslanov TG, Magomedov Kh.D. On one method for determining the source of an earthquake with simultaneous determination of the velocities of seismic waves. [Trudy Instituta geologii DNTS RAN] *Proceedings of the Institute of Geology, Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010. No. 56. C. 54-59. (In Russ)
11. Aslanov T.G., Tagirov H.Yu., Magomedov G.B. Determination of coordinates of an earthquake source with simultaneous determination of seismic wave velocities using data from four or more seismic sensors // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2016662097 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2016619293; app. 09/02/16; publ. 10/31/16.
12. Konev V.V. Linear algebra. Tutorial. Tomsk. Ed. TPU. 2008; 65 (In Russ)
13. Analytical geometry and linear algebra: textbook. allowance / A. E. Umnov. - 3rd ed., Rev. and add. -. M.: MIPT, 2011; 544. ISBN 978-5-7417-0378 (In Russ)
14. Robert Garotta. Shear waves: from registration to interpretation. Short course of lectures for higher educational institutions, 2000 Series No. 3
15. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster - University of Utah, 2007; 154.
16. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara - Cambridge University Press, 1981; 272.
17. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett. Australian National University Press, 2009; 298.
18. D'Amico S. (Ed.) Engineering Seismology, Geotechnical and Structural Earthquake Engineering. InTech; 2013; 300.
19. Blas E. A., Sereda A.-V. I. Determination of P-and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms. [Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] *Bulletin of the Murmansk State Technical University*. 2006; 9(3): 389-402. (In Russ)
20. Yetirmishli G.D., Kazymova S.E., Kazymov I.E. Studying the change in the velocities of longitudinal waves with depth from digital seismological data. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the III International Seismological School. Obninsk: GS RAS, 2008; 54-57. (In Russ)

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Кадырбекович, доктор технических наук, профессор; e-mail: uits@dstu.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: tabasik@gmail.com

Information about the authors:

Gaydarbek K. Aslanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., e-mail: uits@dstu.ru.

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Cand., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: tabasik@gmail.com

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.08.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.08.2021.

Принята в печать / Accepted for publication 02.09.2021.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
УДК 004.93(004.4, 004.6, 303.732)
DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-59-67

Оригинальная статья / Original Paper

Алгоритм обнаружения пожара для мультисенсорной системы

Р.А. Багутдинов, М.Ф. Степанов

Институт электронной техники и приборостроения,
Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. В работе предлагается алгоритм обнаружения пожара для мультисенсорной системы. Из-за сложных условий в полевых условиях в первые часы спасательные операции затруднены и часто подвергают опасности жизнь спасателей. Основная научная цель заключается в том, чтобы система работала автономно на определенных сегментах процесса мониторинга, при этом три агента в разной степени должны взаимодействовать друг с другом на основе алгоритмов коммуникации и принятия решений. **Метод.** Существует множество алгоритмов обработки изображения, но не достаточно проработаны и описаны алгоритмы, использующие несколько источников информации. Основное внимание уделяется алгоритмам обнаружения пожара. Алгоритм разработан с использованием NI Vision Assistant, программного инструмента для быстрого создания прототипов и тестирования приложений обработки изображений. **Результат.** Помимо программной реализации на языке C, который NI Vision Assistant генерирует по умолчанию, в работе представлена Python-реализация алгоритма. **Вывод.** Результаты работы могут быть использованы для разработки мультисенсорных систем в задачах мониторинга труднодоступных районов.

Ключевые слова: обработка изображений, обнаружение пожара, сегментация изображений, мультиагентная мультисенсорная система

Для цитирования: Р.А. Багутдинов, М.Ф. Степанов. Алгоритм обнаружения пожара для мультисенсорной системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 59-67. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-59-67

Algorithm of fire detection for multi-sensor system

R.A. Bagutdinov, M.F. Stepanov

Institute of Electronic Engineering and Instrumentation,
Yu. A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Polytechnic Str., 410054 Saratov, Russia

Abstract. Objective. The paper proposes a fire detection algorithm for a multisensor system. Due to the difficult conditions in the field, for the first time, watch rescue operations are difficult and often endanger the lives of rescuers. The main scientific goal is for the system to work autonomously on certain segments of the monitoring process, while the three agents, to varying degrees, must interact with each other based on communication and decision-making algorithms. **Method.** There are many algorithms for image processing, but algorithms that use several sources of information are not sufficiently developed and described. The focus is on fire detection algorithms. The algorithm was developed using NI Vision Assistant, a software tool for rapid prototyping and testing of imaging applications. **Result.** In addition to the software implementation in C, which NI Vision Assistant generates by default, the paper presents a Python implementation of the algorithm. **Conclusion.** The results of the work can be used to develop multisensor systems for monitoring hard-to-reach areas.

Keywords: image processing, fire detection, image segmentation, multi-agent multisensor system

For citation: R.A. Bagutdinov, M.F. Stepanov. Algorithm of fire detection for multi-sensor system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 59-67. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-59-67

Введение. Последствия стихийных бедствий, таких как землетрясения, наводнения или пожары, особенно серьезны и могут привести к человеческим жертвам и значительному материальному ущербу. Бедствия затрагивают как густонаселенные городские, так и пригородные районы с различным рельефом. Из-за сложных условий в полевых условиях в первые часы спасательные операции затруднены и часто подвергают опасности жизнь спасателей.

Постановка задачи. В настоящее время существуют различные наземные или воздушные роботизированные системы с дистанционным управлением, которые облегчают инспекцию и позволяют проводить мониторинг в труднодоступных районах. Из-за разнообразных условий указанные системы могут быть эффективными в одних случаях, но неуместными в других. По этой причине предполагается использовать многоагентную мультисенсорную систему (ММС), состоящую из трех различных транспортных средств, в дальнейшем именуемых агентами мониторинга. Благодаря своим различным характеристикам три агента могут дополнять друг друга, значительно расширяя возможности системы.

Основная информация, собираемая тремя агентами, основана на цифровых изображениях, передаваемых камерами, установленными на каждом агенте. Основное внимание здесь уделяется алгоритмам обнаружения пожара, поскольку пожар считается важным индикатором нежелательного события.

ММС состоит из центра управления и следующих агентов: наземный движущийся робот, летательный аппарат (квадрокоптер с камерой) и экраноплан (автономный маловысотный летательный аппарат). Все эти агенты оснащены камерами, поэтому основные данные, получаемые с ММС, представляют собой цифровые изображения. Изображения могут обрабатываться либо локально, внутри каждого агента, либо передаваться в центр управления.

Цифровые изображения содержатся в специальных файлах графического формата. Цветовая модель описывает, как цвета могут быть представлены в виде кортежа чисел и могут иметь связанное одно или несколько цветовых пространств. Некоторые типичные цветовые пространства - стандартные RGB, HSV, HSL. Эти цветовые пространства содержат три отличительных канала. Каждый канал может быть сопоставлен с серым изображением.

В данной работе предлагается алгоритм обработки изображений на основе гистограмм для обнаружения пожара. Идея состоит в том, чтобы получить последовательные двоичные маски, отфильтровать исходное изображение и получить области изображения, которые могут содержать детектирование источников огня. Конвейер обработки извлекает наиболее подходящие цветовые плоскости (каналы) из цветового пространства исходного изображения и преобразует их в двоичные маски путем определения оптимального порогового значения. В процессе выполнения работы был проведен аналитический анализ источников аналогичных зарубежных исследований, некоторые из которых представлены ниже.

Методы исследования. В статье [1] представлен метод обнаружения пожара в реальном времени на основе изображений с использованием обработки изображений на основе цветовой модели RGB и цветовых каналов. В некоторых работах также представлены методы обработки изображений [2, 3] и разнородных данных, в том числе с мультисенсорных систем [4, 5]. В статье [6] представлены алгоритмы обнаружения

пожара с использованием цветовых моделей RGB. В статьях [7, 8] представлены алгоритмы обнаружения пожара с использованием цветовой модели RGB. В статье [9] представлен метод обнаружения пожара на изображениях с использованием процедур кластеризации K-metod и оптимизации частиц для лучшего обнаружения ложных тревог. В статье [10] представлен метод эффективного обнаружения пламени в нескольких сценах изображения. Используется набор параметрических представлений, названных Gradient Features (GF), чтобы изучить особенности изменения цвета пламени на изображении.

В статье [11] предлагается новый метод обнаружения огня в реальном времени путем обработки видеоданных, генерируемых обычной камерой наблюдения. Он использует 1-мерное временное вейвлет-преобразование и изменение цвета в движущихся областях огненного цвета с использованием 2-мерного пространственного вейвлета.

В статьях [12, 13] представлена модель для идентификации огня и дыма с использованием обработки изображений на основе нечеткой логики. В статьях [14] представлен метод обнаружения пламени и дыма с видеосъемкой в реальном времени. В статье [15] представлены несколько пороговых методов, которые могут применяться к цифровым изображениям для получения двоичного изображения. Но, не в одной из выше указанных работ не рассматривалась ситуация использования нескольких сенсоров для обнаружения огня.

Модуль NI Vision Development содержит сотни алгоритмов обработки изображений, включая фильтры, морфологию, сопоставление с образцом, классификация и многое другое. Вероятность появления серого уровня i равна

$$p(i) = \frac{h(i)}{\sum_{i=0}^{N-1} h(i)} \quad (1)$$

где: $h(i)$ обозначает количество пикселей в изображении при каждом значении уровня серого, а $N = 256$.

Метод Inter Variance использует вероятность уровней серого цвета для определения оптимального порогового значения k , для которого максимизируется следующее выражение:

$$\sigma_8^2(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)(1 - \omega(k))} \quad (2)$$

где:

$$\mu(k) = \sum_{i=0}^k ip(i) \quad (3)$$

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{N-1} ip(i) \quad (4)$$

$$\omega(k) = \sum_{i=0}^k p(i) \quad (5)$$

Наблюдение: метод Inter Variance - это реализация известного алгоритма для глобального автоматического порога гистограммы.

Метод кластеризации для автоматического глобального порога серого изображения включает получение значения k .

$$\frac{\mu_1 + \mu_2}{2} = k \quad (6)$$

где μ_1 - это среднее значение всех пикселей от 0 до k , а μ_2 - среднее значение всех пикселей между $k + 1$ и 255.

Представленный алгоритм использует цветовую модель RGB анализируемого изображения. Использовался программный инструмент NI Vision, который можно использовать для создания прототипов и тестирования приложений обработки изображений. Алгоритм записывается в файл сценария, который содержит функции обработки и соответствующие параметры. Обработка конвейера представлена на рис. 1.

Этапы обработки изображения следующие:

1. Загрузить исходное изображение из файла;
2. Сохранить изображение в буфере памяти для дальнейшего использования;
3. Извлечение синего цвета, получение серого изображения;

4. Применение глобального автоматического порога для получения двоичного изображения;
5. Инвертирование двоичного изображения, полученное на шаге # 4, чтобы получить маску № 1;
6. Сохранение маски №1 в файле изображения;
7. Получение исходного изображения из буфера памяти;
8. Создание маски исходного изображения с помощью маски №1, получив новое цветное изображение с именем «image1»;
9. Извлечение красного цвета из «image1»;
10. Анализ логарифмической гистограммы;
11. Применение приблизительного глобального порога, чтобы получить маску №2;
12. Удаление маски № 2 изображение;
14. Сохранение маски №2 в файл изображения;
15. Маскировка «image1» маской №2, чтобы получить области, где существует пожар.

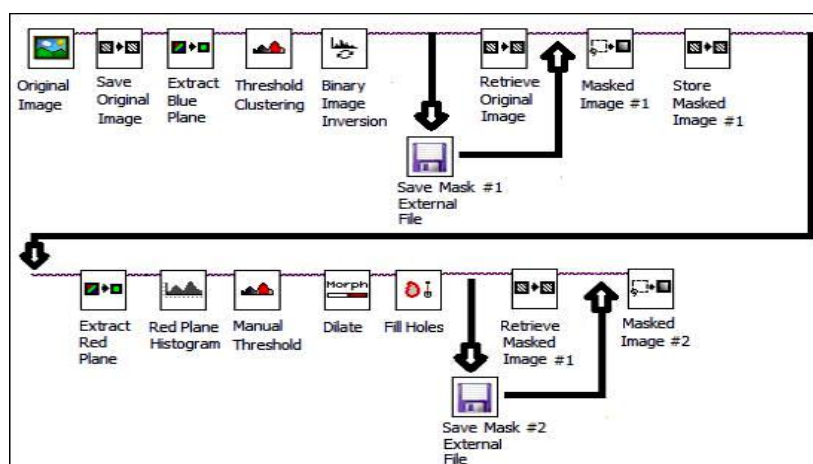


Рис. 1. Скрипт NI Vision с использованием цветовой модели RGB
Fig. 1. NI Vision Script Using RGB Color Model

Описанный выше сценарий NI Vision может быть автоматически преобразован в программу с кодом С. Однако необходимо было достичь следующих целей: устранить произвольный выбор пользователем порогового значения на шаге №11 и закодировать алгоритм на Python. Далее применялся одномерный фильтр Гаусса к логарифмической гистограмме красного цвета, чтобы «сгладить» гистограмму, после чего последовало численное вычисление первой производной и второй производной. Выбиралась пороговая точка как локальный минимум, ближайший к 255, где первая производная равна нулю, а вторая производная положительна.

В процессе автоматического определения порога на шаге №4 использовалась группировка в файл otsu.py. Код Python представлен ниже:

```
from scipy.ndimage import gaussian_filter1d from matplotlib import pyplot as plt
from otsu import otsu, running_variance, stretch,
unstretch
import math
import numpy as np
import cv2
minval=0
maxval=255
# STEP 1
image_orig= cv2.imread('forest5_test.bmp')
# STEP 2
```



```
image= image_orig.copy()
# STEP 3
blue_plane= image[:, :, 0]
# STEP 4
image_grayblue=stretch(blue_plane)
print()
threshold_otsu=int(otsu(image_grayblue)*maxval)
print(otsu(image_grayblue))
print(threshold_otsu)
print()
_, threshOtsu=cv2.threshold(blue_plane, threshold_otsu, 255, cv2.THRESH_BINARY)
contours1, hierarchy1 = cv2.findContours( threshOtsu, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for cnt1 in contours1:
cv2.drawContours(threshOtsu,[cnt1],0,255,-1)
# STEP 5
mask = cv2.bitwise_not(threshOtsu)
STEP6 cv2.imwrite('Mask1.bmp', mask)
STEP 7 mask1=cv2.imread('Mask1.bmp', cv2.IMREAD_UNCHANGED )
STEP 8
image1=cv2.bitwise_and(image,image,mask=mask1)
#STEP 9
red_plane = image1[:, :, 2]
# STEP 10
histo_red = cv2.calcHist([red_plane], [0], None, [256], [0,256])
log_histo_red
=np.log(1+histo_red.astype(np.float)) #adjust extreme values of the histogram log_histo_red[0]
= log_histo_red[1] log_histo_red[255]=log_histo_red[254] print(log_histo_red)
mMax = max(log_histo_red)
arr_log_histo_red = np.array(log_histo_red)
# smooth
smooth = gaussian_filter1d(arr_log_histo_red.T[0], 3) #compute first derivate
smooth_d1 = np.gradient(smooth)
zeroD1= np.where( np.diff(np.sign( smooth_d1)))[0]
# compute second derivative
smooth_d2 = np.gradient(np.gradient(smooth))
zeroD2=np.where( np.diff( np.sign( smooth_d2)))[0]
histo_red[0]=histo_red[1]
histo_red[255]=histo_red[254]
plt.plot(histo_red, label='Original Histogram')
plt.legend(bbox_to_anchor=(0.5, 0.5))
plt.show()
plt.plot(arr_log_histo_red,
label='Logarithmic histogram')
plt.plot(smooth,
label='Smoothed Histogram')
plt.plot(smooth_d1/ np.max(smooth_d1),
label= 'First Derivate')
plt.plot(smooth_d2 / np.max(smooth_d2),
label= 'Second Derivate')
plt.axhline(y=0, color='k')
```

```
# STEP 11
last_local_minima=0
for i, xzero in enumerate(zeroD1, 1): if smooth_d2[xzero]>0: plt.axvline(x=xzero, color='k')
last_local_minima=xzero
plt.legend(bbox_to_anchor=(0.5, 0.5))
plt.show()
threshold_redplane=last_local_minima
,mask=cv2.threshold(red_plane, threshold_redplane, 255 , cv2.THRESH_BINARY)
STEP 12 dilation_size=1 element=cv2.getStructuringElement(
cv2.MORPH_RECT,(2*dilation_size+1,
2*dilation_size+1), (dilation_size, dilation_size)) dilation_mask2 = cv2.dilate(mask, element)
# STEP 13
contours2, hierarchy2 = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE) for cnt2 in contours2:
cv2.drawContours(mask,[cnt2],0,255,-1)
STEP 15 cv2.imwrite('Mask2.bmp', mask)
STEP 15 mask2=cv2.imread('Mask2.bmp', cv2.IMREAD_UNCHANGED)
image2= cv2.bitwise_and(image1, mask=mask2)
#Display images
cv2.imshow("Initial",image)
cv2.imshow("Otsu",threshOtsu)
cv2.imshow("Mask1",mask1)
cv2.imshow("Image 1",image1)
cv2.imshow("Mask2",mask2)
cv2.imshow("Image 2",image2)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

Обсуждение результатов. Изображение, используемое в качестве входных данных для алгоритма, содержит большую область дыма (вверху слева) и область неба (вверху справа). Эти области могут быть обнаружены как ложноположительные участки возгорания. Они удаляются с помощью изображения бинарной маски, полученного путем применения порога к синей плоскости изображения. Репрезентативные изображения показаны ниже (рис. 2).

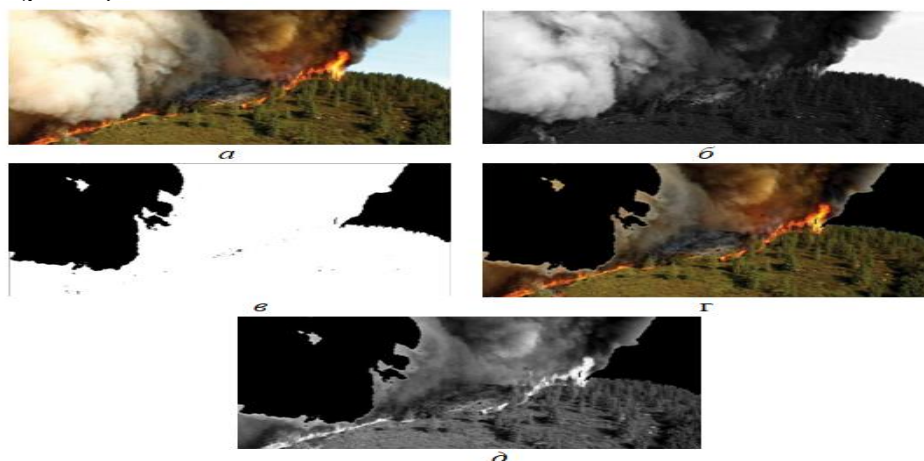


Рис. 2. Этапы обработки изображения (а – исходное изображение для алгоритма, б-в-наложение маски, г – исходное изображение с наложенной маской, д – выделение красного цвета изображения)

Fig. 2. Stages of image processing (a - the original image for the algorithm, b-c - masking, d - the original image with the applied mask, e - highlighting the red color of the image)

На рис. 3 представлено логарифмическое представление гистограммы красной плоскости, сгенерированной скриптом NI Vision Assistant. Произвольное пороговое значение отображается стрелкой.

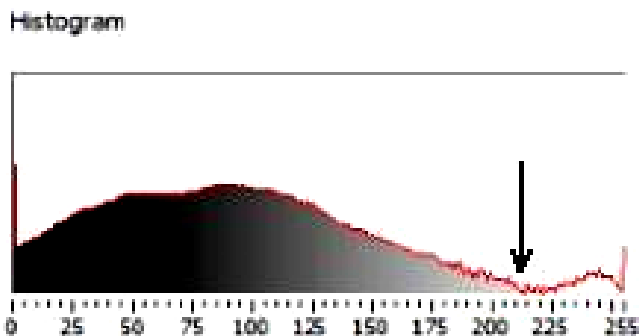


Рис. 3. Ручное пороговое значение NI Vision Assistant
 Fig. 3. NI Vision Assistant Manual Threshold

На рис. 4 представлено автоматическое определение порога на основе первой и второй производных сглаженной логарифмической гистограммы.

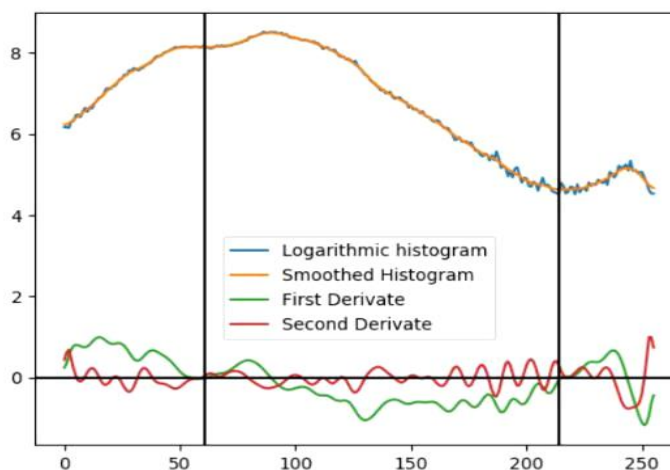


Рис.4. Порог, полученный с использованием кода Python
 Fig. 4. Threshold obtained using Python code

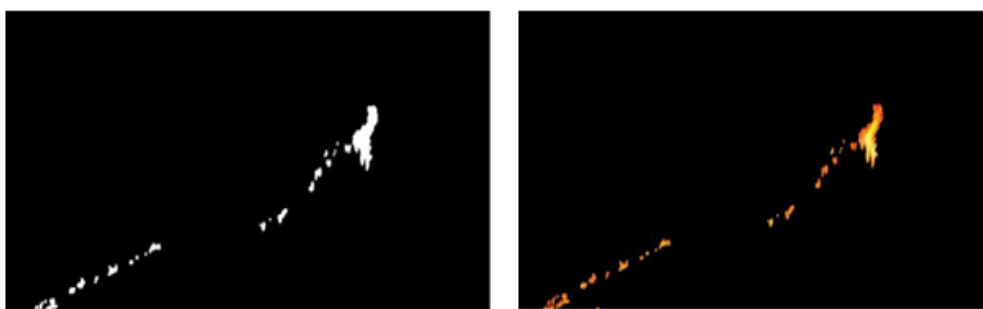


Рис. 5. Результаты наложения маски, примененной к исходному изображению
 Fig. 5. The results of overlaying a mask applied to the original image

На рис.5 показано обнаружение пожара, выполняемое последовательными бинарными масками, примененными к исходному изображению.

Вывод. Обнаружение пожара на цифровых изображениях - сложная задача. Наличие на изображении ясного неба, дыма и облаков может дать ложноположительные результаты.

Алгоритм обработки изображений, описанный в статье, использует анализ гистограмм соответствующих цветовых плоскостей, извлеченных из исходных изображений. Цветовые плоскости преобразуются в бинарные маски с помощью порогового метода. Различные сценарии обработки изображений разрабатываются с

помощью NI Vision Assistant, мощного программного инструмента. В работе также представлена реализация Python обнаружения пожара в изображении, которая подходит для различных устройств мониторинга.

Библиографический список:

1. Turgay Celic, Fast and Efficient Method for Fire Detection Using Image Precessing, ETRI Journal, Volume 32, Number 6, December 2010, pp. 881-890
2. Багутдинов Р.А. Разработка мультисенсорной системы для задач мониторинга и интерпретации разнородных данных / Системный администратор. 2019. № 3 (196). С. 82-85.
3. Багутдинов Р.А. Проектирование модульной мультисенсорной системы для задач мониторинга окружающей среды на базе Arduino / Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46. № 1. С. 173-180.
4. Островский О.А. Вопросы развития компьютерно-технической экспертизы и их взаимосвязь с телекоммуникациями / Право и государство: теория и практика. 2020. № 1 (181). С. 312-314.
5. Островский О.А. Извлечение информационных следов с мобильных устройств при расследовании преступлений в сфере компьютерной информации / Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук. 2018. № 7. С. 237-241.
6. Supriya Sameer Nalawade, Fire Detection System using RGB Color Model, International Journal of Engineering Science and Computing, May 2018, Volume 8, Issue #5, 1751. P.17518
7. Jing Shao, Guanxiang Wang, Wei Guo, An Image-Based Fire Detection Method Using Color Analysis, 2012 International Conference on Computer Science and Information Processing, P. 419-422
8. Ping-He Huang, Jing-Yong Su, Zhe-Ming Lu, Jeng-Shyang Pan, A Fire-Alarming Method Based on Video Processing, Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent, Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP'06), P. 359-364
9. Oluwarotimi Giwa, Abdsamad Benkrid, Fire detection in a still image using color information, <https://www.researchgate.net/publication/323723024> (дата обращения 04.01.2021).
10. Liping Zhu, Hongqi Li, Fenghui Wang, Jie Lv, Ali Sikandar, Hong Zhang, A Flame Detection Method Based on Novel Gradient Features, Intell. Syst. 2020; 29(1): P. 773–786, <https://doi.org/10.1515/jisys-2017-0562>
11. Uğur B., Töreyin, Yiğithan Dedeoğlu, Uğur Güdükbay, Enis Cetin A., Computer vision based method for real-time fire and flame detection, Pattern Recognition Letters 27 (2006). P. 49–58
12. Sushil Garg, Balaji R. Sharma¹, Kelly Cohen, Manish Kumar, A Fuzzy Logic Based Image Processing Method for Automated Fire and Smoke Detection, https://www.researchgate.net/publication/2583_40149 (дата обращения 04.01.2021).
13. Turgay Çelik, Hüseyin Özkaramanlı, Hasan Demirel, Fire and smoke detection without sensors: image processing based approach, 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007), Poznan, Poland, September 3-7, 2007, P. 1794-1798
14. Chunyu Yu, Zhibin Mei, Xi Zhang, A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm, Procedia Engineering, Volume 62, 2013, P. 891-898
15. Mehmet Sezgin, Bülent Sankur, Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. Journal of Electronic Imaging 13(1), 2004, P. 146–165

References:

1. Turgay Celic, Fast and Efficient Method for Fire Detection Using Image Precessing, ETRI Journal, Volume 32, Number 6, December 2010; 881-890.
2. Bagutdinov R.A. Development of a multisensor system for monitoring and interpretation of heterogeneous data [Sistemnyy administrator] *System administrator*. 2019; 3 (196): 82-85. (In Russ)
3. Bagutdinov R.A. Designing a modular multisensor system for environmental monitoring tasks based on Arduino. [Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika] *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Economics. Informatics*. 2019; 46(1): 173-180. (In Russ)
4. Ostrovsky O.A. Issues of development of computer-technical expertise and their relationship with telecommunications. [Pravo i gosudarstvo: teoriya i praktika] *Law and State: theory and practice*. 2020; 1 (181): 312-314. (In Russ)
5. Ostrovsky O.A. Extracting information traces from mobile devices in the investigation of crimes in the field of computer information. [Vestnik Tadzhijskogo natsional'nogo universiteta. Seriya sotsial'no-ekonomicheskikh i obshchestvennykh nauk] *Bulletin of the Tajik National University. A series of socio-economic and social sciences*. 2018; 7: 237-241. (In Russ)
6. Supriya Sameer Nalawade, Fire Detection System using RGB Color Model, International Journal of Engineering Science and Computing, May 2018; 8(5):1751-17518.

7. Jing Shao, Guanxiang Wang, Wei Guo, An Image-Based Fire Detection Method Using Color Analysis, 2012 International Conference on Computer Science and Information Processing, 2012; 419-422.
8. Ping-He Huang, Jing-Yong Su, Zhe-Ming Lu, Jeng-Shyang Pan, A Fire-Alarm Method Based on Video Processing, Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent, Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP'06), 2006; 359-364.
9. Oluwarotimi Giwa, Abdsamad Benkrid, Fire detection in a still image using color information, <https://www.researchgate.net/publication/323723024> (date of the application 04.01.2021)
10. Liping Zhu, Hongqi Li, Fenghui Wang, Jie Lv, Ali Sikandar, Hong Zhang, A Flame Detection Method Based on Novel Gradient Features, *Intell. Syst.* 2020; 29(1): 773–786, <https://doi.org/10.1515/jisys-2017-0562>
11. Uğur B., Töreyn, Yiğithan Dedeoğlu, Uğur Gündükbay, Enis Cetin A., Computer vision based method for real-time fire and flame detection, *Pattern Recognition Letters* 27. 2006; 49–58.
12. Sushil Garg, Balaji R. Sharma¹, Kelly Cohen, Manish Kumar, A Fuzzy Logic Based Image Processing Method for Automated Fire and Smoke Detection, <https://www.researchgate.net/publication/258340149> (date of the application 04.01.2021).
13. Turgay Çelik, Hüseyin Özkaramanlı, Hasan Demirel, Fire and smoke detection without sensors: image processing based approach, 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007), Poznan, Poland, September 3-7, 2007; 1794-1798.
14. Chunyu Yu, Zhibin Mei, Xi Zhang, A Real-time Video Fire Flame and Smoke Detection Algorithm, *Procedia Engineering*, 2013; 62: 891-898.
15. Mehmet Sezgin, Bülent Sankur, Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*. 2004; 13(1): 146–165

Сведения об авторах:

Багутдинов Равиль Анатольевич, аспирант, кафедра «Системотехника и управление в технических системах», e-mail: rav379@mail.ru

Степанов Михаил Федорович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах», e-mail: rav379@mail.ru

Information about the authors:

Ravil A. Bagutdinov, Postgraduate student, Department of "Systems Engineering and Control in Technical Systems", e-mail: rav379@mail.ru

Mihail F. Stepanov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of "Systems Engineering and Control in Technical Systems", e-mail: rav379@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 25.07.2021.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 07.08.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 10.08.2021.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
УДК 004.942
DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-68-72

Оригинальная статья / Original Paper

**Разработка модели информационной безопасности с применением
продукционной модели**

Ш.М. Джафарова

Сумгаитский государственный университет,
AZ5008, г. Сумгаит, 43-й квартал, Азербайджан

Резюме. Цель. Целью исследования является поиск методов решения проблемы обеспечения надежного уровня безопасности облачных сервисов. Продукционные модели можно считать наиболее распространенными моделями, обеспечивающими простоту представления знаний и организации логического вывода. **Метод.** Исследование основано на применении методов нечеткой логики. **Результат.** Предложено использование нечетких моделей, обеспечивающих гибкую стратегию обработки разнородных динамических взаимодействующих процессов, которые представляют данные и знания в существенно нечетком пространстве состояний объектов анализа. **Вывод.** Предложена продукционная модель управления информационной безопасностью, применяемая для создания центров обработки и хранения данных. В продукционную систему входит база правил, глобальная база данных и интерпретатор правил. Использование информационных ресурсов, работающих в неопределенной среде на основе продукционной модели позволяет обеспечивать информационную безопасность систем.

Ключевые слова: правила, модель, облачная технология, безопасность, продукционная система, нечеткие продукты

Для цитирования: Ш.М. Джафарова. Разработка модели информационной безопасности с применением продукционной модели. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 68-72 DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-68-72

Development of information security model with application of production model

Sh.M. Jafarova

Sumgait State University,
43 quarter, Sumgait AZ5008, Azerbaijan

Abstract. Objective. The purpose of the study is to find methods for solving the problem of ensuring a reliable level of security for cloud services. Production models can be considered the most common models that provide simplicity of knowledge representation and inference organization. **Method.** The research is based on the application of methods of fuzzy logic and mathematical modeling. **Result.** It is proposed to use fuzzy models that provide a flexible strategy for processing heterogeneous dynamic interacting processes that represent data and knowledge in an essentially fuzzy state space of objects of analysis. **Conclusion.** A production model of information security management is proposed, which is used to create data processing and storage centers. The production system includes a rule base, a global database, and a rule interpreter. The effective use of large information resources operating in an uncertain environment on the basis of a production model makes it possible to model and ensure information security of systems.

Keywords: rules, model, cloud technology, security, production system, fuzzy products

For citation: Sh.M. Jafarova. Development of an information security model using a production model. Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2021; 48 (3): 68-72 DOI: 10.21822 / 2073-6185-2021-48-3-68-72

Введение. Концепция облачных технологий предусматривает создание и использование инфраструктуры компьютерных технологий и программного обеспечения в прямой сетевой среде. Благодаря этой технологии пользовательские данные хранятся и обрабатываются в облачных системах, и, в то же время, с помощью браузеров запускаются программы обработки и просматриваются результаты. Инфраструктура системы облачных технологий предусматривает создание центров обработки и хранения данных с широким использованием кластеризации и виртуализации компьютерных вычислений и ресурсов памяти [1-4].

В настоящее время облачные технологии широко используются с большими вычислительными ресурсами и ресурсами памяти, необходимыми для решения сложных задач. В этом случае пользователям, работающим в разных организациях или на предприятиях, выгоднее использовать высокоскоростные каналы связи и услуги облачной системы. Передача данных таким образом создает основу для их слабой защиты. Потому такая информация обрабатывается вне ее владельцев.

Постановка задачи. В настоящее время проблема обеспечения высокого уровня безопасности облачных сервисов очень высока, и с этой точки зрения продукционное моделирование и исследование информационной безопасности в облачных технологиях является одним из ключевых вопросов.

Облачные технологии обычно позволяют создавать и использовать программное обеспечение компьютерных технологий в прямой сетевой среде. С помощью этой технологии пользовательские данные хранятся и обрабатываются в облачных системах и организуют работу программ обработки и просмотра результатов через определенные браузеры. В последнее время инфраструктура системы облачных технологий широко используется при кластеризации и виртуализации вычислительных ресурсов и ресурсов памяти компьютеров. Это обеспечивает создание центров обработки и хранения данных.

В настоящее время во всем мире проводятся интенсивные исследования по эффективному использованию вычислительных ресурсов и ресурсов памяти с помощью облачных технологий. Эффективное использование больших информационных ресурсов, работающих в неопределенной среде на основе этой технологии, среди пользователей сети и моделирования их безопасности является актуальным.

Методы исследования. В настоящее время наиболее часто используемыми сервисами в облачной системе являются:

1. Программное обеспечение как услуга (SaaS - Software-as-a-Service). Этот сервис считается новым шагом в развитии информационных технологий облачных вычислений. Первым шагом в этом направлении стало создание SaaS (программное обеспечение как услуга). Когда эта служба была создана заново, она применялась только в случае удаления резервных копий. Опыт, накопленный в этой области, заложил основу для использования сетей VPN (виртуальных частных сетей).
2. Инфраструктура как услуга (IaaS - Инфраструктура как услуга). Процесс создания инфраструктуры осуществляется здесь. Уровень IaaS позволяет внедрить услугу аренды инфраструктуры (вычислительные ресурсы и память). Для решения проблем на этом уровне создается компьютерная инфраструктура.
3. Платформа как услуга (PaaS-Платформа как услуга). Сервис PaaS - это виртуальная платформа, которая позволяет пользователям использовать операционные системы и специальные программные приложения (Apache, MySQL и т.д.), и базы данных, расположенные на виртуальных серверах. Здесь клиент также не управляет и не проверяет структуру облака как сеть, сервер. Он просто контролирует функциональное программное обеспечение, которое вы устанавливаете здесь [5].

Компьютерные теоретики и программисты утверждают, что будущее Интернета лежит в этой технологии. Ожидается, что в будущем жесткие диски будут заменены

онлайн-облаками, а функциональные приложения будут полностью использоваться через онлайн-сеть без какой-либо инфраструктуры.

Однако применение информационных технологий, таким образом, конечно, не исключает, что многие компании, обеспечивающие обмен информацией в обществе, столкнутся с юридическими проблемами. Потому что замена всех системных приложений открытой инфраструктурой увеличивает риск нежелательного доступа к личной информации. Форма открытого распространения данных в облачных технологиях показывает, что многие фирмы и компании, обменивающиеся информацией, столкнутся с проблемами безопасности. Потому что в этом случае, когда система работает с открытой инфраструктурой, возникает опасность нежелательного доступа к личной информации [6,7]. Передача данных в таком виде приводит к их слабой защите. Иногда, поскольку этот тип информации обрабатывается за пределами владельцев, их безопасность не обеспечивается.

Продукционная модель, предназначенная для управления информационной безопасностью в облачных технологиях, реализуется в несколько этапов. На этом этапе анализируются как технология обработки, так и хранение, и защита данных.

Модель управления информационной безопасностью разработана в облачной технологии (рис. 1) в соответствии с нечеткими правилами производства:

(СО) - система открывается, (ПО) - почта открывается, (СЗ) - система закрывается, (ПЗ) - почта закрыта, (ПП) - пароль введен правильно, (НП) - неверный ввод пароля. [8,9]:

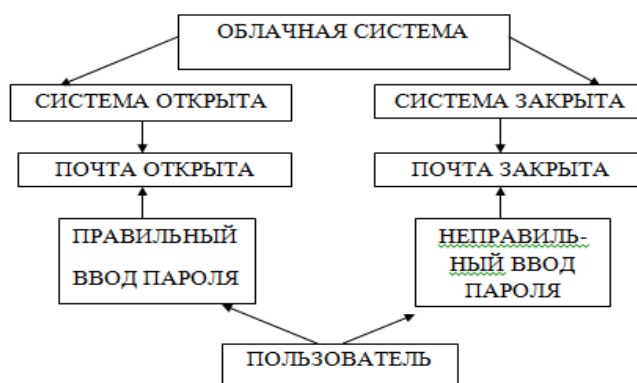


Рис. 1. Модель управления информационной безопасностью

Fig. 1. Information security management model

Обсуждение результатов. Особенностью нечетких моделей является то, что они должны обеспечивать гибкую стратегию обработки разнородных динамических взаимодействующих процессов, которые представляют данные и знания в существенно нечетком пространстве состояний объектов анализа.

Динамические взаимодействующие процессы описываются числовыми и лингвистическими переменными. В связи с этим, нечеткие модели ориентированы на моделирование элементов системы на уровне лингвистических термов (нечетких множеств); характеристики системы описывается в лингвистическом формате; представление и обработка данных в условиях неопределенности.

Нечеткие модели базируются на правилах, являющиеся наглядным и эффективным средством представления взаимодействующих динамических процессов. Они отображают данные и знание в виде «ЕСЛИ...ТО». Здесь правило «ЕСЛИ» - называется посылкой, а «ТО» выводом или действием.

В общем виде продукция выражается в следующем виде [10]:

$$(i): W; P; A \Rightarrow B, S, F, N$$

где i – имя продукции; W – характеризует сферу применения продукции;

$A \Rightarrow B$ – ядра и важная составляющая продукций; P – определяет условие применимости ядра продукции; S – метод определения количественных значений степени точности результата ядра; F – коэффициент точности нечетких продуктов; n – определяет постусловие продукции.

В реальных конструкциях ядра составляющая A характеризуется сложной структурой, включающей также некоторые предикаты, логические операции типа *NOT*, *AND*, *OR* и их производные.

Рассмотрим структуру правила продукции в четком представлений знаний:

$$\text{ЕСЛИ } A_1 \text{ и } A_2 \text{ и } \dots \text{ и } A_n \text{ ТО } B. \quad (1)$$

Такая запись означает, что «если все условия от A_1 до A_n являются истиной, то B также истина» или же «когда все условия от A_1 до A_n становятся истиной, то следует выполнить действие B ».

Выражение (1) на языке булевой логики имеет вид:

$$B = TRUE / (A_1 \text{ and } A_2 \text{ and } \dots \text{ and } A_n) = TRUE. \quad (2)$$

Аналогично (1), (2) можно показать справедливость соответствующих решений для правил продукций и содержащих операции *НЕ*, *ИЛИ*, и их производные. Выражение (1) и (2) в нечетком представлении определяется следующим образом:

$$\text{IF } \overline{A_1} \text{ is } \mu_{\overline{A_1}}(k) \text{ and } \overline{A_2} \text{ is } \mu_{\overline{A_2}}(k) \text{ and } \dots \text{ and } \overline{A_n} \text{ is } \mu_{\overline{A_n}}(k)$$

$$\text{THEN } B \text{ is } \mu_{\overline{B}}(k).$$

$$\overline{B} = TRUE \mid [(\overline{A_1} \text{ and } \overline{A_2} \text{ and } \dots \text{ and } \overline{A_n}) = TRUE]$$

$$\text{and } [\mu_{\overline{A_1}}(k_1) \geq \mu_{\overline{A_1}}(k_1)^*] \text{ and } [\mu_{\overline{A_2}}(k_1) \geq \mu_{\overline{A_2}}(k_1)^*] \text{ and}$$

$$\dots \text{ and } [\mu_{\overline{A_n}}(k_1) \geq \mu_{\overline{A_n}}(k_1)^*] \text{ and } [\mu_{\overline{B}}(k_1) \geq \mu_{\overline{B}}(k_1)^*],$$

где $\mu_{\overline{A_1}}(k_1)^*, \mu_{\overline{A_2}}(k_1)^*, \dots, \mu_{\overline{A_n}}(k_1)^*, \mu_{\overline{B}}(k_1)^*$ – допустимое значение соответствующих функций принадлежности.

Модель управления информационной безопасностью в виде продукции была разработана в соответствии с нечеткими правилами продукции:

ЕСЛИ система открыта (СО) **И** почта, подключенная к системе, открыта (ПО), **ТО** надо вводить пароль. **ЕСЛИ** введенный пароль был введен правильно (ПП), **ТО** система будет готова к использованию.

ЕСЛИ система была открыта (ПО) **И** почта, подключенная к системе, была закрыта (ПЗ), **ТО** пароль не вводится.

ЕСЛИ система была открыта (СО) **И** почта, подключенная к системе, была открыта (ПО), **ТО** пароль вводится. **ЕСЛИ** введенный пароль был введен неправильно (НП), **ТО** система не будет готова к использованию.

ЕСЛИ система была закрыта (СЗ) **И** почта, подключенная к системе, была открыта (ПО), **ТО** система не будет готова к использованию.

Вывод. В состав продукционной системы входит база правил, глобальная база данных и интерпретатор правил.

Значение базы правил – это область памяти, которая содержит базу знаний. Совокупность знаний, представляется в форме правил вида «**ЕСЛИ** ... **ТО**».

База данных у различных систем имеют различную форму. Но все они могут быть описаны как группа данных, содержащих имя данных и значение атрибутов.

Продукционная система включает в себя интерпретатор правил, который представляет механизм влияния, и является неотъемлемой частью системы, использующей базу правил и базу данных, формирующих результат.

Библиографический список:

1. Alguliyev R.M., Alekperov R.K. Cloud Computing: Modern State, Problems and Prospects // Telecommunications and Radio Engineering, 2013, vol.72, no.3, pp. 255-266.
2. Aliyev A.A., Samadov R.B. Developing an algorithm and a scheme for integration of multiple merchants to e-commerce solution in cloud computing // «International Journal of Computer Science and Information Security», USA, 2016, Vol.14, № 11, P. 7-11.
3. B. Furht, A. Escalante (eds.), Handbook of Cloud Computing, Springer
4. Mell P., Grance T. The NIST definition of cloud computing, 2010, www.nist.gov/itl/cloud/upload/cloud-def-v15.pdf
5. Клементьев И.П., Устинов В.А. Введение в Облачные вычисления. Екатеринбург: УрГУ, 2009. 233с.
6. Баранова Е.К. Информационная безопасность и защита информации: Учебное пособие / Е.К. Баранова, А.В. Бабаш. - М.: Риор, 2017. - 400 с.
7. Каретников А.В. Безопасность облачных вычислений. Проблемы и перспективы / А.В. Каретников, Д.П. Зегжда // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2011. № 4. С. 7-17.
8. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем. Монография (научное издание). Днепропетровск: Системные технологии, 2005, 311 с.
9. Jafarova S.H. Development of cloud service safety modeling software/ 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, "Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates" February 4-5, 2021. – (Dnipro, Ukraine, 2021. – P.1. – 502 p.), p-42-44
10. Мустафаев В.А. Анализ нечетких продукционных моделей динамических взаимодействующих процессов// Вестник компьютерных и информационных технологий, Москва, 2012, №5, с. 25-30.

References:

1. Alguliyev R.M., Alekperov R.K. Cloud Computing: Modern State, Problems and Prospects // Telecommunications and Radio Engineering, 2013, vol. 72, no. 3, pp. 255-266.
2. Aliyev A.A., Samadov R.B. Developing an algorithm and a scheme for integration of multiple merchants to e-commerce solution in cloud computing/ *International Journal of Computer Science and Information Security*, USA. 2016; 14(11):7-11.
3. B. Furht, A. Escalante (eds.), Handbook of Cloud Computing, Springer.
4. Mell P., Grance T. The NIST definition of cloud computing, 2010, www.nist.gov/itl/cloud/upload/cloud-def-v15.pdf
5. Klementyev I.P., Ustinov V.A. Introduction to Cloud Computing. Yekaterinburg: USU, 2009; 233. (In Russ)
6. Baranova E.K. Information security and information protection: Textbook / E.K. Baranova, A.V. Babash. - M.: Rior, 2017. 400 p. (In Russ)
7. Karetnikov A.B. Cloud computing security. Problems and Prospects / A.B. Karetnikov, D.P. Zegzhda. *Journal "Problems of information security. Computer systems"*. SPb.: Publishing house of Polytechnic University, 2011; 4:7-17. (In Russ)
8. Bodyansky E.V., Kucherenko E.I., Mikhalev A.I. Neuro-fuzzy Petri nets in the problems of modeling complex systems. Monograph (scientific edition). Dnepropetrovsk: System technology, 2005; 311.
9. Jafarova S.H. Development of cloud service safety modeling software / 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, "Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Winter Debates" February 4-5, 2021. (Dnipro, Ukraine, 2021; 1: 502 p.) 2021; 42-44.
10. Mustafayev V.A. Analysis of fuzzy production models of dynamic interacting processes. // Bulletin of computer and information technologies, Moscow, 2012; 5:25-30. (In Russ)

Сведения об авторе:

Джафарова Шалала Мехти, старший преподаватель, доктор философии по технике, кафедра «Информационная технология и программирование», e-mail: salala.cafarova@mail.ru, ORCID 0000-0001-9707-3481

Information about the authors:

Shalala M. Jafarova, Senior Lecturer, Dr. (Eng.) Philosophy, Department of Information Technology and Programming, e-mail: salala.cafarova@mail.ru, ORCID 0000-0001-9707-3481

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.08.2021.

Одобрена после рецензирования Revised 30.08.2021.

Принята в печать/ Accepted for publication 01.09.2021.

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

УДК 658.531.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Оригинальная статья / Original Paper

**Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего
оборудования для атомных электростанций методом моделирования**

И.А. Лоскутов^{1,2}

¹Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга,
информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)),

²Политехнический колледж им. Н.Н. Годовикова,

¹107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,

²125130, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских, 19, Россия

Резюме. Цель. Современный мир связан с электроэнергетикой и находится в явной зависимости от нее. Количество потребителей растет по экспоненте, возникает проблема долгосрочного планирования потребления электричества, наблюдается увеличение ее цены. С целью минимизации затрат предприятий было высказано предположение о рациональности увеличения количества атомных электростанций (АЭС). При рассмотрении сроков возведения атомных комплексов была выявлена чрезмерная длительность изготовления силового и управляющего оборудования для АЭС. С целью сокращения временных затрат было предложено нормировать работу сборочно-монтажных и упаковочных производственных объединений. **Метод.** Исследования в данной области практически не проводились и носили, зачастую, эпизодический характер. Изначально считалось, что операции технологического процесса изготовления указанного оборудования рационально нормировать классическими методами, однако в предыдущих работах автора был предложен новый подход, базирующийся на анализе характеристик занятого в техпроцессе сотрудника, специфике вида операционной работы, а также различных возмущающих факторов, негативно влияющих на срок изготовления. Далее проводится систематизация полученных данных и их дальнейшее моделирование. **Результат.** В работе показано выведение заключительного уравнения сборки каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС. Было дано обоснование применяемых методов, указана целевая аудитория, учтена нормативно-правовая база. Кроме того показаны результаты предшествующих работ, на основании которых и строилась математическая модель. Отдельно были даны рекомендации по поводу дополнительного использования функционала полученного уравнения. **Вывод.** Уравнение, полученное в работе, позволяет с максимальной точностью рассчитать время, затраченное на сборку каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС. Принципы, показанные в работах по направлению можно использовать и на другие области, имеющие похожую направленность с минимальным изменением выведенной модели.

Ключевые слова: каркас, сборка, модель, техпроцесс, нормирование, оборудование, АЭС

Для цитирования: И.А.Лоскутов. Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС методом моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 73-82. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Normalization of assembly technical process of the frame of power and control equipment for nuclear power plants by the method of simulation

I.A. Loskutov^{1,2}

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation 'Space Monitoring Systems, Electromechanical Complexes' ('VNIEM Corporation' JC),

²N.N. Godovikova Polytechnic College,

30 Volnaya Str., p. 10, Moscow 107078, Russia,

N.N. Godovikova Polytechnic College,

19 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh Str., Moscow 125130, Russia

Abstract. Objectives. The modern world is associated with a clear dependence on it. The number of consumers is growing exponentially. In order to minimize the costs of enterprises, an assumption was made about the rationality of the number of nuclear power plants. When considering the timing of the construction of nuclear complexes, an excessive duration of the manufacture of power and control equipment for nuclear power plants was revealed. In order to reduce time costs, it was proposed to standardize the work of assembly, assembly and packaging production associations. **Method.** Research in this area was practically not carried out and were, often, of an episodic nature. Initially, it was believed that the operations of the technological process of manufacturing equipment should be rationalized by classical methods, however, in the previous works of the author, a new approach was proposed, based on the analysis of the characteristics of the employee employed in the technical process, the specifics of the type of operational work, as well as various disturbing factors that negatively affect the production time. Then the systematization of the obtained data and their further modeling is carried out. **Results.** The paper shows the derivation of the final equation for the assembly of the frame of power and control equipment for nuclear power plants. The substantiation of the applied methods was given, the target audience was indicated, the regulatory framework was taken into account. In addition, the results of previous works are shown, on the basis of which the mathematical model was built. Separately, recommendations were given on the additional use of the functions of the resulting equation. **Conclusion.** The equation obtained in the work makes it possible to calculate with maximum accuracy the time spent on assembling the frame of the power and control equipment for a nuclear power plant. The principles shown in other works can be used in an area that has directionality with minimal model change.

Key words: frame, assembly, model, technical process, standardization, equipment, NPPs

For citation: I.A. Loskutov. Normalization of assembly technical process of the frame of power and control equipment for nuclear power plants by the method of simulation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 73-82. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82

Введение. Было предпринято немало попыток создания универсального уравнения, учитывающего большинство параметров и факторов производства, занятого созданием оборудования для АЭС. Выбор данного направления исследования был не случаен. Развитие отрасли и увеличение количества АЭС наблюдается во многих странах мира. Общая тенденция, показанная в работе [1] это подтверждает. Аналогичный вывод можно сделать, рассмотрев график изменения количества АЭС по годам [2].

Постановка задачи. Основная проблема поставленной задачи была связана с получением модели, максимально лишенной погрешностей и неточностей.

Как и логично предположить, техпроцесс изготовления такого оборудования весьма сложный, поэтому появилась необходимость разбить его на этапы, как это и происходит на реальном производстве. В данной статье будет показано уравнение базового компонента силового и управляющего оборудования для АЭС – каркаса. Однако

для начала стоит указать, на чем основываются доводы, принципы построения модели и эмпирическую базу исследования.

Методы исследования. Выведение универсального уравнения велось весьма продолжительное время. В частности, базой для дальнейшего построения служили ранние наработки [3-7], в которых постепенно были проведены первоначальные попытки нормирования сборочного техпроцесса каркаса.

С целью удобства отображения модели для пользователя (специалиста в области нормирования, начальника участка или других заинтересованных лиц) было решено выводить уравнение в циклическом виде.

Действительно, как показывает практика, применять суммирующие значения по принципам показанным, например, в [8], крайне не практично, вследствие отсутствия какой-нибудь конкретики об изготавливаемых объектах, внутренних зависимостях и т.п.:

$$T_i = f(M, N_T, C) \quad (1)$$

где:

T_i – время изготовления объекта

M – материалоемкость

N_T – количество технологических операций

C – сложность технологических операций при изготовлении объекта

Кроме того, цикличная форма близка к программной реализации (потенциальный задел для последующего составления модели в компьютерной среде) [9].

Далее необходимо объяснить, о каком оборудовании идет речь, с целью избавления от разногласий по поводу конструктивных соображений.

Под силовым и управляющим оборудованием в настоящей работе понимаются изделия типа «шкаф», иллюстративно показанные в работах [10-11] габаритов 600*800*2000 – однодверный или 800*800*2000 – двухдверный. Дополнительное описание функционирования и компонентного состава отмечено в [12-13].

За основу принципа построения уравнения сборки каркаса была взята модель типа «Вход» – «Выход», наиболее подробно, по мнению автора, показанная в отечественных работах [14, с.12-15], [15, с.41-46] и иностранной литературе [16, с.3-4] и [17, с.11-14].

В соответствии с концепцией была выведена следующая графическая зависимость, рис.1:

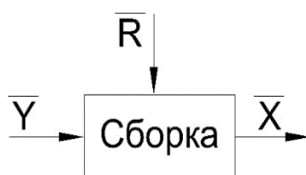


Рис.1. Графическая интерпретация модели типа «Вход» – «Выход» сборочного процесса
Fig. 1. Graphic interpretation of the model of the "Input" - "Output" type of the assembly process

где: X – готовое изделие/ ready product

Y – входной параметр/ input parameter

R – возмущающий параметр/ disturbing parameter

Вследствие принадлежности каркаса, как основы оборудования, к изделиям атомных комплексов, на него распространяются требования ГОСТ 29075-91 [18], которые были учтены, совместно с требованиями, показанными в уже упомянутой работе [11] и требованиями по качеству [19]. Кроме того, также были приняты во внимание комментарии со стороны МАГАТЭ относительно некоторых аспектов качества [20].

Обсуждение результатов. Как уже было отмечено, работа проводилась в несколько этапов. Поэтому, приняв во внимание базовые параметры из [3] и дополнения элементов в [6] были получены следующие важные уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j} \\ l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k} \\ \bar{X} = \bar{Z} + \sum_{\varphi=1}^{2\tau} (\bar{Q} + N_{\varphi}) \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} < \bar{Z} \\ \bar{Z}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{Z} = F_{\min}(\bar{Z}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \\ \text{Если } \bar{W} \geq \bar{Z} \\ \bar{Z} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{Z} \geq \bar{Q} \\ \bar{Q} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{Z} < \bar{Q} \\ \bar{Q}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \bar{Q} = F_{\min}(\bar{Q}_k - (\bar{W} - \bar{Z}) > 0) \rightarrow 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

А также:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j} \\ l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k} \\ \bar{T} = \bar{P} + \sum_{\varphi=1}^{2\tau} (\bar{S} + N_{\varphi}) \\ L_j^{i_j-\vartheta} - \text{первый элемент итерации } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega \\ L_k^{l_k-\rho} - \text{первый элемент итерации } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega \\ \text{Когда } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до} \\ L_{j-1}^{i_{j-1}-\vartheta} \in [0 : \bar{P}_j \leq 28800 \cdot \omega] = 1 \\ \text{Когда } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до} \\ L_{k-1}^{l_{k-1}-\rho} \in [0 : \bar{S}_k \leq 28800 \cdot \omega] = 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{P} > 28800 \\ \bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ v_m = F_{\max}(\bar{P}_j - 28800 - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi}) < 0; \\ \bar{P} = 28800(m-1) + v_m \\ \text{Если } \bar{S} > 28800 - v_m \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ u_n = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0; \\ \bar{S} = 28800(n-1) + u_n \\ \text{Если } \bar{S} \leq 28800 - v_m \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{P} \leq 28800 \\ \bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{S} > 28800 - \bar{P} \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ u_n = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0; \\ \bar{S} = 28800(n-1) + u_n \\ \text{Если } \bar{S} \leq 28800 - \bar{P} \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3)$$

Далее необходимо объединить отмеченные уравнения (2) и (3). Для этого примем один из вариантов входных переменных:

$$\begin{cases} \bar{Z} \rightarrow \bar{P} \\ \bar{Q} \rightarrow \bar{S}, \\ \bar{X} \rightarrow \bar{T} \end{cases}$$

В результате проверка остановки основной работы будет осуществляться по следующим условиям:

$$\text{Если } \bar{P} > 28800, \text{ то: } \bar{P} = 28800(m - 1) + v_m \quad (4)$$

Иначе – необходимо определить количество полных дней путем целочисленного деления. Остаточная часть также будет рассчитываться с целью определения времени остановки по следующему закону:

$$\begin{aligned} m &= \left\lfloor \frac{\bar{W}}{28800} \right\rfloor \\ \lambda &= \bar{W} - m \cdot 28800 \\ \lambda_* &= F_{\min}(\bar{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Сумма элементов определится путем перемножения количества дней, высчитанных из времени остановки и остатка λ_* :

$$\bar{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \quad (6)$$

Объединив (4) и (6) получится:

$$\begin{cases} \text{Если } \bar{W} \geq \bar{P} \\ \bar{P} = 28800(m - 1) + v_m \\ \text{Если } \bar{W} < \bar{P} \\ m = \left\lfloor \frac{\bar{W}}{28800} \right\rfloor \\ \lambda = \bar{W} - m \cdot 28800 \\ \lambda_* = F_{\min}(\bar{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \\ \bar{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \end{cases} \quad (7)$$

В случае, когда $\bar{P} \leq 28800$, при условии, что остановка происходит после сборки каркаса:

$$\bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \quad (8)$$

А если $\bar{W} < \bar{P}$, то:

$$\begin{aligned} \bar{P}_j &= \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{P} &= F_{\min}(\bar{P}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Объединив (8) и (9) получится:

$$\begin{cases} \text{Если } \bar{W} \geq \bar{P} \\ \bar{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \text{Если } \bar{W} < \bar{P} \\ \bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\varsigma_{j-1}}^{\varsigma_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\varsigma_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} \\ \bar{P} = F_{\min}(\bar{P}_j - \bar{W} > 0) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (10)$$

Проверка остановки дополнительной работы будет определяться следующим образом: если время остановки превышает время основной работы, то происходит переход к дополнительной работе, которая бывает:

$$\begin{aligned} \text{А) Если } \bar{S} &\leq 28800 - v_m \\ \text{А1) Если } \bar{W} - \bar{P} &\geq \bar{S}, \text{ то, } \bar{S} = 28800(n - 1) + u_n \end{aligned} \quad (11)$$

А2) Если $\bar{W} - \bar{P} < \bar{S}$, то необходимо учесть остаток λ_* . Для этого проводится поиск максимального значения первой итерации:

$$\lambda_1 = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \quad (12)$$

Затем вычисляется количество полных дней до преждевременной остановки, без λ_1 :

$$n = \left\lfloor \frac{\bar{W} - \bar{P} - \lambda_1}{28800} \right\rfloor \quad (13)$$

Остаток от целочисленного деления находится по:

$$\lambda_2 = \bar{W} - \bar{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \quad (14)$$

Реальное время $\bar{S}$ определим по:

$$\bar{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \quad (15)$$

Далее объединим наработки (11) - (15):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S} \\ \bar{S} = 28800(n - 1) + u_n \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{P} < \bar{S} \\ \lambda_1 = F_{\max}(\bar{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \\ n = \left\lfloor \frac{\bar{W} - \bar{P} - \lambda_1}{28800} \right\rfloor \\ \lambda_2 = \bar{W} - \bar{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\ \lambda_3 = F_{\min}(\bar{S}_k - \sum_{\gamma=0}^{n-1} u_{\gamma} - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\ \bar{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \end{array} \right. \quad (16)$$

Б) Если $\bar{S} > 28800 - \bar{P}$

Б1) Когда $\bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S}$:

$$\bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \quad (17)$$

Б2) Когда $\bar{W} - \bar{P} < \bar{S}$:

$$\bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \quad (18)$$

$$\bar{S} = F_{\min}(\bar{S}_k - \bar{W} - \bar{P} > 0) \rightarrow 0$$

Объединив (17) и (18):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } \bar{W} - \bar{P} \geq \bar{S} \\ \bar{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \text{Если } \bar{W} - \bar{P} < \bar{S} \\ \bar{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\ \bar{S} = F_{\min}(\bar{S}_k - \bar{W} - \bar{P} > 0) \rightarrow 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

Учитывая все вышепоказанные наработки, можно вывести полное уравнение сборки каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС:

$$i_j = \sum_{\omega=1}^{27} x_j + 2J_{1j}$$

$$l_k = \sum_{\eta=1}^{27} q_k + 2J_{1k}$$

$$\bar{T} = \bar{P} + \sum_{\varphi=1}^{27} (\bar{S} + N_{\varphi})$$

$$L_j^{i_j-\vartheta} - \text{первый элемент итерации } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega$$

$$L_k^{l_k-\rho} - \text{первый элемент итерации } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega$$

$$\text{Когда } \bar{P}_j > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{i_1} \text{ до } L_{j-1}^{i_{j-1}-\vartheta} \in [0 : \bar{P}_j \leq 28800 \cdot \omega] = 1$$

$$\text{Когда } \bar{S}_k > 28800 \cdot \omega, \text{ где: } \omega \in N^*, Z_+, \text{ элементы от } L_1^{l_1} \text{ до } L_{k-1}^{l_{k-1}-\rho} \in [0 : \bar{S}_k \leq 28800 \cdot \omega] = 1$$

Если $\bar{P} > 28800$

$$\bar{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta}$$

$$v_m = F_{\max}(\bar{P}_j - 28800 - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi}) < 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Если } \overline{W} \geq \overline{P} \\
 \overline{P} = 28800(m-1) + v_m \\
 \text{Если } \overline{W} < \overline{P} \\
 m = \left\lfloor \frac{\overline{W}}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda = \overline{W} - m \cdot 28800 \\
 \lambda_* = F_{\min}(\overline{P} - \sum_{\Phi=0}^{m-1} v_{\Phi} - \lambda > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{P} = 28800 \cdot m + \lambda_* \\
 \text{Если } \overline{S} > 28800 - v_m \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 u_n = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0 \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = 28800(n-1) + u_n \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \lambda_1 = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \lambda_*) < 0 \\
 n = \left\lfloor \frac{\overline{W}-\overline{P}-\lambda_1}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda_2 = \overline{W} - \overline{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\
 \lambda_3 = F_{\min}(\overline{S}_k - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \\
 \text{Если } \overline{S} \leq 28800 - v_m \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \overline{S} = F_{\min}(\overline{S}_k - \overline{W} - \overline{P} > 0) \rightarrow 0 \\
 \text{Если } \overline{P} \leq 28800 \\
 \text{Если } \overline{W} \geq \overline{P} \\
 \overline{P} = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\theta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=c_{j-1}}^{c_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{c_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\theta} \\
 \text{Если } \overline{W} < \overline{P} \\
 \overline{P}_j = \sum_{j=1}^{27} \sum_{\theta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_j^{i_j-\theta} + \sum_{j=28}^{33} \sum_{\delta=c_{j-1}}^{c_j} t_j \prod_{\xi=28}^j L_j^{c_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{27} L_{\psi}^{x_{\psi}-\theta} \\
 \overline{P} = F_{\min}(\overline{P}_j - \overline{W} > 0) \rightarrow 0 \\
 \text{Если } \overline{S} > 28800 - \overline{P} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 u_n = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y) < 0 \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = 28800(n-1) + u_n \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \lambda_1 = F_{\max}(\overline{S}_k - 28800 - \overline{P}) < 0 \\
 n = \left\lfloor \frac{\overline{W}-\overline{P}-\lambda_1}{28800} \right\rfloor \\
 \lambda_2 = \overline{W} - \overline{P} - \lambda_1 - n \cdot 28800 \\
 \lambda_3 = F_{\min}(\overline{S}_k - \sum_{Y=0}^{n-1} u_Y - \lambda_1 - \lambda_2 > 0) \rightarrow 0 \\
 \overline{S} = 28800 \cdot n + \lambda_3 \\
 \text{Если } \overline{S} \leq 28800 - \overline{P} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} \geq \overline{S} \\
 \overline{S} = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \text{Если } \overline{W} - \overline{P} < \overline{S} \\
 \overline{S}_k = \sum_{k=1}^{27} \sum_{\rho=l_{k-1}}^{l_k} t_k \prod_{\sigma=1}^k L_k^{l_k-\rho} + \sum_{k=28}^{33} \sum_{\alpha=v_{k-1}}^{v_k} t_k \prod_{\beta=28}^k L_k^{v_k-\alpha} \prod_{\theta=1}^{27} L_{\theta}^{q_{\theta}-\rho} \\
 \overline{S} = F_{\min}(\overline{S}_k - \overline{W} - \overline{P} > 0) \rightarrow 0
 \end{array} \right. \quad (20)$$

Вывод. Выведенное уравнение с максимальной точностью позволяет рассчитать время, затраченное на сборочные операции техпроцесса изготовления каркаса силового и управляющего шкафов для АЭС. Кроме того, если учесть такие параметры, как тип управления [21] и организационная структура отдела / цеха и т.п. [22], путем составления коэффициентов влияния на указанную модель, можно подобрать, при необходимости, оправданный путь модернизации структуры управления предприятия в целом.

Библиографический список:

1. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. и др. – Париж, Лондон, Вашингтон, июль 2014, 158с.
2. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes - Режим доступа: <https://pris.iaea.org/pris/>, свободный (Дата обращения 25.09.2021)
3. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС // Журнал исследований по управлению – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №6, с. 29-42
4. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Второе приближение // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.2. с.12-19
5. Лоскутов И.А. Определение нормированного времени сборки устройств для АЭС с учетом временных особенностей рабочих смен // Журнал исследований по управлению – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №8, с. 24-32
6. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудование на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Третье приближение // Журнал исследований по управлению – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №10, с. 46-54
7. Лоскутов И.А. Учет обнуления усталости в уравнении нормирования времени сборки каркаса оборудования для АЭС // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции / под ред. С.У. Увайсов – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018, с.456-463
8. Кравченко П.Д., Косогова Ю.П. Оценка фактора времени в технических системах на примере изготовления изделий тяжелого и атомного машиностроения // Инженерный вестник Дона, 2020, №3, 13с.
9. Yaguang Yang. Cycling problems in linear programming // Optimization and Control (math.OC) – Ithaca: Cornell University, 20.07.2021, 13с. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2101.01805v1>, свободный (Дата обращения 24.09.2021)
10. Крутикова Л.П. и др. Применение средств автоматизации при проектировании и производстве электрооборудования для АЭС с широким использованием кооперации // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 2004. Том 101. С.35-44
11. Лоскутов И.А. Стандарты, применяемые при разработки силового и управляющего оборудования для АЭС // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020, №1, с.144-150
12. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов ВВЭР-440 - Режим доступа: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, свободный (Дата обращения 07.01.2021)
13. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 - Режим доступа: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, свободный (Дата обращения 07.01.2021)
14. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления – Томск, Томский политехнический университет, 2011, 197с.
15. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 493с.
16. Trentelman H.L., Stoorvogel A.A., Malo H. Control theory for linear systems – Berlin, Springer, ISBN 978-1-4471-0339-4, 2001, 389p.
17. Sontag E.D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition /

- E.D. Sontag – New York: Springer, 1998, 530p.
18. ГОСТ 29075-91 Системы ядерного приборостроения для атомных станций. Общие требования
19. Гродзенский С.Я. Управление качеством: учебник. – 2-е изд. М.: Проспект, 2018 – 320с.
20. Quality assurance standards: comparison between IAEA 50-C/SG-Q and ISO 9001:1994 – Вена: IAEA, 2000 – 34с.
21. Лоскутов И.А. Выбор типа управления на производстве, занимающегося разработкой оборудования в области мирного атома // Вестник КемРИПК – Кемерово, 2018, Т.3. с.18-26
22. Лоскутов И.А. Организационные структуры управления на предприятиях, занимающихся разработкой оборудования для АЭС // Журнал исследований по управлению – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. Т.4. №.4, с. 40-46.

References:

1. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. и др. – Paris, London, Washington, July 2014; 158.
2. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes - Access mode: <https://pris.iaea.org/pris/>, free (Date of treatment 25.09.2021)
3. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(6):29-42. (In Russ)
4. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs. second approximation [Vestnik KemRIPK] *Bulletin of KemRIPK* – Kemerovo, 2018; 2:12-19(In Russ)
5. Loskutov I.A. Determination of the normalized assembly time for devices for NPPs, taking into account the temporary features of work shifts. [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(8): 24-32. (In Russ)
6. Loskutov I.A. Definition of standard working time of assembly of the frame power and / or control, including radioelectronic equipment at the enterprises involved in the development of products for NPPs. Third approximation. [Zhurnal issledovaniy po upravleniyu] *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018;4(10): 46-54.
7. Loskutov I.A. Accounting for zero fatigue in the equation of normalization of the time of assembly of the frame of equipment for NPPs . Innovative, information and communication technologies: proceedings of the XV International scientific-practical conference. / under edited by S.W. Uvaisov –M: *Association of alumni and staff vvia im. prof. Zhukovsky*, 2018; 445-450 (In Russ)
8. Kravchenko P.D., Kosogova Yu.P. Estimation of the time factor in technical systems on the example of the manufacture of products of heavy and nuclear engineering. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*, 2020; 3:13. (In Russ)
9. Yaguang Yang. Cycling problems in linear programming // Optimization and Control (math.OC) – Ithaca: Cornell University, 20.07.2021; 13. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2101.01805v1>, free (Date of treatment 24.09.2021)
10. Krutikova L.P. and others. Application of automation tools in the design and manufacture of electrical equipment for nuclear power plants with widespread use of cooperation . Questions of electromechanics. *VNIIEM Proceedings*. – M: VNIIEM. 2004;101: 35-44 (In Russ)
11. Loskutov I.A. Standards used in the development of power and control equipment for NPPs / Fundamental and applied problems of engineering and technology – Orel: Oryol State University named after I.S Turgenev, 2020; 1: 144-150 (In Russ)
12. Joint-stock company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information Control and Electromechanical Complexes» named after A.G. Iosifyan / CPS electrical equipment for VVER-440 reactors. Access mode: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, free (Date of treatment 01.07.2021)
13. Joint-stock company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information Control and Electromechanical Complexes» named after A.G. Iosifyan / CPS electrical equipment for VVER-1000, VVER-1200 reactors – Access mode: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63, free (Date of treatment 01/07/2021) (In Russ)
14. Dyadik V.F., Baidali S.A., Krinitsyn N.S. Automatic control theory – Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011; 197. (In Russ)
15. Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. Theory of automatic control of technical systems – M., MSTU named after N.E. Bauman, 1993; 493. (In Russ)

16. Trentelman H.L., Stoorvogel A.A., Malo H. Control theory for linear systems – Berlin, Springer, 2001; 389. ISBN 978-1-4471-0339-4.
17. Sontag E.D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition / E.D. Sontag – New York: Springer, 1998; 530.
18. GOST 29075-91 Nuclear instrumentation systems for nuclear power stations. General requirements (In Russ)
19. Grodzensky S.Ya. Quality management: textbook. – 2nd ed. M.: *Prospect*, 2018; 320. (In Russ)
20. Quality assurance standards: comparison between IAEA 50-C/SG-Q and ISO 9001:1994 – Vienna: IAEA, 2000; 34.
21. Selection of management type on production developed by the development of equipment for a peaceful atom [Vestnik KemRIPK] Bulletin of KemRIPK – Kemerovo, 2018; 3:18-26 (In Russ)
22. Loskutov I. A. Organizational management structures at enterprises developing equipment for NPPs. *Journal of Management Studies* – M: Limited Liability Company «Scientific Publishing Center INFRA-M», 2018; 4(4): 40-46. (In Russ)

Сведения об авторе:

Лоскутов Иван Андреевич, инженер – конструктор, отдел № 55, преподаватель автоматизации, e-mail: faxvex@ya.ru

Information about the author:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor in the Department 55, Teacher of Automation, e-mail: faxvex@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.07.2021.

Одобрена после рецензирования/Reviced 12. 08.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 14.08.2021.

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

УДК 621.3: 004.05

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-83-92

Оригинальная статья / Original Paper

Исследование побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации

Е.А. Рогозин¹, Р.Е. Рогозин², Д.Г.Силка¹, Д.И. Коробкин⁴, М.О. Мещеряков³

¹ Воронежский институт МВД России,

² Воронежский государственный технический университет,

³ МГТУ имени Н.Э. Баумана,

⁴ Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²394006, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, 84, Россия,

³105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Россия,

⁴394016, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия

Резюме: Цель. В целях определения «защищенности» объекта информатизации специального назначения необходимо провести расчёт показателей побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации, связанных с утечкой информации по техническим каналам. Необходимо разработать перечень действий по нейтрализации потенциальных угроз (включая разработку системы защиты информации для защиты от данного вида угроз). **Метод.** Исследование побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации проводится с использованием экспертно-документального и инструментального методов. **Результат.** Приведены результаты исследования побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации и определены аспекты совершенствования специальных мероприятий по защите информации на объекте информатизации специального назначения. **Вывод.** Направление исследования является актуальным и требует дальнейшего развития организационно-технических мероприятий по реализации требований нормативно правовых документов по защите информации.

Ключевые слова: побочные электромагнитные излучения, опасные сигналы, сенсорные экраны, эффективность, утечка защищаемой информации, несанкционированное получение информации, расчёт показателей эффективности

Для цитирования: Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, Д.Г. Силка, Д.И. Коробкин, М.О. Мещеряков. Исследование побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3): 83-92. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-83-92

Investigation of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensory input of information

E.A. Rogozin¹, R.E. Rogozin², D.G. Silka¹, D.I. Korobkin⁴, M.O. Meshcheryakov³

¹ Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

² Voronezh State Technical University,

³ Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,

⁴ Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,

¹394065, Voronezh, 53 Patriot Ave., Russia,

²394006, Voronezh, st. 20 years of October, 84, Russia,

³105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, building 1, Russia,

⁴394016, Voronezh, st. Old Bolsheviks, 54a, Russia

Abstract. Objectives. In order to determine the "security" of a special purpose informatization object, it is necessary to calculate the indicators of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensor input of information associated with information leakage through technical channels. It is also necessary to develop a list of actions to neutralize potential threats (including the development of an information protection system to protect against this type of threat). **Method.** The study of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensory input of information is carried out using expert documentary and instrumental methods. **Result.** The results of the study of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensor input of information are given and aspects of improving special measures for the protection of information at a special purpose informatization object are determined. **Conclusion.** The direction of this study is very relevant and requires further development of organizational and technical measures to implement the requirements of regulatory legal documents for the protection of information.

Keywords: side electromagnetic radiation, dangerous signals, touch screens, efficiency, leakage of protected information, unauthorized obtaining of information, calculation of performance indicators

For citation: E.A. Rogozin, R.E. Rogozin, D.G. Silka, D.I. Korobkin, M.O. Meshcheryakov. Investigation of side electromagnetic radiation generated during the operation of devices with sensory input of information. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 83-92. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-83-92

Введение. При работе устройств с сенсорным вводом информации наибольшую опасность для утечки информации представляют экран и различные элементы электросхемы, отвечающие за функционирование устройства [1-4].

От самой сенсорной панели ПЭМИ не образуется, так как она используется в качестве щупа для определения места касания пользователя, а вот элементы электросхемы, отвечающие за определение места касания и за вычисления действий пользователя будут представлять угрозу для данных, обрабатываемых данным устройством [5-9]. Наибольшую опасность утечки информации через ПЭМИН представляют узлы и устройства ПЭВМ, обрабатывающие информацию в последовательном коде [10-12].

Постановка задачи. Необходимо провести расчёт показателей побочных электромагнитных излучений, образующихся при работе устройств с сенсорным вводом информации, связанных с утечкой информации по техническим каналам, а также разработать перечень действий по нейтрализации потенциальных угроз (включая разработку системы защиты информации для защиты от данного вида угроз). Исследованию подлежат: экран; звуковая система контроллер сенсорной панели (табл.1).

Таблица 1. Исследуемые устройства
Table 1. Investigated devices

Устройство Device	Процессор CPU	Диагональ экрана Screen diagonal	Разрешение экрана Screen resolution
SAMSUNG Galaxy Tab A 10.1 (2019) SM-T515N	Восьмиядерный Samsung Exynos 7904	диагональ 10.1 дюйма	1900x1200 пикселей

Методы исследования. Поиск опасных сигналов производился с помощью программно-аппаратного комплекса для проведения специальных исследований на сверхнормативные побочные электромагнитные излучения «NAVIGATOR 7.0» и вручную.

Частотный диапазон измерений. По электрической составляющей электромагнитного поля: 10кГц-150МГц. По магнитной составляющей электромагнитного

поля: 10кГц-25МГц. Методика проведения измерений предусматривает следующие действия:

1. Собрать установку и настроить измерительную аппаратуру (табл.2, рис.1.).
2. Загрузить на исследуемые устройства тест-режимы.
3. Измерить уровень шумов (тест-режим выключен).
4. Включить тест-режим. При превышении уровня сигнала на 3Дб относительно шумов программа выделяет подозрительные сигналы.
5. Далее в экспертном (ручном) режиме происходит поиск и удаление лишних опасных частот.

Таблица 2. Измерительная аппаратура

Table 2. Measuring equipment

№ п/п	Наименования средств измерений и вспомогательного оборудования Names of measuring instruments and auxiliary equipment	Тип Type	Диапазон частот Frequency range
Средства измерений Measuring instruments			
1.	Измерительный приемник Measuring receiver	Анализатор спектра Spectrum analyzer «Agilent 8596E»	100 кГц – 3 ГГц
2.	Комплект измерительных антенн Measuring antenna set	Антенна измерительная дипольная типа Measuring dipole antenna АИ 5-0 с УР-1.6 № 643	9 кГц – 2000 МГц
		Антенна измерительная рамочная типа Measuring loop antenna АИР3-2 с УР-1.6 № 643	9 кГц – 30 МГц
3.	Токоъемник Current collector	ТИ 2-3	9 кГц – 300 МГц
Вспомогательное оборудование Auxiliary equipment			
4.	Ноутбук Notebook	«Toshiba»	-

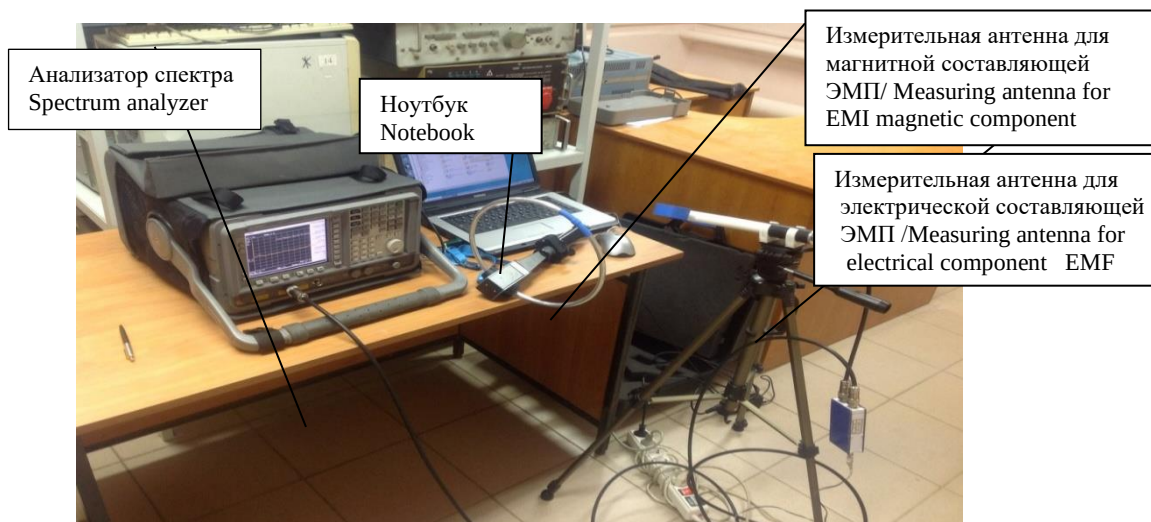


Рис. 1. Измерительное оборудование

Fig. 1. Measuring equipment

Тест режимы устройств. Во время проведения специальных исследований исследуемое устройство работало в авиарежиме (для уменьшения помех, образующихся от Wi-Fi аппаратуры, Bluetooth гарнитуры).

Вывод изображения на экран. Загрузить на исследуемое устройство рисунок, представленный на рис. 2. Рисование. Загрузить на исследуемые устройства программу, подразумевающую работу пользователя с устройством, как при рисовании на экране.

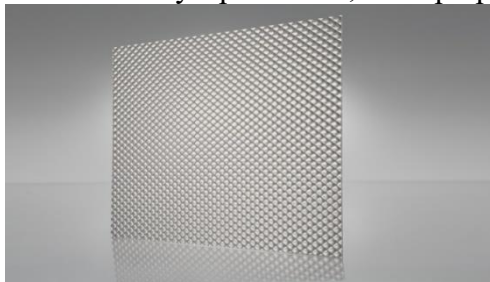


Рис. 2. Вывод изображения на экран

Fig. 2. Displaying an image on the screen

На SAMSUNG Galaxy Tab A 10.1 (2019) SM-T515N включить программу Samsung Notes. На рис. 3 приведено изображение интерфейса программы исследуемого устройства.



Рис. 3. Интерфейс программы исследуемого устройства

Fig. 3. DUT program interface

Касания, происходящие через небольшие промежутки времени. Включить на устройствах виртуальную клавиатуру и набрать текст. Во время проведения исследований все исследуемые устройства работали в авиарежиме. Расчёт зоны R2 проводился для информативных сигналов согласно методике, описанной в литературном источнике [13] для расчета зоны R2. Измерения показали, что невозможно обнаружить опасный сигнал по магнитной составляющей по следующим признакам: пропадание сигнала на экране, уменьшение амплитуды сигнала при выключении устройства. Поэтому расчет проводился только по электрической составляющей ЭМП.

Обсуждение результатов. Вычисляется значение напряженности ЭМП по электрической составляющей E_c , созданной информативным сигналом на частоте f , по формуле

$$E_c = \sqrt{E_{c+ш}^2 - E_{ш}^2} \text{ (мкВ/м)}$$

где $E_{c+ш}$ (мкВ/м) – уровень напряженности ЭМП при работе исследуемого технического устройства, $E_{ш}$ (мкВ/м) – уровень шума (напряженность ЭМП при выключенном исследуемом устройстве).

По формулам

$$L_1 = \frac{150}{\pi \cdot f}$$

$$L_2 = \frac{1800}{f}$$

определяются на частоте f (МГц) границы ближней, промежуточной и дальней зон. По формуле

$$R = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{K \cdot E_{ш}}{E_c}}}$$

где $K = 1$ для ОТСС, не имеющих в своем составе видеомониторов, и $K = 0,3$ для ОТСС, имеющих в своем составе видеомониторы, проверяется, достаточно ли уровня E_c , чтобы информативный сигнал от ОТСС распространился за границу ближней зоны.

При рассчитанном $R < L_1$ R принимается за R_2 .

При $R > L_1$ пересчитываются значение E_c на границу ближней зоны по формуле

$$E_1 = E_c \cdot \left(\frac{R_0}{L_1}\right)^3 \text{ мкВ/м}$$

По формуле

$$R = \frac{L_1}{\sqrt[3]{\frac{K \cdot E_{III}}{E_c}}} \text{ (м)}$$

проверяется, достаточно ли уровня E_1 , чтобы информативный сигнал от ОТСС распространялся за границу промежуточной зоны.

Если $R < L_2$, то информативный сигнал за границу промежуточной зоны не распространяется. В этом случае требуемый радиус контролируемой зоны определяется значением R .

При $R > L_2$ пересчитывается значение E_1 к границе промежуточной и дальней зон- E_2 по формуле

$$E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right) \text{ мкВ/м}$$

По формуле

$$R = \frac{L_2 \cdot E_2}{K \cdot E_{III}} \text{ (м)}$$

Определяется окончательное значение R_2 для дальней зоны.

Примечание: при условии $L_1 \leq 1$ (м) и $L_2 \leq 1$ (м) в формулах (6) и (8) значения L_1 и L_2 принимаются равными 1 м, а E_1 и E_2 равными E_c ; величина измеряется в Дб относительно 1 мкВ/м, при расчетах используется значение этой величины в мкВ/м.

Перевод выполняется по формуле

$$E = 10^{0,05 \cdot E(\text{Дб})} \text{ мкВ/м}$$

За итоговое значение зоны R_2 принимается наибольшее значение из значений, посчитанных по методике, указанной выше. Режим вывода информации на экран представлен в табл.3, 4.

Таблица 3. Электрическая составляющая ЭМП 0.3 метра от исследуемого устройства

Table 3. Electrical component of EMF 0.3 meters from the investigated device

Частота, МГц	Ес+п, дБмкВ/м	Еп, дБмкВ/м	Ес, мкВ/м	Р, м
0,27	62,35	56,29	1136,80	1,8
0,351	53,69	49,54	379,39	1,6
1,35	47,69	38,64	226,80	2,1
1,863	42,38	38,05	104,48	1,6
2,421	42,53	38,53	103,81	1,6
6,183	43,51	39,21	118,75	1,6
7,524	40,5	37,47	75,07	1,5
7,812	41,8	37,79	95,52	1,6
9,387	38,04	34,97	56,81	1,5
12,645	40,21	32,64	93,05	1,9
12,735	36,68	33,29	50,23	1,5
16,398	43,45	40,32	106,61	1,5
17,379	36,82	33,16	52,33	1,6
17,937	37,2	33,94	52,64	1,5
18,594	36,41	33,11	48,26	1,5
28,251	35,61	32,23	44,36	1,5
Rmax=2,1				

Таблица 4. Электрическая составляющая ЭМП 1 метр от исследуемого устройства
Table 4. Electrical component of EMF 1 meter from the investigated device

Частота, МГц	Ес+п, дБмкВ/м	Еп, дБмкВ/м	Ес, мкВ/м	R, м
0,513	45,49	42,20	137,13	1,5
Rmax=1,5				

Режим ввода информации при помощи сенсорного экрана представлен в табл.5, 6.
Рисование.

Таблица 5. Электрическая составляющая ЭМП 1 метр от исследуемого устройства
Table 5. Electrical component of the EMF 1 meter from the device under test

Частота, МГц	Ес+п, дБмкВ/м	Еп, дБмкВ/м	Ес, мкВ/м	R, м
0,657	44,53	37,67	150,10	1,9
0,954	51,93	45,42	348,025	1,8
1,512	44,89	36,2	163,29	2,0
1,71	40,89	36,19	90,08	1,7
2,421	39,39	36,03	68,42	1,5
2,799	40,78	37,44	80,13	1,5
2,844	41,2	37,85	84,19	1,5
4,959	39,67	35,83	73,76	1,5
Rmax=2,0				

Таблица 6. Электрическая составляющая ЭМП 0.3 метра от исследуемого устройства

Table 6. Electrical component of EMF 0.3 meters from the investigated device

Частота, МГц	Ес+п, дБмкВ/м	Еп, дБмкВ/м	Ес, мкВ/м	R, м
0,198	103,07	49,13	142396,44	11,8
1,35	87,37	38,49	23361,31	9,7
3,222	70,5	44,69	3345,26	4,0
3,618	73,45	43,24	4702,11	4,8
3,798	48,31	42,57	222,92	1,8
4,095	70,79	47,99	3454,29	3,6
4,266	45,15	42,03	129,52	1,5
4,374	61,74	46,45	1203,60	2,7
4,527	64,15	42,23	1607,31	3,5
4,95	63,16	42,58	1432,49	3,3
5,121	66,94	42,66	2219,16	3,8
5,643	67,27	36,66	2308,40	4,8
6,453	49,38	37,39	284,98	2,3
6,669	61,7	38,79	1213,07	3,6
7,65	39,43	35,94	69,60	1,5
8,163	61,54	35,41	1192,53	4,1
8,874	57,16	33,81	719,44	3,7
9,243	57,87	33,27	781,17	3,8
9,576	37,53	33,65	57,84	1,6
9,792	36,27	32,97	47,49	1,5
9,945	62,57	32,86	1343,59	4,7
10,224	43,73	33,17	146,73	2,2
10,539	58,1	33,35	802,18	3,9
10,98	54,69	32,58	540,95	3,5
11,196	52,15	32,78	402,69	3,1
11,25	36,04	32,4	47,75	1,6

продолжение табл. 6				
11,574	54,91	32,21	555,05	3,6
11,718	35,95	32,27	47,42	1,6
11,835	43,59	31,75	146,15	2,3
11,898	36,73	31,92	56,16	1,7
12,348	51,47	33,45	371,58	3,0
12,456	36,32	32,85	48,56	1,5
12,825	37,8	32,34	65,66	1,7
12,906	40,68	32,11	100,35	2,0
13,014	36,2	32,17	50,20	1,6
13,176	52,82	32,48	435,49	3,3
13,383	37,48	32,8	60,76	1,7
13,545	46,4	33,56	203,42	2,4
13,635	35	31,96	39,90	1,5
13,86	48,33	33,12	256,95	2,7
14,22	42,19	32,25	121,98	2,1
14,31	38,19	33,92	64,23	1,6
14,499	38,62	33,11	72,33	1,7
14,535	37,75	33,58	60,63	1,6
14,598	42,83	32,91	131,27	2,1
14,805	50,93	34,37	348,06	2,8
14,967	39,15	34,52	73,42	1,7
18,027	45,99	32,4	194,89	2,5
18,225	37,74	33,5	60,86	1,6
18,297	38,94	34,68	69,98	1,7
18,405	39,28	32,58	81,61	1,9
18,585	41,42	33,03	108,90	2,0
19,242	36,74	31,81	56,60	1,7
19,359	40,26	34,69	87,59	1,8
19,611	42,87	34,13	129,52	2,0
19,8	40,92	35,98	91,63	1,7
19,908	44,08	37,21	159,96	1,9
19,953	40,64	35,8	88,24	1,7
19,989	41,79	35,36	108,01	1,8
20,16	42,52	36,99	113,42	1,7
20,439	45,55	37,56	173,75	2,0
21,042	45,11	37,42	164,05	1,9
22,59	44,87	37,66	157,66	1,9
22,635	41,29	36,58	94,39	1,7
Rmax=11,8				

Ввод информации на сенсорной панели при помощи клавиатуры (табл. 7).

Таблица 7. Электрическая составляющая ЭМП 0.3 метра от исследуемого устройства

Table 7. Electrical component of EMF 0.3 meters from the investigated device

Частота, МГц	Ес+п, дБмкВ/м	Еп, дБмкВ/м	Ес, мкВ/м	R, м
0,198	89,43	50,2	29612,43	6,7
0,954	78,8	53,88	8695,60	3,9
3,231	68,58	44,15	2680,50	3,8
3,492	59,5	43,17	933,01	2,8
3,663	63,02	42,37	1409,69	3,3

продолжение табл. 7				
3,807	47,48	44,04	175,00	1,5
3,987	61,61	42,72	1195,86	3,1
4,086	58,28	48,64	774,51	2,1
4,572	62,45	44,81	1314,40	2,9
4,752	55,43	43,48	571,71	2,3
5,112	61,9	40,13	1240,37	3,4
5,382	51,01	40,57	338,79	2,2
5,643	60,74	37,96	1086,06	3,6
5,805	51,74	39,27	375,27	2,4
6,021	39,6	36,01	71,62	1,6
6,183	61,66	38,42	1207,72	3,6
7,02	53,55	37,12	470,44	2,8
7,092	45,93	37,43	183,41	2,0
7,272	53,93	38,01	490,73	2,7
7,398	46,52	36,65	200,63	2,1
7,533	47,62	36,88	230,07	2,2
7,803	57,28	34,57	729,18	3,6
7,965	51,19	35,01	358,26	2,8
8,163	44,77	35,38	162,91	2,1
8,343	54,74	33,37	543,76	3,4
8,541	49,21	34,08	284,27	2,7
8,874	52,74	33,4	430,98	3,1
9,684	51,02	32,27	353,25	3,1
9,945	41,76	32,61	114,77	2,1
10,215	38,4	33,02	70,10	1,7
10,809	45,67	31,92	187,99	2,5
10,881	36,51	31,87	54,21	1,7
11,025	46,78	33,11	213,53	2,5
11,196	47,93	32,35	245,70	2,7
11,304	35,74	32,58	44,03	1,5
11,394	39,52	31,76	86,34	2,0
11,565	44,93	33,24	170,32	2,3
11,826	44,15	32,66	155,42	2,3
11,961	40,75	32,34	100,85	2,0
12,258	46,56	32,76	208,33	2,5
12,483	35,53	32,06	44,34	1,5
12,645	37,56	31,86	64,55	1,8
12,708	40,55	32,4	98,04	2,0
12,906	38,27	32,51	70,23	1,8
13,068	37,19	33,57	54,41	1,6
13,698	40,89	32,81	101,81	2,0
13,842	38,98	32,84	77,35	1,8
13,986	41,9	32,81	116,53	2,1
14,238	41,95	33,43	116,04	2,0
14,409	39,13	33,05	78,53	1,8
17,847	37,82	32,28	66,05	1,7
19,944	37,44	34,12	54,44	1,5
20,7	39,52	36,11	69,79	1,5
Rmax=6,7				

Исследования показали, что невозможно обнаружить опасный сигнал по магнитной составляющей по следующим признакам: пропадание сигнала на экране, уменьшение амплитуды сигнала при выключении устройства.

Появление опасных сигналов от исследуемого устройства заметно сильнее при работе пользователя с сенсорной панелью, чем при выводе информации на экран (пользователь не работает с сенсорной панелью). Наиболее опасный режим работы представляет рисование на сенсорной панели.

Получены значения зоны R2: антенна расположена на расстоянии 0.3 метра от устройства: зона R2 = 11,8; антенна расположена на расстоянии 1 метра от исследуемого устройства: зона R2 = 2м

Вывод. В ходе проведенных исследований установлено, что большую известность и популярность приобрели резистивные и проекционно-ёмкостные сенсорные экраны. Такие экраны используют большинство производителей мобильных устройств и гаджетов (планшеты, плееры и др.).

В работе проводились измерения ПЭМИН на техническом устройстве с проекционно-ёмкостным сенсорным экраном (SAMSUNG Galaxy Tab A 10.1 (2019) SM-T515N). Измерения показали, что ПЭМИ от данного устройства существуют. Наиболее опасный режим работы устройства - это режим ввода информации с помощью сенсорного экрана, а, именно, рисование.

В ходе исследования рассмотрены принципы работы различных видов устройств с сенсорным вводом информации, изучена структура ЭМИ, а также механизмы образования канала утечки информации за счет ПЭМИ.

Описано образование канала утечки информации за счет ПЭМИН от устройств с сенсорным вводом информации; проведено ознакомление с методикой проведения специальных исследований, получен навык работы с измерительным оборудованием, изучена методика расчета зоны R2.

В ходе выполнения исследования и расчетов, проведенных в работе, получены значения зоны R2: антенна расположена на расстоянии 0.3 метра от устройства: зона R2 = 11,8; антенна расположена на расстоянии 1 метра от исследуемого устройства: зона R2 = 2м.

Библиографический список:

1. Липаев В.В. Системное проектирование программных средств, обеспечивающих безопасность функционирования информационных систем // Информационные технологии. - 2000. - №11. - С. 49-55.
2. Мельников В.В. Основы теории защиты информации в автоматизированных системах // Вопросы защиты информации. -2000. - № 3. -С. 39-49.
3. Технические методы и средства защиты информации / Ю.Н. Максимов, В.Г. Сонников, В.Г. Петров и др. - СПб.: Изд-во «Полигон», 2000.
4. Завгородний В.И. Комплексная защита информации в компьютерных системах. - М.: Логос, ППОЮЛ Егоров Н.А., 2001. - 264 с.
5. Хорев А.А. Защита информации от утечки по техническим каналам. – М.: Гостехкомиссия РФ, 1998. - 320 с.
6. Методы оценки информационной безопасности автоматизированных систем управления критических приложений / В.И. Сумин, О.Ю. Макаров, Ю.Е. Иванкина и др. // Телекоммуникации. - 2001. - № 7. - С. 45-48.
7. Волобуев С.В. О систематизации выявления и анализа каналов утечки. Алгоритм выявления и классификации каналов утечки //Вопросы защиты информации. - 2000. - № 2. - С. 14-19.
8. Расторгуев С.П. Программные методы защиты информации в компьютерных сетях.- М.: Изд-во “Яхтсмен”, 1993. - 188 с.
9. Кобзарь М.Т. Общие критерии оценки безопасности информационной технологии и перспективы их использования // Безопасность информационных технологий . - 1998. - № 1. - С. 22-24.
10. Программирование алгоритмов защиты информации /А.В. Домашев, В.О. Попов, Д.И. Правиков и др. - М.: Нолидж, 2000. - 288 с.

11. А.П. Зайцев, А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков С.В. Скрыль, И.В. Голубятников «Технические средства и методы защиты информации». Москва, «Машиностроение», 2009. – 24с.
12. Ю. Н. Рагозин «Инженерно-техническая защита информации. Лабораторный практикум» МГИУ 2008. -16с
13. Хорев А.А., Способы и средства защиты информации. Учебное пособие. – М.: МО РФ, 2000. – 316 с.

References:

1. Lipaev V.V. System design of software that ensure the security of information systems functioning. *Information technologies*. 2000; 11: 49-55. (In Russ)
2. Melnikov V.V. Fundamentals of the theory of information security in automated systems [Voprosy zashchity informatsii] *Information security issues*. 2000; 3:39-49. (In Russ)
3. Technical methods and means of information protection / Yu.N. Maximov, V.G. Sonnikov, V.G. Petrov et al. - St. Petersburg: *Polygon Publishing House*, 2000. (In Russ)
4. Zavgorodniy V.I. Comprehensive information protection in computer systems. - М.: Logos, PPOYUL Egorov N.A., 2001; 264. (In Russ)
5. Khorev A.A. Protection of information from leakage through technical channels. - М.: Gostekhkomiissiya RF, 1998; 320. (In Russ)
6. Methods for assessing information security of automated control systems for critical applications / V.I. Sumin, O. Yu. Makarov, Yu.E. Ivankina et al. *Telecommunications*. 2001; 7: 45-48. (In Russ)
7. Volobuev S.V. On the systematization of the identification and analysis of leakage channels. Algorithm for identifying and classifying leakage channels. [Voprosy zashchity informatsii] *Information security issues*. 2000; 2:14-19. (In Russ)
8. Rastorguev S.P. Software methods of information protection in computer networks. - М.: Publishing house "Yachtsman", 1993; 188. (In Russ)
9. Kobzar M.T. General criteria for assessing the security of information technology and the prospects for their use. [Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy] *Information technology security*. 1998;1: 22-24. (In Russ)
10. Programming algorithms for information protection / A.V. Domashev, V.O. Popov, D.I. Pravikov and others. М.: Knowledge, 2000; 288. (In Russ)
11. А.П. Зайцев, А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков С.В. Скрыль, И.В. Голубятников "Technical means and methods of information protection" Ed. A.P. Zaitsev and A.A. Shelupanova, Moscow, [Mashinostroenie] *Mechanical engineering*, 2009; 24. (In Russ)
12. Yu. N. Ragozin "Engineering and technical protection of information. Laboratory workshop "MGIU 2008; 16. (In Russ)
13. Khorev AA, Methods and means of protecting information. Tutorial. - М.: Ministry of Defense of the Russian Federation, 2000; 316. (In Russ)

Сведения об авторах:

Рогозин Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел, e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич, аспирант, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru.

Коробкин Игорь Дмитриевич, докторант, e-mail: office@main.vsu.ru

Силка Дмитрий Григорьевич, инженер-электроник отдела информационно технического обеспечения учебного процесса, e-mail: sdg.silka@gmail.com

Мещеряков Михаил Олегович, студент кафедры ИУ-10, e-mail: keyvrn12012014@icloud.com

Information about the authors:

Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies, e-mail: evgenirogozin@uaandekh.ru

Ruslan E. Rogozin, Postgraduate student, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru.

Igor D. Korobkin, Doctoral student, e-mail: office@main.vsu.ru

Dmitry G. Silka, Electronic engineer of the Department of Information and Technical support of the Educational process, e-mail: sdg.silka@gmail.com

Mikhail O. Meshcheryakov, Student of the Department IU-10, e-mail: keuvrn12012014@icloud.com

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.07.2021.

Поступила после рецензирования/ Revised 16. 08.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 17.08.2021.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 504.3.054/ББК 28.088

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-93-98

Оригинальная статья / Original Paper

**Обеспечение экологической безопасности жилых зон населенных пунктов на
основе мониторинга кислых примесей в атмосфере**

И.Ю. Глинянова

Волгоградский государственный технический университет,
400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Резюме. Цель Мониторинг кислых примесей в атмосферном воздухе жилых зон населенных пунктов является одним из направлений обеспечения их экологической безопасности и официально осуществляется на 221 станциях в РФ при исследовании атмосферных осадков. На территориях, где их выпадает минимальное количество, автором предлагается альтернативный способ оценки загрязнения окружающей среды на основе приготовления аэрозольных суспензий. Цель данной работы заключалась в исследовании показателя кислотности (pH) аэрозольных суспензий (смыв аэрозолей с листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*), полученных в рп Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области) за весну-лето 2020 года. **Результат.** исследования продемонстрировали кислые аэрозоли ($pH=5.32\pm0,01$) в атмосферном воздухе рп Средняя Ахтуба по сравнению с условно-чистой зоной (СНТ «Орошенец», «Шельф»), ($pH=6,39\pm0,02$). Данные свидетельствуют о загрязнении окружающей среды и об экологических рисках для населения. **Вывод.** Кислые примеси в атмосфере рп Средняя Ахтуба по сравнению с условно-чистой зоной (СНТ «Орошенец», «Шельф»), что свидетельствует об экологических рисках для населения. В этой связи, в последующем необходимо определить источники загрязнения жилых зон населенного пункта рп Средняя Ахтуба и разработать экологические мероприятия по защите населения от кислых примесей, содержащихся в аэрозолях, что требует дальнейшего изучения территории.

Ключевые слова: экологическая безопасность, мониторинг, кислые примеси, аэрозоли; кислотность, pH

Для цитирования: И.Ю. Глинянова. Обеспечение экологической безопасности жилых зон населенных пунктов на основе мониторинга кислых примесей в атмосфере. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 93-98. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-93-98

**Ensuring the environmental safety of residential areas of settlements based on the
monitoring of acidic impurities in the atmospheric air**

I.Yu. Glinyanova

Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., 400005 Volgograd, Russia

Abstract. Objectives. Purpose Monitoring of acidic impurities in the atmospheric air of residential areas of settlements is one of the areas of ensuring their environmental safety and is officially carried out at 221 stations in the Russian Federation in the study of atmospheric precipitation. **Method.** In areas where they are minimal, the author proposes an alternative method for assessing environmental pollution based on the preparation of aerosol suspensions. The purpose of this work was to study the acidity index (pH) of aerosol suspensions (washing off aerosols from the leaves of apricot trees (*Prunus armeniaca*) obtained in the Srednyaya Akhtuba region (Sredneakhtubinsky district of the Volgograd region) in the spring-summer of 2020.

Result. The results of the research demonstrated acidic aerosols ($\text{pH} = 5.32 \pm 0.01$) in the atmospheric air of Srednyaya Akhtuba in comparison with the conditionally clean zone (SNT "Oroshenets", "Shelf"), ($\text{pH} = 6.39 \pm 0.02$). The data indicate environmental pollution and on environmental risks for the population. **Conclusion.** Acidic impurities in the atmosphere of the middle Akhtuba region in comparison with the conditionally clean zone (SNT "Oroshenets", "Shelf"), which indicates environmental risks for the population. sources of pollution in residential areas of the settlement of Srednyaya Akhtuba and to develop environmental measures to protect the population from acidic impurities contained in aerosols, which requires further study of the territory.

Key words: environmental safety, monitoring, acidic impurities, aerosols; acidity, pH

For citation: I.Yu. Glinyanova. Ensuring the environmental safety of residential areas of settlements based on the monitoring of acidic impurities in the atmospheric air кислых примесей в атмосфере. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(3):93-98. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-93-98

Введение. Регулярные официальные наблюдения за кислотностью атмосферных осадков осуществляются на территории нашей страны на 221 станциях [1]. Данный вид мониторинга позволяет рассматривать примеси, которые содержатся в атмосферных осадках, как индикаторы на общее загрязнение территорий.

В этой связи кислотность атмосферных осадков исследовалась в Бахчисарайском районе Крыма [2], городской среде Севастополя [3], Братска [4], Заполярья [5] и других регионах России. При этом аналогичные исследования осуществлялись в Аргентине [6], Китае [7], Сирии [8] и других странах.

Актуальность исследования данной работы заключается в том, что кислые примеси атмосферного воздуха могут вызывать обострение астмы [9], а их вдыхание из атмосферного воздуха способствует в живом организме разрушению ткани легких и развитию воспалительных процессов дыхательной системы [10]. В этой связи мониторинг кислых примесей в атмосферном воздухе является одним из условий обеспечения экологической безопасности жилых зон населенных пунктов.

Постановка задачи. Известно, что атмосферные осадки в городских и сельских поселениях носят эпизодический характер. Для регионов, которые испытывают дефицит атмосферных осадков был разработан способ оценки загрязнения окружающей среды на основании приготовления аэрозольных суспензий (смыв аэрозольных частиц с листьев древесных форм растений) [11], что позволяет отслеживать экологическую ситуацию на исследуемой территории в течение заданного промежутка времени.

Поэтому целью данной работы явилось исследование показателя кислотности (pH) аэрозольных суспензий, отобранных в рп Средняя Ахтуба (Среднеахтубинский район Волгоградской области) за весну-лето 2020 года.

Методы исследования. Материалом исследования послужили листья с аэрозольными частицами одного вида древесных растений (абрикосовые деревья (*Prunus armeniaca*)), где 1 образец составлял 300-400 см² площади листовой поверхности. Листья отбирались с 10 деревьев (10 повторов) в конце вегетации (сентябрь 2019 г.), с открытой стороны растения на высоте 0,6–2,0 м. над уровнем земли с разных сторон. В одной точке исследования было получено 10 образцов (1 образец: 20 листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*)). На экспериментальной территории и в условно чистой зоне всего было изучено 200 образцов.

Так, 1 образец листьев абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) помещали в стеклянный контейнер с 250 мл дистиллированной воды, перемешивали в течение нескольких минут стеклянной палочкой, чтобы смыть частицы с поверхности листьев. В результате чего получались аэрозольные суспензии, которые далее исследовали по

показателю кислотности (рН). Величину водородного показателя (рН) измеряли на электрохимическом оборудовании серии "МУЛЬТЕСТ" (Россия).

Обсуждение результатов. Полученные данные по показателю кислотности (рН) являются распределенными на достаточно большой территории, поэтому было доказано, что внутри условно-чистой зоны и на экспериментальной территории показатели выборки различаются незначительно.

Для верификации незначимости различий был использован аппарат проверки гипотез об однородности выборок – непараметрический критерий Краскела – Уоллиса. Проверка статистических гипотез проводилась на уровне значимости, равном 0,05. Все необходимые расчеты проводились в статистическом пакете R (версия 3.6.1, R Core Team 2020). На рис. 1 представлена диаграмма размаха значений показателя кислотности (рН) для каждой точки отбора проб в СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона) в 2020 году.

Результаты проверки гипотезы об отсутствии статистически значимых различий между значениями показателя кислотности аэрозольных суспензий (рН), измеренных в каждой точке исследования на территории условно-чистой зоны (СНТ «Орошенец», «Шельф») отражены в табл. 1.

Таким образом, при уровне значимости $\alpha=0,05$ гипотеза об однородности выборок признается значимой.

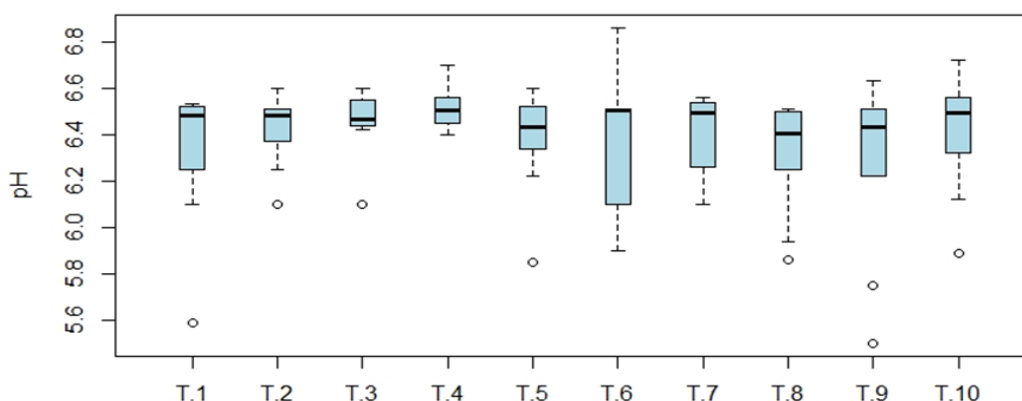


Рис. 1. Диаграмма размаха значений показателя кислотности (рН) для каждой точки отбора проб в СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона), 2020 год

Fig. 1. Diagram of the range of acidity (pH) values for each sampling point in the SNT "Oroshenets", "Shelf" (conditionally clean zone), 2020

Гипотезы, выдвинутые в исследовании:

H0: Статистически значимых различий между результатами групп нет;

Таблица 1. Результаты проверки гипотезы об однородности выборок внутри территории условно-чистой зоны (СНТ «Орошенец», «Шельф»), 2020 год

Table 1. Results of testing the hypothesis about the homogeneity of samples within the territory of the conditionally clean zone (SNT "Oroshenets", "Shelf"), 2020

Расчетное значение критерия (H) Calculated criterion value	Число степеней свободы Number of degrees of freedom (Df)	P-value
6,8315	9	0,6547

H1: Различия между результатами групп статистически значимы.

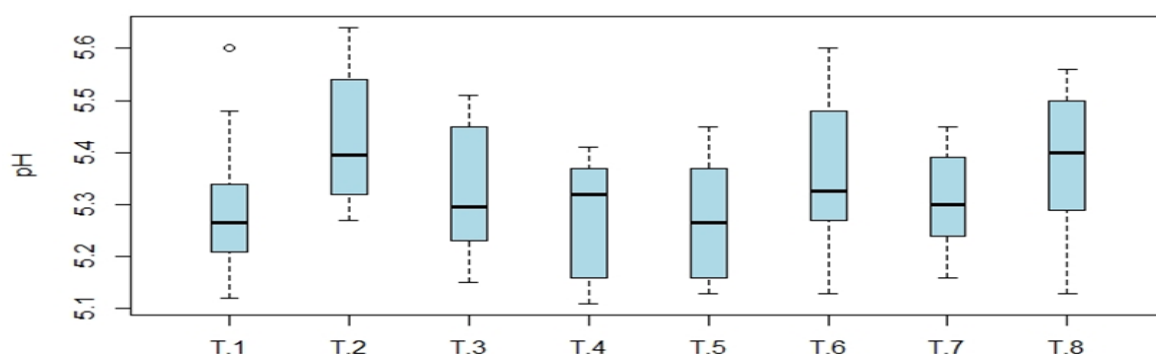


Рис. 2. Диаграмма размаха значений показателя кислотности (рН) для каждой точки отбора проб в рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория), 2020 год

Fig. 2. Diagram of the range of acidity (pH) values for each sampling point in the Srednyaya Akhtubya region (experimental area), 2020

На рис. 2, представлена диаграмма размаха значений показателя кислотности (рН) для каждой точки отбора проб в рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория). Результаты проверки гипотезы об отсутствии статистически значимых различий между значениями показателя кислотности аэрозольных суспензий в каждой точке исследования, измеренных на территории принятой за экспериментальную (рп Средняя Ахтуба) отражены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты проверки гипотезы об однородности выборок внутри экспериментальной территории (рп Средняя Ахтуба), 2020 год

Table 2. Results of testing the hypothesis about the homogeneity of samples within the experimental territory (rn Srednyaya Akhtubya), 2020

Расчетное значение критерия (H) Calculated criterion value	Число степеней свободы Number of degrees of freedom (Df)	P-value
10,327	7	0.1685

Таким образом, при уровне значимости $\alpha=0,05$ гипотеза об однородности выборок признается значимой.

Таблица 3. Сравнительная характеристика значений показателей (рН) аэрозольных суспензий условно-чистой зоны («СНТ «Орошенец», «Шельф») и экспериментальной территории (рп Средняя Ахтуба, Среднеахтубинский район Волгоградская область, 2020 год

Table 3. Comparative characteristics of the values of indicators (pH) of aerosol suspensions of the conditionally clean zone ("SNT" Oroshenets, "Shelf") and the experimental territory (rp Sredny Akhtubya, Sredneakhtubinsky district, Volgograd region, 2020

Населенные пункты Settlements	pH
Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) Middle Akhtubya (experimental area)	5,32±0,01
СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона) SNT "Oroshenets", "Shelf" (conditionally clean zone)	6,39±0,02

Поскольку исследование показывает, что при уровне значимости 0,05 существенных различий внутри каждого из исследуемых территорий нет, то возможно объединить результаты измерений показателя кислотности (рН) аэрозольных суспензий из рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) и СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона) и провести сравнение экспериментальной территории и условно-чистой зоны.

В табл. 3 приведена сравнительная характеристика значений показателя кислотности (рН) аэрозольных суспензий (смыв аэрозолей с листьев абрикосовых

деревьев (*Prunus armeniaca* из условно-чистой зоны («СНТ «Орошенец», «Шельф»)) и из экспериментальной территории (рп Средняя Ахтуба, Среднеахтубинский район Волгоградская область за период: весна-лето 2020 года.

Вывод. Проведенные исследования позволили установить кислые примеси в атмосфере рп Средняя Ахтуба по сравнению с условно-чистой зоной (СНТ «Орошенец», «Шельф»), что свидетельствует об экологических рисках для населения. В этой связи, в последующем необходимо определить источники загрязнения жилых зон населенного пункта рп Средняя Ахтуба и разработать экологические мероприятия по защите населения от кислых примесей, содержащихся в аэрозолях, что потребует дальнейшего изучения территории.

Библиографический список:

1. Состояние работ по наблюдению за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков в 2019 г. Методическое письмо. Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова Росгидромета, Санкт-Петербург, 2020, 61с.
2. Каюкова Е.П. Гидрохимические особенности атмосферных осадков на полигоне Крымской геологической практики СПбГУ//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета Серия 7. Геология, география. 2011(3). 26-42.
3. Катунина Е.В. Кислотность осадков г. Севастополя//Материалы Научной конференции «Ломоносовские чтения» 2014 года и Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2014» / под ред. М.Э. Соколова, В.А. Иванова, Н.Н. Миленко, В.В. Хапаева, Н.В. Величко. – Севастополь: ООО «Экспресс-печать», 2014. – С. 52.
4. Янченко Н.И. Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске [Текст] / Н. И. Янченко, О. Л. Яскина // Известия Томского политехнического университета. - 2014. - Т. 324, № 3 : Химия и химические технологии. - С. 27-35].
5. Семенец Е.С. и др. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья [Текст] / Е. С. Семенец, П. Ф. Свистов, А. С. Талаш // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2017. - Т. 328, № 3. - С. 27-36.
6. Orue M.R., Gaiero D., Kirschbaum A. Easonal characteristics of the chemical composition of rainwaters from Salta city, NW Argentina// Environmental earth sciences.2019. V.78.issue1. DOI: 10.1007/s12665-018-8007-0.
7. Niu Y.W., Huang Z., Li X.L. [etc] Chemical characteristics and possible causes of acid rain at a regional atmospheric background site in eastern China// AIR QUALITY ATMOSPHERE AND HEALTH.2017. V.10., issue8.pp. 971-980.Doi: 10.1007/s11869-017-0486-8.
8. Niu Y.W., Huang Z., Li X.L. [etc] Chemical characteristics and possible causes of acid rain at a regional atmospheric background site in eastern China// AIR QUALITY ATMOSPHERE AND HEALTH.2017. V.10., issue8.pp. 971-980.Doi: 10.1007/s11869-017-0486-8.
9. Lippmann M (2003): Human health: Effects of ambient air particulate matter. Acid Rain: Are the Problems Solved? Conference Proceedings, 2, 83-92 pp.
10. Brusselle GG, Bracke KR, Maes T, D'Hulst AI, Moerloose KB, Joos GF, Pauwels RA (2006): Murine models of COPD. Pulmonary Pharmacology & Therapeutics 19, 155-165.
11. Глинянова И.Ю. [и др.] Пат. 2712945 Российская Федерация, МПК 51 A01G 23/00, G01N 33/46. Способ оценки загрязнения окружающей среды/ заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образование высшее образование "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ). - № 2019117074; заявл. 03.06.2019; опубл.03.02.2020, Бюл. №4. - 10 с.

References:

1. Metodicheskoe pis'mo «Sostoyanie rabot po nablyudeniyu za himicheskim sostavom i kislotnost'yu atmosferynyh osadkov v 2019 g. (In Russ)
2. Kayukova E.P. Hidrohimicheskie osobennosti atmosferynyh osadkov na poligone Krymskoj geologicheskoy praktiki SPBGU[Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta Seriya 7. Geologiya, geografiya] Bulletin of St. Petersburg State University Series 7. Geology, geography. 2011; (3): 26-42. (In Russ)
3. Katunina E.V. acidity of precipitation in Sevasotopol. Materialy Nauchnoj konferencii «Lomonosovskie chteniya» 2014 goda i Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Lomonosov-2014» pod red. M.E. Sokolova, V.A. Ivanova, N.N. Milenko, V.V. Hapaeva, N.V. Velichko. – Sevastopol: ООО «Ekspress-pechat'», Materials of the Scientific Conference "Lomonosov Readings" 2014 and the International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Lomonosov-2014" Express-Printing LLC. 2014; 52. (In Russ)

4. YAnchenko N.I. Features of the chemical composition of snow cover and precipitation in the city of Bratsk N. I. YAnchenko, O. L. YAskina . [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2014; 324(3): 27-35. (In Russ)
5. Semenec E.S. Chemical composition of atmospheric precipitation in the Russian Arctic E. S. Semenec, P. F. Svistov, A. S. Talash. [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2017; 328(3): 27-36. (In Russ)
6. Orue M.R., Gaiero D., Kirschbaum A. Easonal characteristics of the chemical composition of rainwaters from Salta city, NW Argentina. *Environmental earth sciences*.2019; 78(1). DOI: 10.1007/s12665-018-8007-0.
7. Niu Y.W., Huang Z., Li X.L. [etc] Chemical characteristics and possible causes of acid rain at a regional atmospheric background site in eastern China. *Air quality atmosphere and health*. 2017; 10 (8): 971-980. DOI: 10.1007/s11869-017-0486-8.
8. Niu Y.W., Huang Z., Li X.L. [etc] Chemical characteristics and possible causes of acid rain at a regional atmospheric background site in eastern China. *Air quality atmosphere and health*. 2017; 10(8): 971-980.DOI: 10.1007/s11869-017-0486-8.
9. Lippmann M. Human health: Effects of ambient air particulate matter. Acid Rain: Are the Problems Solved? Conference Proceedings, 2, 2003; 83-92.
10. Brusselle GG, Bracke KR, Maes T, D'Hulst AI, Moerloose KB, Joos GF, Pauwels RA : Murine models of COPD. *Pulmonary Pharmacology & Therapeutics* 19, 2006; 155-165.
11. Glinyanova I.YU. [i dr.] Pat. 2712945 Rossijskaya Federaciya, MPK 51 A01G 23/00, G01N 33/46. Method for assessing environmental pollution / applicant and patentee [Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (VolgGTU)]. *Volgograd State Technical University* - № 2019117074; zayavl. 03.06.2019; opubl.03.02.2020; 4:10. (In Russ)

Сведения об авторе:

Глинянова Ирина Юрьевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; e-mail: ecoris@yandex.ru, ORCID 0000-0003-1388-1233

Information about the author:

Irina Yu. Glinyanova, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Life Safety in Construction and Urban Economy; e-mail: ecoris@yandex.ru, ORCID 0000-0003-1388-1233

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 07.09.2021.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 15.09.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 16.09.2021.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.042

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-99-105

Обзорная статья / Review

Изготовление арок из фибробетона для моста

М.Р. Нахаев

Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова,
364024, г. Грозный, ул. Шерипова, 32, Россия

Резюме. Цель. Рассматривается новый метод изготовления арок для моста из фибробетона в виде аналога несъемной опалубки. В рамках настоящей работы получены результаты исследований, подтверждающие эффективность получения фибробетонов для строительства мостовых арок различной конфигурации. **Метод.** Предлагаемые разработки позволят повысить прочностные характеристики мостовой арки для малых и средних мостов за счет оптимизации формы и размеров поперечного сечения в соответствии с изменением изгибающего момента по длине арки. Одновременно в несколько раз снизится ее металлоемкость. **Результат.** Полученные результаты подтвердили эффективность электростатического распыления сухой бетонной смеси с одновременным до увлажнением, что способствует работе капиллярных сил по уплотнению слоёв бетона и изготовлению профилированной прочной оболочки (аналог несъемной усиленной опалубки) из армированного фибробетона. **Вывод.** Варьируя формой и размерами поперечного сечения, толщиной оболочки и степенью ее армирования, а также заполняя высокопрочным фибробетоном эту оболочку можно проектировать и изготавливать мостовые арки на различную нагрузку.

Ключевые слова: арка для моста, гибкий арматурно-сеточный каркас, сухая бетонная смесь, волокна, электростатические распылители, генератор холодного тумана

Для цитирования: М.Р. Нахаев. Изготовление арок из фибробетона для моста. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(3):99-105. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-99-105

Manufacturing of fiber-reinforced concrete bridge arches

M.R. Nakhaev

A.A. Kadyrov Chechen State University,
32 Sheripova Str., 364024 Grozny, Russia

Abstract. Objective. A new method of manufacturing arches for a fiber-reinforced concrete bridge in the form of an analogue of permanent formwork is considered. Within the framework of this work, research results have been obtained that confirm the effectiveness of the system for the construction of bridge arches of various configurations. **Method.** The proposed developments will improve the strength characteristics of the bridge arch for small and medium bridges by optimizing the shape and size of the cross section in accordance with the change in the bending moment along the length of the arch. At the same time, reduce its metal consumption by several times. **Result.** The results obtained confirmed the effectiveness of electrostatic spraying of dry concrete mixture with simultaneous moisture up to moisture, which contributes to the work of capillary forces for compaction of concrete layers and the manufacture of a profiled strong shell (analogue of non-removable reinforced formwork) from reinforced fiber-reinforced concrete. **Conclusion.** By varying the shape and dimensions of the cross-section, the thickness of the shell and the degree of its reinforcement, as well as filling this shell with high-strength fiber-reinforced concrete, it is possible to design and manufacture bridge arches for various loads.

Key words: Bridge arch, flexible mesh reinforcement, dry concrete mix, fibers, electrostatic sprayers, cold fog generator

For citation: M.R. Nakhaev. Manufacturing of fiber-reinforced concrete bridge arches. . Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(3):99-105. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-99-105

Введение. Россию сравнивать с Китаем в области мостостроения, это всё равно, что сравнивать Россию с США по разработке и производству микроэлектроники. Одна из государственных задач Китая направлена на строительство скоростных автомобильных дорог и мостовых сооружений на них. Особенно впечатляют успехи КНР по использованию трубобетона в мостостроении. Всего в Китае к 2015 году построено более 300 [1] арочных мостов с применением трубобетона, в том числе и удивительный по параметрам мост Чунцин Ушань (Chongqing Wushan Bridge) через реку Янцзы (рис. 1), построенный в 2005 году [1]. Характеристики этого моста: пролет 460 метров, диаметр стальной трубы на арках 1,22 метра, толщина стенки трубы 22-25 миллиметров, стрела подъема арки 280 метров – наибольшая у такого типа мостов.



Рис. 1. Трубобетонный арочный мост Чунцин Ушань через реку Янцзы [2]

Fig. 1. Chongqing Wushan Concrete Arch Bridge over the Yangtze River

Применение трубобетона в строительстве, в том числе в мостостроении, известно с 1930-х годов [2]. Сейчас обычный трубобетон - это прямая балка или стойка, свая для мостовых опор, или изогнутая в виде арки стальная, полимерная или композитная труба, плотно заполненная бетоном. Например, один погонный метр трубобетона арок моста Чунцин Ушань имеет массу около 2,5-2,7 т. Арки этого моста, форма которых близка к параболе, работают в основном на сжатие. Если брать расчетное сопротивление до достижения предельного состояния по несущей способности стали трубы $R_s = 235$ МПа, а бетона $R_b = 17,3$ МПа [3], то предел по сжимающей нагрузке одной указанной арки из трубобетона около 34 МН (3400 тс). Это одно из основных преимуществ арочных мостов.

Постановка задачи. Для строительства малых и средних многопролетных арочных мостов с ездой поверху нередко используют фибропластиковые трубы, заполненные бетоном. Изготовление трубчатых арочных элементов из углеродного или стекловолоконного фибропластика включает в себя несколько этапов:

- а) Сборку трубчатой конструкции из фибропластика;
- б) Придание трубчатой конструкции арочной формы в соответствии с проектом;
- в) Пропитка смолой корпуса трубы.

В отличие от возведения больших арочных мостов, эта технология относительно проста, что дает сокращение сроков строительства.

Методы исследования. Кратко порядок строительства такой. Сначала готовят основания и строят опорные фундаменты из железобетона для арок. Устанавливают в береговые устои готовые изогнутые фиберпластиковые трубы параллельно с определенным шагом. Заполняют трубы бетоном. Для заливки арок используют

самоуплотняющийся бетон. Укладывают на арки гофрированный настил из фиброармированного пластика или оцинкованного стального профнастила. При необходимости по гофрированному настилу устраивается гидроизоляция.

Далее производят устройство бетонного защитного слоя по гофрированному настилу для увеличения несущей способности конструкции. Бетонный слой наносится на арматурную сетку. По слою из бетона делают засыпку грунтом и/или щебенкой. Выполняют устройство дорожной одежды и установку барьерных ограждений на мосту [4]. Такая технология строительства может быть перенесена на сооружение двух или многопролетных мостов с несущими элементами из заполненных бетоном фибропластиковых трубчатых арок.

Самая выгодная форма арки для моста - это соответствие линии изгиба арки уравнению цепной линии. В этом случае материал однородной арки с одинаковой по длине линейной плотностью испытывает только механические напряжения сжатия и не испытывает напряжений изгиба. У арок, имеющих по длине разную геометрию поперечного сечения [5] и, следовательно, разный момент поперечного сечения и разную линейную плотность, напряжения сжатия непременно намного превышают над напряжениями изгиба. Однако трубобетонные арки для мостов с длиной пролета, например, 50-60 м имеют диаметр стальной трубы 250-400 мм при толщине стенки трубы 10-15 мм. Такую трубу не просто изогнуть в соответствии с уравнением цепной линией или, на крайний случай, по параболе.

Например, в работе [6] предлагают такой метод. К длинному отрезку трубы, который нужно изогнуть и придать форму мостовой арки, прикладывают вдоль продольной оси силу, сжимающую трубу. Видимо, для этого на строительном полигоне предполагают использовать гидродомкрат. В мостостроении используют гидродомкраты, развивающие усилие от 2 до 10 МН (200-1000 тс).

Согласно методу, сжимают первоначально прямую или предварительно немного изогнутую трубу. Уменьшение расстояния между двумя концами трубы заставляет ее постепенно и упруго изгибаться в дугообразную форму. Затем оба конца арки фиксируют относительно друг друга в их смещенном положении, чтобы сохранить окончательную дугообразную форму арки.

Недостатки данной технологии: прогибаться труба будет по синусоиде. Это следует из решения известной задачи Эйлера о форме центрально-сжатого стержня при потере устойчивости. Прогиб по синусоиде несущего элемента - это не лучшая форма арки для моста. Кроме того, в преодолении сил упругости и начала текучести материала арки достигим только небольшой изгиб. Более сильному изгибу препятствует опасение, что форма поперечного сечения трубы в месте максимальной кривизны исказится до неприемлемой - станет эллипсовидной или появятся гофры.

По этим причинам в строительстве мостов чаще всего применяют арки, сваренные из многих прямолинейных кусков. Но поскольку в зоне соединения даже под небольшим углом прямолинейных отрезков трубы в сварочном шве имеет место концентрация напряжений, что снижает надежность арки. Поэтому в работе [7] места соединения прямых участков трубы под углом, заменены короткими дугообразными отрезками. Тем самым уменьшают напряжения в местах сварки.

Недостатки такого метода: в стремлении приблизить изгиб арки к оптимальной форме, не удастся избежать кусочно-линейной аппроксимации. Поэтому в составной арке остается много прямолинейных участков. Помимо того, количество сварочных швов увеличилось в два раза, что снижает надежность арки.

Задача предлагаемой разработки повысить прочностные характеристики мостовой арки для малых и средних мостов за счет оптимизации формы и размеров поперечного сечения в соответствии с изменением изгибающего момента по длине арки. Одновременно в несколько раз снизить ее металлоемкость.

Для этого вначале делают гибкий арматурно-сеточный каркас арки (рис. 2, а). При изготовлении арматурно-сеточного каркаса арки используют гибкую арматуру из стальной проволоки или гибкую углеродную арматуру диаметром 6-8 мм [8].

Углеродная арматура, несмотря на высокий модуль упругости (130 ГПа), гибка, благодаря своей большой длине при малом диаметре. При этом прочность углеродных композитов высока - от 1,6 до 2 ГПа. Для изготовления арматурно-сеточного каркаса арки применяют гибкие стальные сетки или углеродные сетки Carbon Wrap Grid 150/1200 [9].

Собирают гибкий арматурно-сеточный каркас 2, прокладывают гибкие арматурные канаты 3 (рис. 2, б). Закрепляют взаимное расположение арматурных канатов проволоочными фиксаторами 4 (рис. 2, б). Тем самым, во время сборки арматурно-сеточного каркаса, применяя комплекты фиксаторов 4 разного размера, закономерно изменяют размеры и форму поперечного сечения будущей арки, в соответствии с изменением изгибающего момента по длине арки. Для безопасной строповки готовой арки с помощью длинной траверсы к арматурно-сеточному каркасу во многих точках крепят такелажные петли и другие закладные детали в соответствии с проектом такелажных и монтажных работ.

На рис. 2, в-д фиксаторы арматуры условно не показаны. На канатах закрепляют гибкие стальные сетки или сетки из углеродного волокна 5 (рис. 2, в). Тем самым завершают создание формообразующей основы арки.

Готовый каркас 2 арки подвешивают за его концы на двух инвертарных мачтах 1, расставленных на расстоянии друг от друга, равном не менее пролёту арки по проекту так, чтобы свободно висящий гибкий арматурно-сеточный каркас принял форму цепной линии (рис. 2, а).

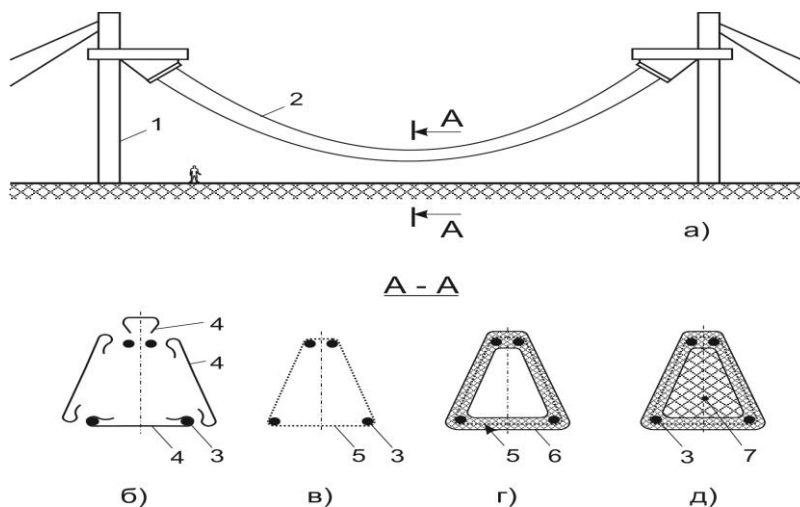


Рис. 2. Гибкий арматурно-сеточный каркас арки, свободно подвешенный на двух мачтах, по форме соответствует уравнению цепной линии

а) 1 - мачта, 2 - арматурно-сеточный каркас; б) 3 - гибкая арматура в виде проволоочных канатов или канатов из углеродного волокна; 4 - фиксаторы арматуры; в) 5 - гибкая стальная сетка или сетка из углеродных волокон; г) 6 - слои фибробетона, нанесенные электро-статическим методом на каркас; д) 7 - арматурно-сеточный каркас с осажденными электростатическим методом слоями фибробетона и заполненная бетоном внутренняя полость арки

Fig. 2. The flexible reinforcing mesh frame of the arch, freely suspended on two masts, corresponds in shape to the equation of the catenary

а) 1 - mast, 2 - reinforcing mesh cage; б) 3 - flexible reinforcement in the form of wire ropes or carbon fiber ropes; 4 - reinforcement clamps; в) 5 - flexible steel mesh or carbon fiber mesh; г) 6 - layers of fiber-reinforced concrete applied by electro-static method to the frame; д) 7 - reinforcing mesh frame with electrostatically deposited layers of fiber-reinforced concrete and the inner cavity of the arch filled with concrete

С помощью манипуляторов с электростатическими распылителями покрывают арматурно-сеточный каркас сухой бетонной смесью, содержащей упрочняющие волокна

[10]. Дозировано увлажняют водой осажденный слой бетонной смеси с целью достижения оптимального водоцементного отношения для применяемого типа цемента [11,12]. Повторяют процесс покрытия и увлажнения до получения необходимой толщины фибробетона 6 (рис. 2, г) с выдержками времени между циклами для набора начальной прочности осажденных слоев фибробетона.

После набора прочности слоев фибробетона необходимой толщины получается профильная труба (аналог несъемной опалубки) с разными размерами и формой поперечного сечения по длине арки из армированного фибробетона.

Благодаря тому, что момент инерции пропорционален четвертой степени высоты сечения, развитие сечения в направлении работы на изгибающий момент существенно увеличивает несущую способность. В зависимости от заданной прочности и массы арки, изделие может работать полым. Для большинства случаев строительства арочного моста полость внутри полученной оболочки арки, усиленной арматурой и волокном, заполняют бетоном 7 (рис. 2, д).

Обсуждение результатов. В процессе изготовления арки, увлажнение слоев сухой бетонной смеси и волокон проводят водой, тонкораспыленной с помощью генератора холодного тумана, при этом электростатическое осаждение сухой смеси проводят в палатке, которая охватывает арматурно-сеточный каркас и перемещается манипулятором вместе с электростатическими распылителями и расходными материалами вдоль каркаса арки.

Осаждение сухой смеси и увлажнение тонкораспыленной водой должны быть разделены расстоянием по длине арки и мягкой непромокаемой ширмой так, чтобы воздух с повышенной влажностью не достигал палатки с электростатическими распылителями.

Сухая бетонная смесь для послойного электростатического осаждения на арматурно-сеточный каркас должна состоять из гидрофильного цемента, тонкодисперсных минеральных частиц [13-15] и упрочняющих волокон (стеклянных [16-18], базальтовых, углеродных и др.), освобожденных от замасливателей и других гидрофобных веществ.

Это условие обеспечивает хорошее смачивание водой с добавкой поверхностно-активных веществ (ПАВ) бетонной смеси и волокон и способствует работе капиллярных сил по уплотнению слоёв фибробетона.

Если для улучшения свойств фибробетона добавляют в воду водорастворимые полимеры, то добавки ПАВ не требуется, так как многие водорастворимые полимеры сами обладают хорошей поверхностной активностью.

Для готовых арок массой до 100-150 т, их переворачивания в проектное положение и транспортировки на небольшое расстояние, а также установки арок на опоры, существует оборудование и технология монтажных работ.

Вывод. Рассмотренная технология базируются на опыте изготовления и применения трубобетонных арок в мостостроении, но с существенной модернизацией, улучшающей прочностные характеристики мостовой арки вследствие применения нового способа изготовления, а именно, становится возможным изменение формы и размеров поперечного сечения арки в соответствии с изменением изгибающего момента по длине изделия.

Технология позволяет изготавливать профилированную прочную оболочку (аналог несъемной усиленной опалубки) из армированного фибробетона. Варьируя форму и размеры поперечного сечения, толщину оболочки и степень ее армирования, а также заполняя высокопрочным бетоном эту оболочку, можно проектировать и изготавливать мостовые арки на различную нагрузку. За счет этого значительно снизится расход металла для изготовления арок для моста.

Библиографический список:

1. Чэнь Тао, Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Тенденция развития мостостроения в Китайской народной республике // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2015. № 3(11); URL: trts.esrae.ru/18-117 (дата обращения 25.07.2021).
2. http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Wushan_Yangtze_River_Bridge
3. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. М.: Трансжелдориздат. 1963. 110 с.
4. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой // Интернет-журнал «Науковедение». Том 7, №4 (2015). <http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (дата обращения 27.07.2021). DOI: 10.15862/95TVN415.
5. Мосты из стали и бетона: Технология строительства арочных мостов. <http://know-house.ru/avtor/0021/mosty-iz-stali-i-betona.html> (дата обращения 27.07.2021).
6. Патент [RU 2028438 C1 МПК E04B 1/32. Опубликовано 09.02.1995](#). Способ изготовления трубобетонной арки.
7. Европейский патент EP 2427601 B1. Опубликовано 05.04.2017. Способ строительства арочных конструкций.
8. Патент RU 2 690 245 C2 МПК E04B 1/32. Опубликовано 05.31.2019. Трубобетонная арка.
9. Углеродная арматура FibARM Rebar 6S и марки Monsterod 8S. <https://dipchel.ru/store/armatura-kompozitnaya/fibarm-rebar-6s.html> (дата обращения 27.07.2021).
10. Углеродная сетка CarbonWrap Grid 150/1200. <http://carbonwrap.pro/catalog/21-uglerodnaya-setka-carbonwrap-grid-150-1200.html>
11. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Электростатическое формование изделий из армированного бетона // Бетон и железобетон. 1997, N 6. С. 17-19.
12. Углеродное волокно из полиакрилонитрила (ПАН). <https://dipchel.ru/store/uglerodnoe-volokno/> (дата обращения 27.07.2021).
13. Hong Li, Cheryl Richards, James Watson. High-Performance Glass Fiber Development for Composite Applications // International Journal of Applied Glass Science, 5 [1] 65–81 (2014).
14. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат. 1984. 672 с.; С. 497-498.
15. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл.): Справочник / Ю.А. Дыховичный, Э.З. Жуковский, В.В. Ермолов и др.; Под ред. Ю.А. Дыховичного, Э.З. Жуковского. М.: Высш. школа. 1991. 543 с.; С. 174-175.
16. Нахаев М.Р. Составы ОТДВ для инъекционного закрепления грунтов с комплексным наполнителем различного генезиса / И.Я. Харченко, М.Р. Нахаев, С.-А.Ю. Муртазаев [и др.] // Экология и промышленность России. 2015. No 3. С. 48-52.
17. Salamanova M.Sh., SMurtazayev-A. Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders [Разработка составов многокомпонентных вяжущих с использованием тонкодисперсных порошков] Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. pp. 500-503. URL <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914231>.
18. Salamanova M.Sh., Mintshev M. Sh., Murtazayev S.-A. Yu., Saidumov M.S. Ecological Aspect of the Usage of Ash and Slag Waste in the Chechen Republic [Экологические аспекты использования золошлаковых отходов Чеченской Республики] Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, ISSN: 2352-5401, volume: 177 ISBN 978-94-6252-637-2, pp. 38-41. <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-18/articles>

References:

1. CHen' Tao, Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. The development trend of bridge construction in the People's Republic of China. [Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve] *Technical regulation in transport construction*. 2015; 3(11); URL: trts.esrae.ru/18-117. (In Russ)
2. http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Wushan_Yangtze_River_Bridge. (In Russ)
3. Rosnovskij V.A. Reinforced concrete in bridge construction. M.: *Transzheldorizdat*. 1963;110. (In Russ)
4. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mihaldykin E.S On the problem of calculating pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 1. Experience of using pipe concrete with a metal [Internet-zhurnal «Naukovedenie»] *Internet journal "Science of Science"*.2015; 7(4). DOI: 10.15862/95TVN415. (In Russ)

5. Bridges made of steel and concrete: Technology for the construction of arch bridges. <http://know-house.ru/avtor/0021/mosty-iz-stali-i-betona.html> (дата обращения 27.07.2021). (In Russ)
6. Patent RU 2028438 C1 MPK E04B 1/32. Opublikovan 09.02.1995. Sposob izgotovleniya trubobetonnoj arki. [Patent RU 2028438 C1 IPC E04B 1/32. Published on 02/09/1995. A method of manufacturing a pipe-concrete arch]. (In Russ)
7. Evropejskij patent EP 2427601 B1. Opublikovan 05.04.2017. Sposob stroitel'stva arochnyh konstrukcij. [European patent EP 2427601 B1. Published on 04/05/2017. A method of building arched structures.] (In Russ)
8. Patent RU 2690245 C2 MPK E04B 1/32 . Opublikovan 05.31.2019. Trubobetonnaya arka. [Patent RU 2 690 245 C2 IPC E04B 1/32. Published on 05.31.2019. Concrete arch.] (In Russ)
9. Uglernodnaya armatura FibARM Rebar 6S i marki Monsterod 8S. <https://dipchel.ru/store/armatura-kompozitnaya/fibarm-rebar-6s.html> [FibARM Rebar 6S and Monsterod 8S carbon fittings.]
10. Uglernodnaya setka CarbonWrap Grid 150/1200. <http://carbonwrap.pro/catalog/21-uglerodnaya-setka-carbonwrap-grid-150-1200.html> [Carbon Mesh CarbonWrap Grid 150/1200]. (In Russ)
11. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Electrostatic molding of reinforced concrete products. *Concrete and reinforced concrete*. 1997; 6:17-19. (In Russ)
12. Polyacrylonitrile Carbon Fiber (PAN). <https://dipchel.ru/store/uglerodnoe-volokno>. (In Russ)
13. Hong Li, Cheryl Richards, James Watson. High-Performance Glass Fiber Development for Composite Applications. *International Journal of Applied Glass Science*, 2014; 5(1):] 65–81. (In Russ)
14. Bazhenov YU.M., Komar A.G. Strojizdat.[Bazhenov Yu.M., Komar A.G. Technology of concrete and reinforced concrete products. M.: Stroyizdat. 1984; 497-498. (In Russ)
15. YU.A. Dykhovichnyj, E.Z. Zhukovskij, V.V. Ermolov i dr. M.: Vysshaya shkola. Modern spatial structures (reinforced concrete, metal ...): Handbook / Yu.A. Dykhovichny, E.Z. Zhukovsky, V.V. Ermolov and others; Ed. Yu.A. Dykhovichny, E.Z. Zhukovsky. M.: Higher. school. (In Russ)
16. Nahaev M.R. Compositions of OTDV for injection consolidation of soils with a complex filler of various genesis / I.Ya. Kharchenko, M.R. Nakhaev, S.-A.Yu. Murtazaev [et al.] *Ecology and Industry of Russia*. 2015; 3: 48-52. (In Russ)
17. Salamanova M.Sh., Murtazayev S.-A. Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST)*. 2019; 1: 500-503. URL <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914231>.
18. Salamanova M.Sh., Mintshev M. Sh., Murtazaev S.-A. Yu., Saidumov M.S. Ecological Aspect of the Usage of Ash and Slag Waste in the Chechen Republic. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" (ISEES 2018) ISSN Part of series: AER, 2018; 177: 38-41. <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-18/articles>.

Сведения об авторе:

Нахаев Магомед Рамзанович, кандидат технических наук, доцент, проректор по науке и инновациям, e-mail: mr-nakhaev@mail.ru

Information about author:

Magomed R. Nakhaev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Vice-Rector for Science and Innovation, e-mail: mr-nakhaev@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 01.09.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 10.09.2021.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.09.2021.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.335

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-106-116

Оригинальная статья / Original Paper

Промышленный опыт внедрения бесклинкерных вяжущих щелочной активации

^{1,2} **М.Ш. Саламанова, ¹З.Х. Исмаилова**

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 364051, Россия, г. Грозный, пр. Исаева, 100

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, 364051, Россия, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21

Резюме. Цель. Вопросы, связанные с поиском новых менее энерго- и материалоемких вяжущих, давно стоят на повестке многих мировых экологических форумов, так как карбонатная технология портландцемента влечет за собой загрязнение окружающей атмосферы и среды обитания, да и цена на этот продукт неоправданно растет. На наш взгляд, щелочные цементы могли бы внести свою лепту в развитие строительной индустрии. В рамках настоящей работы получены результаты проведенных исследований, подтверждающие эффективность развития бесклинкерной технологии получения вяжущих щелочного затворения и композитов на их основе с использованием алюмосиликатных добавок, как природного, так и техногенного происхождения. **Метод.** Методы электронной микроскопии и дифференциально-термического анализа позволяют изучить природу компонентов и процессы формирования структуры цементного камня. Отходы цементной промышленности обладают соответствующим гранулометрическим и химическим составами. Алюмосиликатная минералогия исследуемых порошков подтверждает их соответствие готовой сырьевой смеси портландцементного клинкера, что является ключевым моментом возможности их эффективного использования. **Результат.** Проведенные дифференциально-термические анализы подтвердили присутствие следующих фаз в составе цементного камня на вяжущих связках «цементная пыль – щелочной активатор» цеолитовых, кальцита, слюды типа мусковит, монтриллонита, оксид магния, сульфоалюминатов кальция, структуры этtringита, гидрохлоралюмината кальция, гидросиликатов кальция, гидрида силиката кальция. **Вывод.** Полученные закономерности процессов формирования структуры вяжущей связки «отходы цементной промышленности – Na_2SiO_3 » позволяют трансформировать данные разработки для создания прочных и долговечных искусственных строительных композитов, конкурирующих с бетонами на портландцементе.

Ключевые слова: бесклинкерные цементы, минеральные добавки, щелочной раствор, аспирационная пыль, вулканический туф, геополимеры, вяжущая связка

Для цитирования: М.Ш. Саламанова., З.Х. Исмаилова. Промышленный опыт внедрения бесклинкерных вяжущих щелочной активации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 106-116. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-106-116

Industrial experience in the implementation of clinker-free binders of alkaline activation

^{1,2} **M.Sh. Salamanova, ¹Z.Kh. Ismailova**

¹Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov, 100 Kh. Isaev Ave., Grozny, 364051, Russia

² Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, 21 Staropromyslovskoe highway, Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. Issues related to the search for new, less energy- and material-intensive binders have long been on the agenda of many world environmental forums, since the carbonate technology of Portland cement entails pollution of the surrounding atmosphere and habitat, and the price of this product is unjustifiably growing. In our opinion, alkaline cements could contribute to the construction industry. Within the framework of this work, research results have been obtained that confirm the effectiveness of the development of a clinker-free technology for producing alkaline-mixed binders and composites based on them using aluminosilicate additives, both natural and technogenic origin. **Method.** The methods of electron microscopy and differential thermal analysis make it possible to study the nature of the components and the processes of formation of the structure of the cement stone. Waste from the cement industry has the appropriate granulometric and chemical composition, the aluminosilicate mineralogy of the studied powders confirms their compliance with the ready-made raw mix of Portland cement clinker, which is the key to the possibility of their effective use. **Result.** The carried out differential thermal analyzes confirmed the presence of the following phases in the composition of cement stone on binding bonds "cement dust - alkaline activator" of zeolite, calcite, mica type muscovite, montrillonite, magnesium oxide, calcium sulfoaluminates, ettringite structure, calcium hydrochloraluminum, calcium hydrosilicate, calcium hydrosilicate calcium. **Conclusion.** The obtained regularities of the processes of formation of the structure of the cement binder "waste of the cement industry - Na_2SiO_3 ", will transform these developments to create strong and durable artificial building composites competing with concretes on Portland cement.

Key words: clinker-free cements, mineral additives, alkaline solution, aspiration dust, volcanic tuff, geopolymers, binder

For citation: M.Sh. Salamanova, Z.Kh. Ismailova. Industrial experience in the implementation of clinker-free binders of alkaline activation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(3):106-116. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-106-116

Введение. Вопросы, связанные с поиском новых менее энерго- и материалоемких вяжущих, давно стоят на повестке многих мировых экологических форумов, так как карбонатная технология портландцемента влечет за собой загрязнение окружающей атмосферы и среды обитания, да и цена на этот продукт неоправданно растет. На наш взгляд, щелочные цементы могли бы внести свою лепту в развитие строительной индустрии, хотя вряд ли можно утверждать, что это новые вяжущие вещества, правильней сказать, «хорошо забытые старые», с многовековой историей, да и в настоящее время широко используются в таких передовых странах мира, как Япония, Сингапур, Нидерланды, Италия, Германия и др. Производители щелочных цементов в приоритете преследуют минимизацию эмиссии парниковых газов, серы, диоксинов и пыли в атмосферу, и все это благодаря отказу от высокотемпературного обжига. К тому же, композиты на щелочных цементах отличаются высокой прочностью и химической стойкостью, сопротивлением проникновения хлоридов, короткими сроками схватывания, низкой экзотермией при гидратации, хорошими технологическими показателями и др. [1 – 9, 15, 21]. Эффективность данной технологии несомненна и положительный мировой опыт этому подтверждение, но в нашей стране щелочные цементы не нашли широкого применения и связано это в большей мере с отсутствием финансирования, ведь необходимы достаточно серьезные вложения, как в опытное производство, так и в науку; еще одна причина – слабая информативность проектов.

На протяжении многих лет делегации различных компаний наблюдают за жилым 20 этажным домом в городе Липецке, построенном в 1987 году (рис. 1) из монолитного шлакощелочного бетона. Жилое здание, как мы видим на фотографии, сохраняет свою долговечность, несущую способность и надежность даже через 34 года эксплуатации, что

заставляет задуматься о помощи, оказанной производителями окружающей среде, ведь дом построен полностью из отходов различных производств, без дорогого и ресурсоемкого портландцемента.



Рис 1. Жилой дом из шлакощелочного бетона г. Липецк
Fig 1. Residential building from slag-alkaline concrete Lipetsk

В качестве вяжущего использовался тонкоизмельченный доменный гранулированный шлак, после смешивания с крупным и мелким заполнителями (отвалы шлаки) смесь активировалась щелочным раствором из отходов производства каустической соды. Конечно же, это не единственный пример внедрения щелочных цементов, шлакощелочные бетоны хорошо себя проявили при работе в условиях воздействия различных видов агрессии. Мониторинг состояния композитов свидетельствуют [10 – 28], что с течением времени наблюдается прирост прочности на 12-21%, несмотря на действие климатических и атмосферных реагентов, агрессивных сред, динамических и статических нагрузок. Следовательно, утилизируя огромный объем отходов данная технология станет находкой, как для металлургических комбинатов, так и для предприятий строительной индустрии, тем самым актуальные проблемы экологических «сбоев» земной цивилизации частично, но будут решены.

Постановка задачи. Именно ресурс- и энергосберегающие принципы в направлении бесклнкерных цементов привлекли наше внимание, но получение шлакощелочных вяжущих сопровождалось необоснованными расходами на транспортировку отходов черной металлургии, на тонкое измельчение шлаков, и все это в комплексе усложняло промышленную апробацию разработок. Но известно, что доменные гранулированные шлаки отечественных металлургических комбинатов отличаются оксидным составом схожим с портландцементным клинкером, поэтому для получения щелочных цементов был исследован обширный диапазон алюмосиликатных и кремнеземистых минеральных добавок, как природного, так и техногенного происхождения, но местного уровня.

Методы исследования. Для более полного представления и выделения щелочной компоненты гидравлических вяжущих П.В. Кривенко предложил следующую классификацию, приведенную в табл.1.

Таблица 1. Классификация гидравлических вяжущих веществ [4]

Table 1. Classification of hydraulic binders [4]

Тип цемента Cement type	ПЦ	Щелочной ПЦ	ШЩЦ	ЗЩЦ	ГЩЦ
Исходная твердая фаза The original solid phase	клинкер clinker	клинкер + R ₂ O clinker	доменный шлак + R ₂ O	зола + R ₂ O	алюмосиликат + R ₂ O
Содержание R ₂ O Content	≤ 0,6%	1 – 5 %	2 – 8 %	5 – 10 %	10 – 20 %
Продукты гидратации Products hydration	0% R₂O – Al₂O₃ – SiO₂ – H₂O 100% → 100% CaO – SiO₂ – H₂O ← 0%				

Примечание: ПЦ – портландцемент; ШЩЦ – шлакощелочной цемент; ЗЩЦ – золощелочной цемент; ГЩЦ – геополимерный цемент; R₂O – Na₂O; K₂O; Li₂O.

Note: PC - Portland cement; ШЩЦ - slag-alkaline cement; ZSchTS - ash-alkali cement; HPC - geopolymer cement; R₂O – Na₂O; K₂O; Li₂O.

Представленные характеристики гидравлических цемента показывают, что исходная твердая фаза и количественное содержание щелочной компоненты играют решающую роль в процессе структурообразования цементного камня и образовании продуктов гидратации.

В геополимерных вяжущих необходимо учитывать такой критерий, как способность твердой фазы к диспергации и конденсации в щелочной среде, с формированием трехмерных сетчатых решеток из тетраэдров AlO_4 и SiO_4 (рис. 2). В результате геосинтеза образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, гель кремниевой кислоты, щелочные и щелочно-щелочноземельные гидроалюмосиликаты, гидроалюминаты, гидроферриты, то есть все перечисленные соединения являются труднорастворимыми и гарантируют заявленные свойства цементного камня.

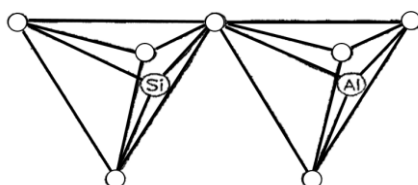


Рис. 2. Структура геополимеров в виде тетраэдров AlO_4 и SiO_4 [5]

Fig. 2. The structure of geopolymers in the form of tetrahedrons AlO_4 и SiO_4 [5]

Для получения вяжущих щелочного затворения категории геополимеры и подтверждения приведенных научных гипотез, были исследованы следующие материалы: клинкерная и аспирационная пыль, вулканический туф, термообработанная при температуре 700°C опока, щелочной раствор метасиликата натрия ($n = 2,4$; $\rho = 1,42 \text{ г/см}^3$).

Обсуждение результатов. Исследование энергодисперсионного микроанализа предварительно подготовленных порошков проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV с системой INSA Energy и системой анализа текстуры и структуры HKL готового образца, представленного на рис.3.

Результаты энергодисперсионного микроанализа показали, что все исследуемые минеральные материалы обладают соответствующим оксидным составом, способствующим геосинтезу гидроалюмосиликатов щелочной и щелочноземельной природы. Минеральная добавка вулканического туфа более дисперсная и содержит аморфную субстанцию, что позволяет создавать более плотную структуру цементного камня и дополнительную порцию новообразований.

Порошок из термообработанной при 700°C опоки оказался экономически неперспективным в вяжущей связке, учитывая тепловую активацию и тонкое измельчение, и то, что результаты приблизительно такие же, как в композициях из техногенного сырья. Отходы цементной промышленности в виде аспирационной и клинкерной пыли – продукты теплового воздействия портландцементной сырьевой смеси, и являются ценным и полноценным сырьем, но на производстве их не возвращают повторно в технологический процесс, а извлекая из пылесадительных камер, избавляются вывозом за территории предприятия, и это опять же нанося вред экосистемам. Поэтому при моделировании составов бесклинкерных композиций большее внимание уделялось именно на техногенное сырье, не требующее дополнительной технологической обработки.

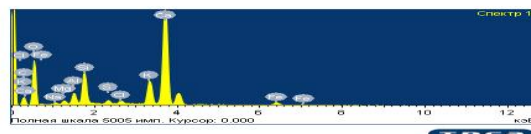
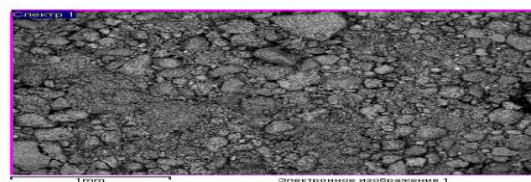
После многочисленных подборов и исследований была получена наиболее рациональная рецептура вяжущей связки «аспираторная пыль – клинкерная пыль – вулканический туф – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ »:

– аспираторная пыль, $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$	65%
– вулканический туф, $S_{уд} = 620 \text{ м}^2/\text{кг}$	10%
– клинкерная пыль, $S_{уд} = 210 \text{ м}^2/\text{кг}$	5%
– метасиликат натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, $n = 2,4$; $\rho = 1,42 \text{ г/см}^3$	20%

А-1 аспирационная пыль

Элемент	Весовой %		
C	10.45		
O	46.32		
Na	0.43	Na ₂ O	0.38
Mg	0.73	MgO	1.21
Al	1.83	Al ₂ O ₃	3.46
Si	5.10	SiO ₂	10.91
S	0.62	SO ₃	1.55
Cl	0.59		
K	5.56	K ₂ O	6.70
Ca	26.48	CaO	37.05
Fe	1.70	Fe ₂ O ₃	2.43

Комментарий:

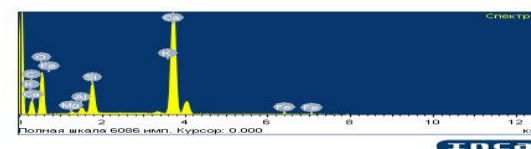
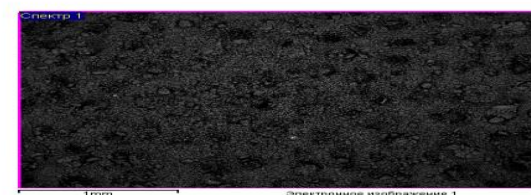


a)

М-2 мергель обжиг

Элемент	Весовой %		
C	16.66		
O	47.19		
Mg	0.26	MgO	0.43
Al	1.01	Al ₂ O ₃	1.91
Si	5.01	SiO ₂	10.72
K	0.43	K ₂ O	0.52
Ca	28.96	CaO	40.52
Fe	0.48	Fe ₂ O ₃	0.69

Комментарий:



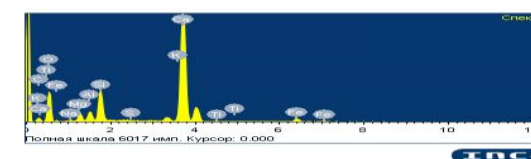
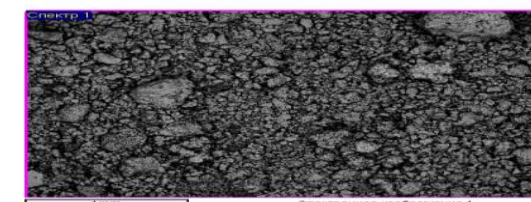
б)

в)

К-1 клинкерная пыль

Элемент	Весовой %		
C	3.19		
O	44.79		
Na	0.23	Na ₂ O	0.31
Mg	1.86	MgO	3.08
Al	2.05	Al ₂ O ₃	3.87
Si	6.21	SiO ₂	13.28
S	0.14	SO ₃	0.33
K	1.02	K ₂ O	1.23
Ca	37.51	CaO	52.48
Ti	0.16	TiO ₂	0.27
Fe	2.83	Fe ₂ O ₃	4.03

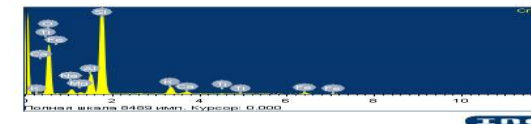
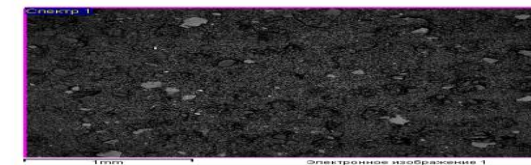
Комментарий:



В-1 вулканический туф

Элемент	Весовой %		
O	51.84		
Na	2.64	Na ₂ O	3.56
Mg	0.43	MgO	0.71
Al	6.68	Al ₂ O ₃	12.63
Si	31.04	SiO ₂	66.39
K	3.91	K ₂ O	4.71
Ca	1.09	CaO	1.32
Ti	0.29	TiO ₂	0.48
Fe	2.08	Fe ₂ O ₃	2.97

Комментарий:



с)

Рис. 3. Энергодисперсионный микроанализ аспирационной пыли (а), термоактивированного мергеля (б), клинкерной пыли (в), вулканического туфа (с)

Fig. 3. Energy dispersive microanalysis of aspiration dust (a), thermally activated marl (b), clinker dust (c), volcanic tuff (c)

Анализ образца цементного камня исследуемой вяжущей связки проводили методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на приборе Q - дериватограф - 1500 °С в следующем режиме: нагревали до 900 °С, со скоростью 10 °С, масса навески составляла 8,3 мг.

На ДТА кривой (рис.4) образование указанных соединений подтверждается: 80 – 200 °С – интенсивная потеря массы с поглощением тепла, доля потери массы самая наибольшая из 4-х образцов, $\Delta m \approx 30 - 35\%$, $t_{max} - 130$ °С.

При температурах 220 – 470 °С наблюдается равномерная потеря массы, при 330 °С наблюдается эндотермический эффект.

Начиная с 470 °С идет более интенсивная потеря массы, при 580 – 590 °С есть небольшой эндоэффект. Начиная с 740 – 860 °С – идет очень интенсивная потеря массы $\Delta m \approx 30\%$ с поглощением тепла, $t_{max} - 840$ °С.

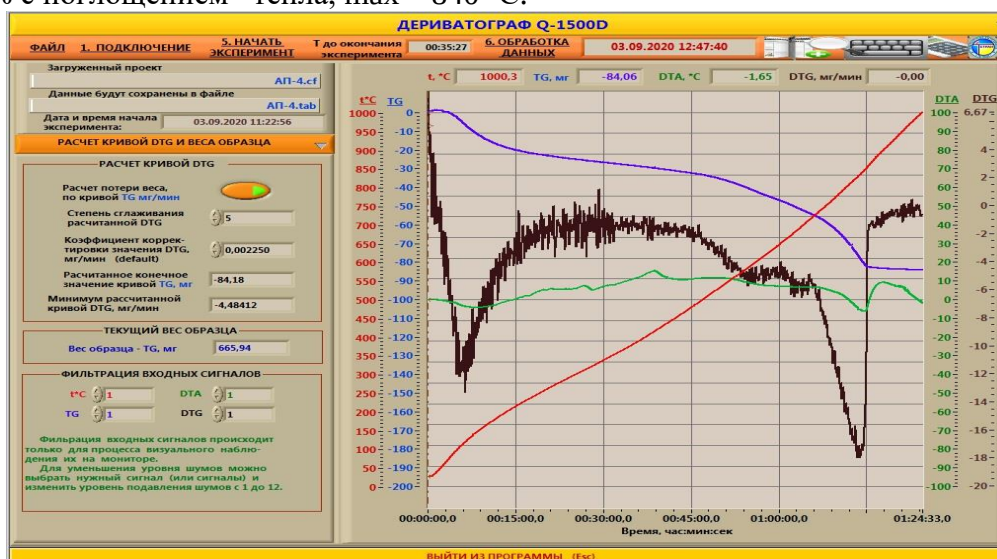


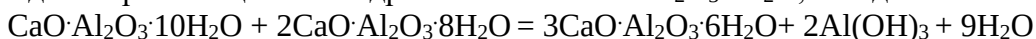
Рис. 4. ДТА продуктов гидратации цементного камня на вяжущей связке «аспирационная пыль – клинкерная пыль – вулканический туф – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ »
Fig. 4. DTA of hydration products of cement stone on a binding bond "aspiration dust - clinker dust - volcanic tuff - $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ "

Наличие сульфоалюмината кальция подтверждается пиком, характерным для гидратации при температуре 250 °С и пиком при 580 °С, характерным для гидратации с выделением $\text{Al}(\text{OH})_3$. Вероятней всего, «войлочные» агрегаты по данным микроструктурного анализа соответствуют $\text{Al}(\text{OH})_3$. Также продуктом гидратации могут являться гидроалюминаты кальция сложного состава.

Эндоэффекты при температуре 262 °С соответствуют гидратации гидроалюмината кальция состава $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Данный гидроалюминат очень неустойчив. Поэтому процесс гидратации сопровождается переходом в восьмиводный гидроалюминат, который имеет гексагональную кристаллическую решетку и гидроксид алюминия.



Если в системе находятся одновременно десятиводный и восьми водный гидроалюминат кальция, то при повышенных температурах 150 °С происходит переход в шестиводный трехкальциевый гидроалюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, с выделением $2\text{Al}(\text{OH})_3$:



При этом происходит изменение структуры из гексагональной кубической структуры в кубическую. В результате чего возникают сильные внутренние напряжения. Они нарушают структуру материала, вызывают образование микро- и макротрещин, уменьшают прочность. Эндоэффекты при температуре 358, 535 °С указывают на наличие гидроалюмината кальция состава $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, при данной температуре происходит дальнейшая гидратация $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Также при этой температуре возможно

разложение гидроокиси кальция, которая содержится в образце, либо образована в результате активации раствором метасиликата натрия.

Эндоэффект 490 °С. Наложение двух пиков – один из них дегидратация характерная для сульфоалюмината кальция и второй эндоэффект дегидратация гидрохлоралюмината кальция. Эндоэффект 530 °С также характерен для гидрохлоралюмината кальция.

При температуре 640 °С эндоэффект характерен для карбоната магния и может свидетельствовать о наличии глинистых минералов групп каолинита. Также в температурном интервале 600 – 750 °С происходит потеря конституционной воды.

Как уже говорилось ранее, эндотермические эффекты при температуре 450 и 650 °С отвечают дегидратации глинистых минералов мусковита и монтриллонита. Эндоэффект 750 °С - полная дегидратация гидроалюмината кальция.

Нет пика при 800 °С, характерного для сульфоалюмината кальция высокоаморфной фазы, что говорит о том, что содержится мало аморфной безводной фазы и пики характерны для высокосульфатной формы. По термогравиметрическим кривым можно рассчитать содержание конституционной и адсорбционной воды в образце. Температурный интервал удаления адсорбционной воды 60 – 200 °С.

Определим потерю массы в данном интервале температур. Общая потеря массы составляет 14,94 % в интервале температур 30 – 900 °С. Потеря массы в температурном интервале 60 – 200 °С составляет 3,4 %. Рассчитаем содержание адсорбционной воды.

$$X = \frac{3,4 \cdot 100}{14,94} = 22,76\%$$

Таким образом содержание адсорбционной воды находится в пределах 21 – 23%. Так как погрешность данного метода около 1%.

Потеря конституционной воды происходит при температуре 650 – 750 °С. Потеря массы в данном температурном интервале составляет 6,5 %. Теперь рассчитаем содержание конституционной воды.

$$X = \frac{6,5 \cdot 100}{14,94} = 43,51\%$$

Таким образом, потеря конституционной воды составляет 42 – 44%.

Исследование цементного камня на портативном рентгенофлуоресцентном анализаторе МетЭксперт по измерению массовой доли химических элементов в веществах в твердом состоянии, представлено на рис. 5 и в табл. 2. Результаты исследования подтвердили присутствие в цементном камне гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов кальция.

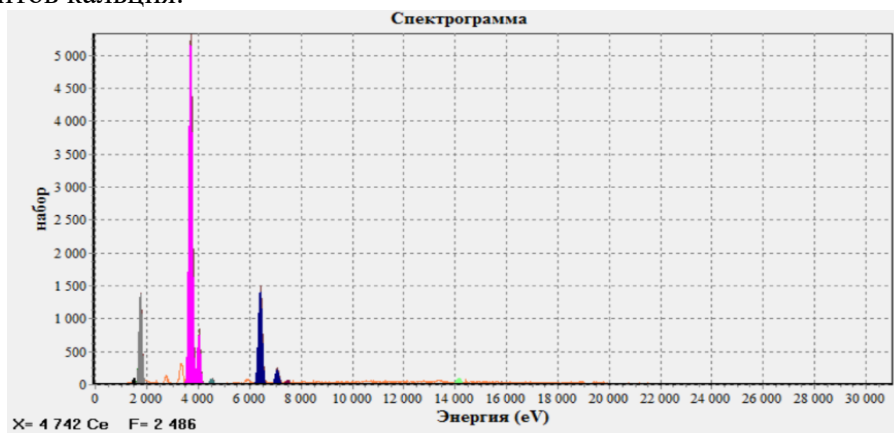


Рис. 5. Спектрограмма цементного камня на вяжущей связке «аспирационная пыль – клинкерная пыль – вулканический туф – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ »

Fig. 5. Spectrogram of cement stone on a binder "aspiration dust - clinker dust - volcanic tuff - $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ "

Таблица 2. Элементный состав цементного камня
Table 2. Elemental composition of cement stone

Элементы	Содержание, %
Al	7,18
Si	39,50
Ca	46,68
Ti	0,80
Fe	5,39
Na	0,17
Sr	0,25

Вывод. Проведенные дифференциально-термические и рентгенофлуоресцентный анализы подтвердили присутствие следующих фаз в составе цементного камня на геополлимерных вяжущих связках «цементная пыль – вулканический туф – щелочной активатор» цеолитовых, кальцита, слюды типа мусковит, монтриллонита, оксид магния, сульфоалюминатов кальция, структуры этtringита, гидрохлоралюмината кальция, гидросиликатов кальция, гидроксида силиката кальция.

Обнаруженные фазы в образцах цементного камня относятся к труднорастворимым и прочным соединениям.

Эффективность применения отходов цементной промышленности для получения строительных композитов на геополлимерных вяжущих щелочного затворения не вызывает сомнений. К тому необходимо отметить, что аспирационная и клинкерная пыль используется в естественном без механического вмешательства виде, что позволит снизить себестоимость предлагаемого продукта и расширить область применения. Регулируя количественное соотношение и общую поверхность этих компонентов, введением в систему тонкодисперсных добавок алюмосиликатной природы, можно получать качественный долговечный материал с новым уровнем технологических и эксплуатационных характеристик.

Библиографический список:

1. Lopez F.J. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation / F.J. Lopez, S. Sugita, M. Tagaya, T. Kobayashi // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2014. – № 2. – P. 16 – 27.
2. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. – 2020. – № 1-2. – С.73-77.
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin - Based Geopolymer // Materials – 2016. –Vol. 9. – P. 767.
4. Krivenko, P. Influence of alkali activation on the structure formation and properties of blastfurnace cement / P. Krivenko, O. Petropavlovskii, M. Mokhort, V. Puchkar // Proceed. 3rd International Symposium "Non-traditional cement&concrete" (Brno). - 2008. - P.400-409.
5. Рахимова, Н.Р. Прочность камня композиционных шлакощелочных вяжущих с цеолитсодержащими добавками / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов // Известия КазГАСУ. - 2008. - №2(10). - С. 131-134.
6. Саламанова М.Ш., Алиев С.А., Муртазаева Р.С-А. Структура и свойства вяжущих щелочной активации с использованием цементной пыли // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – № 2 (Т.46). – С.148-158.
7. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. – 2018. – №2 (Т.46). – С. 65 –70.
8. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing (Особенности получения мелкозернистых бетонов на основе бесклинкерных вяжущих щелочного затворения) 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019, Belgorod: 2019. – pp.385-388.
9. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // Cement and Concrete Research – 2016. – P.163 – 173.
10. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // Строительные материалы. – 2008. – №9. – С.77 – 80.

11. Hardjito, D. On the development of fly ash-based geopolymer concrete / D. Hardjito, S. Wallah, D. Sumajouw, B. Rangan // *ACJ Materials Journal*. – 2004. – vol.101.– pp. 467– 472.
12. Davidovitz, J. *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. – 2008. – 592 pp.
13. Fadhil Nuruddin M. Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self- Compacting Geopolymer Concrete / M. Fadhil Nuruddin, S. Demie, M. Fareed Ahmed, Nasir Shafiq. // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011. – № 75. – P.908 – 914.
14. Рахимова Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов // *Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. – 2013. – № 16. – С. 204 – 216.
15. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // *Construction and Building Materials*. – 2010. Vol. 24. – P. 2084 – 2090.
16. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // *International Journal of Mineral Processing*. – 2013. – Т. 216. – С. 102 –107.
17. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. – P.500 – 503.*
18. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклнкерных вяжущих щелочной активации) / *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. – P. 457 – 460.*
19. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // *Цемент и его применение*. – 2016. – № 3. – С. 96 – 99.
20. Ушеров-Маршак А.В., Першина Л.А., Циак М. Совместимость цементов с химическими и минеральными добавками. Ч. 1 // *Цемент*. 2002. № 6. С. 6–9
21. Dombrowski K., Buchwald A., Weil The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers // *Journal of Materials Science*. – Vol. 42. – №. 9. – 2007. – P. 3033 – 3043.
22. Pawlasova S., Skvara F. High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // *Alkali Activated Materials*. – 2008. – P. 523 – 525.
23. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // *Advances in Nano Research*. – 2015. – Vol. 3. – №. 4. – P.225 – 242.
24. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. – 2016. – Vol. 5. – Issue 1. – P. 37– 46.
25. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // *Int. J. Chem. Sci.* – 2016. – № 14(S1). – P. 115 – 126.
26. Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р., Исмаилова З.Х. Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклнкерного вяжущего щелочной активации // *Международный научно-исследовательский журнал «Строительные материалы и изделия»*. – 2020. – Т.3. – №1. – С. 21-29.
27. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Ismailova Z. Kh., Ibragimov S. Kh. Wastes recycling in the construction (Повторное использование отходов промышленности в строительстве) // *ETSaP-2019 «Углеводороды и минералы: извлечение, транспортировка, хранение и обработка» в серии IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. -V.663. -№1. – P.1-7.*
28. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T. On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete // *В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. С. 04018.*

References:

1. Lopez F.J. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation / F.J. Lopez, S. Sugita, M. Tagaya, T. Kobayashi. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014; 2: 16 – 27.
2. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Nahaev M.R. Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry. *Stroitel'nye materialy [Stroitelnye materialy]*. 2020;1-2:73-77. (In Russ)

3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin - Based Geopolymer. *Materials*. 2016; 9: 767.
4. Krivenko, P. Influence of alkali activation on the structure formation and properties of blastfurnace cement / P. Krivenko, O. Petropavlovskii, M. Mokhort, V. Puchkar // *Proceed. 3rd International Symposium "Non-traditional cement&concrete"* (Brno). 2008;400-409.
5. Rakhimova, N.R. Stone strength of composite slag-alkali binders with zeolite-containing additives / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // *Izvestiya KazGASU*. 2008; 2 (10): 131-134. (In Russ)
6. Salamanova M.Sh., Aliev S.A., Murtazaeva R.S.-A. Structure and properties of alkaline activation binders using cement dust [*Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019;. 46(2): 148-158. (In Russ)
7. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. *Privolzhsky scientific journal*. 2018; 46(2): 65–70. (In Russ)
8. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing (Особенности получения мелкозернистых бетонов на основе бесклинкерных вяжущих щелочного затворения) 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) V. G. Shukhov Belgorod State Technological University, 23–27 September 2019, Belgorod: 2019;385-388. (In Russ)
9. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture . *Cement and Concrete Research*. 2016;163 – 173.
10. Rakhimova H.P. State and promising directions of development of research and production of composite slag-alkali binders, solutions and concretes. [*Stroitel'nye materialy*] *Construction Materials*. 2008; 9:77 - 80. (In Russ)
11. Hardjito, D. On the development of fly ash-based geopolymer concrete / D. Hardjito, S. Wallah, D. Sumajouw, B. Rangan. *ACJ Materials Journal*. 2004;101:467– 472.
12. Davidovitz, J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008; 592.
13. Fadhil Nuruddin M. Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self- Compacting Geopolymer Concrete / M. Fadhil Nuruddin, S. Demie, M. Fareed Ahmed, Nasir Shafiq. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011; 75: 908 – 914.
14. Rakhimova N.R. Composite slag-alkali binders with mineral additives of various types of activity / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2013; 16: 204 - 216. (In Russ)
15. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 2084 – 2090.
16. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*. 2013; 216: 102 –107.
17. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019;1:500 – 503.
18. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклинкерных вяжущих щелочной активации) / *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019; 1: 457 – 460.
19. Rakhimov M.M., Khabibullina N.R., Rakhimov R.Z. The mechanism of curing borate salt solutions with slag-alkali binders. *Cement and its application*. 2016; 3: 96 - 99.
20. Usharov-Marshak AV, Pershina LA, Tsiak M. Compatibility of cements with chemical and mineral additives. Part 1 *Cement and its application*. 2002; 6: 6–9
21. Dombrowski K., Buchwald A., Weil The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers . *Journal of Materials Science*. 2007; 42(9): 3033 – 3043.
22. Pawlasova S., Skvara F. High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // *Alkali Activated Materials*. 2008; 523 – 525.
23. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // *Advances in Nano Research*. 2015; 3(4):225 – 242.

24. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016; 5(1): 37– 46.
25. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand. *Int. J. Chem. Sci.* 2016; 14(S1): 115 – 126.
26. Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R., Ismailova Z.Kh. Regularities of the processes of formation of the structure and strength of the linker-free binder with alkaline activation. *International research journal "Building materials and products"*. 2020; 3(1): 21-29. (In Russ)
27. Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Ismailova Z. Kh., Ibragimov S. Kh. Wastes recycling in the construction. *ETSaP-2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;663(1):1-7.
28. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T. On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete. *MATEC Web of Conferences 27. Ser. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018"* 2018; 04018.

Сведения об авторах:

Саламанова Мадина Шахидовна, кандидат технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна, кафедра технологии строительного производства, e-mail: madina_salamanova@mail.ru ORCID 0000-0002-1293-7090

Исмаилова Зулихан Хасановна, кандидат технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна, кафедра технологии строительного производства, e-mail: ismailova-z-h@mail.ru

Information about authors:

Madina Sh. Salamanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design, Department of Construction Production Technology, e-mail: madina_salamanova@mail.ru

Zulikhan Kh. Ismailova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design, Department of Construction Production Technology, e-mail: ismailova-z-h@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 13.07.2021.

Одобрена после рецензирования /Revised 08.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 20.08.2021.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132

Оригинальная статья / Original Paper

Оптимизация параметров шпренгельных балок с двумя стойками

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

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

Резюме. Цель. На основании теоретических результатов, полученных в [17], в настоящей статье проведён анализ влияния различных конструктивных параметров на собственный вес и стоимость металла шпренгельных балок с двумя стойками. Необходимо получить оптимальный параметр, позволяющий уменьшить расчётный изгибающий момент в сечении шпренгельной балки с двумя стойками. **Метод.** Путём выравнивания изгибающих моментов в различных расчётных сечениях шпренгельной балки обеспечивается уменьшение внутренних силовых факторов. **Результат.** Составлено соответствующее уравнение оптимизации параметров балки и получена формула для определения оптимального параметра конструкции в целом. На примере числовых вычислений показано уменьшение расчётного изгибающего момента на 14% по сравнению со шпренгельными балками без оптимизации. **Вывод.** Предлагаемые методика и алгоритм свидетельствуют об эффективности и рациональности полученного оптимального параметра конструкции.

Ключевые слова: шпренгельная балка, упруго-податливая опора, оптимальные параметры, алгоритм, дифференциальные уравнения, изгибающий момент

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Оптимизация параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3):117-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132

Optimization of the parameters of truss beams with two posts

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

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

Abstract. Objective. Based on the theoretical results obtained in the article [17], here the analysis of the influence of various design parameters on the own weight and cost of metal of truss beams with two posts is carried out. An optimal parameter has been obtained that makes it possible to reduce the calculated bending moment in the cross section of a truss beam with two struts. **Method.** By equalizing the bending moments in various design sections of the truss beam, the internal force factors are reduced. The corresponding equation for optimizing the parameters of the beam has been drawn up and a formula has been obtained to determine the optimal parameter of the structure as a whole. **Result.** Using the example of numerical calculations, a decrease in the calculated bending moment by 14% compared to truss beams without optimization is shown. **Conclusion.** The proposed method and algorithm testify to the efficiency and rationality of the obtained optimal parameter of the structure as a whole.

Keywords: truss beam, elastic-yielding support, optimal parameters, algorithm, differential equations, bending moment

For citation: A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Optimization of the parameters of truss beams with two posts. Herald of Daghestan State Technical University.

Technical Sciences. 2021; 48(3): 117-132. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132.

Введение. Ранее, в проведенных нами исследованиях, была рассмотрена оптимизация параметров шпренгельных балок с одной стойкой. Были определены оптимальные параметры конструкции, которые приводят к существенному уменьшению собственного веса и стоимости металла. При этом с целью упрощения технологии изготовления конструкции предлагалось проектировать элементы шпренгельной балки из прокатанных профилей, не требующих технологических затрат [1,6,8, 17, 18].

Шпренгельные балки с одной стойкой рациональны [17,18] на пролетах $l=12\div 18$ м. В практике проектирования и строительства часто встречаются пролёты, равные $l=(12\div 18)$ м [11-13]. На этих пролетах, как показывают наши исследования, рациональными являются шпренгельные балки с двумя стойками [1,16]. Однако в этом случае усложняется технология изготовления конструкции. Чтобы обеспечить простоту изготовления конструкции, мы предлагаем все элементы шпренгельных балок с двумя стойками выполнять из прокатных профилей постоянного сечения. Это существенно уменьшает технологические затраты на изготовление конструкции в целом.

Возникает вопрос: «Можно ли уменьшить собственный вес и стоимость металла путём оптимизации параметров шпренгельной балки с двумя стойками, как это удалось сделать в статьях [17,18] ?».

Постановка задачи. В данной статье приведен алгоритм определения оптимальных параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Показана эффективность предлагаемого решения.

Рассмотрим шпренгельную балку с двумя стойками (рис. 1).

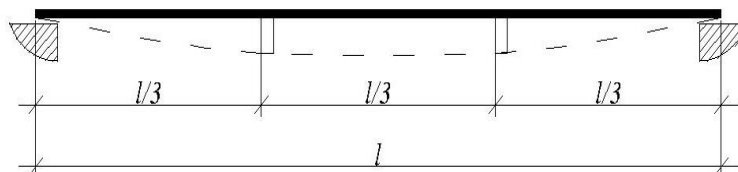


Рис.1. Конструктивная схема шпренгельной балки с двумя стойками

Fig. 1. Structural diagram of a truss girder with two posts

На рис. 1 пунктирными линиями показаны гибкие элементы, работающие только на растяжение (полосовая сталь, высокопрочная арматура, уголки и швеллеры малого калибра); обычными линиями обозначены жесткие элементы (стойки, работающие на центральное сжатие, и горизонтальный элемент, перекладина, работающий на поперечный изгиб со сжатием).

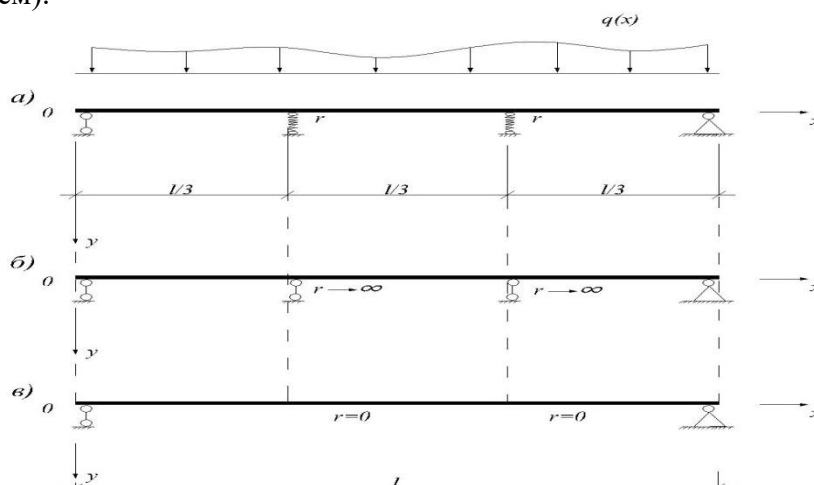


Рис. 2. Расчетные схемы шпренгельной балки с двумя стойками

Fig. 2. Design diagrams of truss girders with two posts

На рис. 2.а работу затяжек (рис. 1) моделирует упруго-податливые опоры с коэффициентом жесткости r ; на рис. 2.б показан случай, когда коэффициенты жесткости $r \rightarrow \infty$; на рисунке 2.в – другая крайность, $r = 0$, то есть шпренгельная балка (рис.1) вырождается в обычную балку, в балку без шпренгельных элементов [1,2].

Нагрузка $q(x)$, действующая на конструкцию (рис. 2.а), в общем случае меняется по пролету произвольно.

В практике проектирования и строительства нагрузку q часто принимают приближённо, равномерно распределенной [7,9,10] по прилёту, $q = \text{const}$.

Далее приведём эпюры изгибающих моментов и поперечных сил, соответствующие расчётным схемам, приведённым на рис. 2. При этом примем $q = \text{const}$.

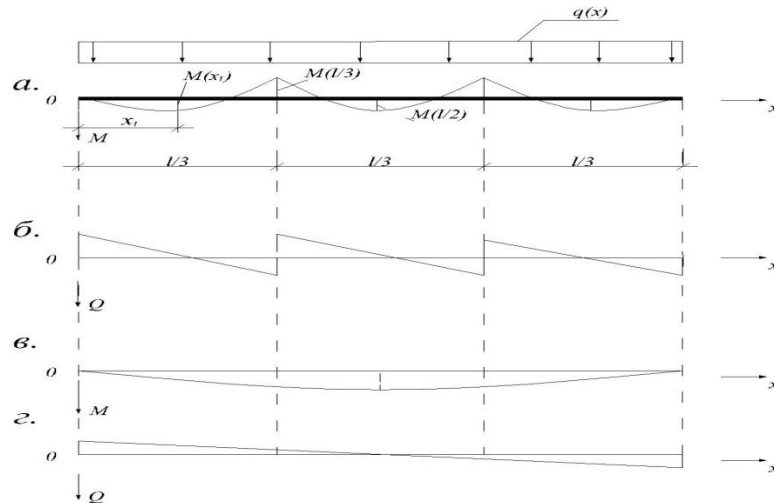


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов M и поперечных сил Q

Fig. 3. Diagrams of bending moments M and shear forces Q

На рис. 3.а и 3.б эпюры соответствуют расчётным схемам рис. 2.а и 2.б. Эпюры, показанные на рис. 3.в и 3.г, соответствуют расчётной схеме рис. 2.в по технологическим соображениям. Как уже указывалось выше, конструкция шпренгельной балки становится более эффективной, если перекладину (рис.1) проектировать постоянного сечения по пролету (в виде прокатного широкополочного двутавра или виде коробчатого сечения из двух швеллеров, или в виде гнуто-сварного профиля, ГСП).

При этом массу перекладины можно минимизировать, оптимизируя коэффициент жесткости r , который показан на рис. 2.а.

Далее, мы проведем теоретические исследования, позволяющие назначить коэффициент жесткости r из условий минимума массы перекладины, с постоянным сечением по пролету. Коэффициент жесткости упруго-податливых опор шпренгельной балки с двумя стойками зависит от конструктивных параметров.

Его можно определить по формуле:

$$r = \frac{E_3 \cdot A_3 \cdot h^2}{l_3^3} . \quad (1)$$

где: E_3 , A_3 – соответственно, модуль упругости затяжки и площадь ее поперечного сечения; по рис. 1 длина кривой затяжки

$$\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2} . \quad (2)$$

Методы исследования. Далее займемся исследованием работы перекладины шпренгельной балки. Опорные реакции упруго-податливых опор (рис 2.а) заменим

силами N_1 и N_2 и вместо расчетной схемы, приведенной на рис 2.а, рассмотрим схему, показанную ниже.

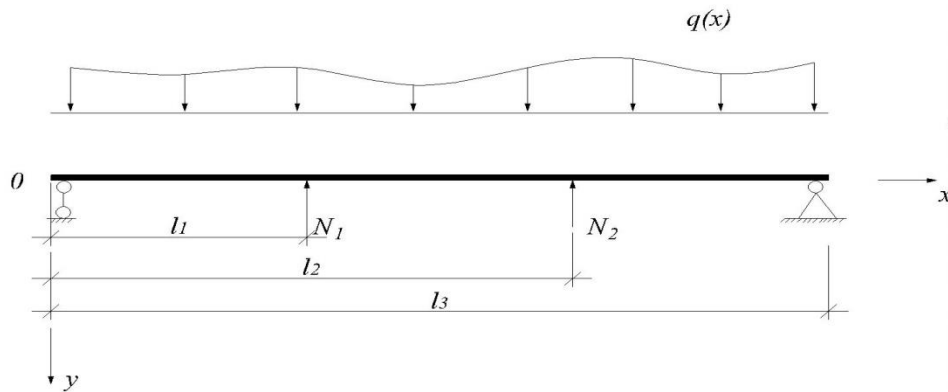


Рис. 4. Расчетная схема перекладины,

$$l_1 = \frac{l}{3}, \quad l_2 = \frac{2}{3}l, \quad l_3 = l$$

Fig. 4. Design diagram of the crossbar,

$$l_1 = l/3, \quad l_2 = 2/3 l, \quad l_3 = l$$

Дифференциальное уравнение поперечного изгиба балки (перекладины), рис. (4), имеет вид

$$EI \cdot y^{IV}(x) = q(x) - N_1 \cdot \delta(x - l_1) - N_2 \cdot \delta(x - l_2). \quad (3)$$

где:

EI – жесткость сечения балки при изгибе, величина постоянная по пролету;

$y = y(x)$ – функция прогибов балки;

$q(x)$ – заданная нагрузка, действующая на балку, в общем случае – произвольная;

$\delta(x - l_i)$ – дельта функция;

N_1, N_2 – силы отпора (рис. 4), пока неизвестные.

Решение уравнения (3) представим в интегральной форме [14]:

$$y(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot [q(\xi) - N_1 \delta(\xi - l_1) - N_2 \delta(\xi - l_2)] d\xi$$

или

$$y(x) = y_0(x) - N_1 \cdot G(x, l_1) - N_2 \cdot G(x, l_2), \quad (4)$$

где

$$y_0(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot q(\xi) \cdot d\xi, \quad (5)$$

$G = G(x, \xi)$ – функция Грина, которая выражается с помощью полиномов [14]:

$$G(x, \xi) = [1 - e(x - \xi)] \cdot G(x, \xi) + e(x - \xi) G(x, \xi). \quad (6)$$

Здесь введены обозначения:

единичная функция

$$e(x, \xi) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq \xi, \\ 0, & \text{при } x < \xi; \end{cases} \quad (7)$$

$$G_1(x, \xi) = -\frac{1}{EI} \cdot \left[\left(1 - \frac{\xi}{l}\right) \cdot \frac{x^3}{6} + A \cdot x \right], \quad (8)$$

$$G_2(x, \xi) = -\frac{1}{EI} \cdot \left[-\frac{\xi}{l} \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{\xi}{2} \cdot x^2 + B \cdot x + D \right], \quad (9)$$

$$A = \frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi \cdot l}{3} - \frac{\xi^3}{6l}, \quad D = \frac{\xi^3}{6}, \quad B = -\frac{\xi \cdot l}{3} - \frac{\xi^3}{6l}.$$

Вернемся к функции прогибов (4). С целью определения неизвестных сил N_1 и N_2 введём модель Винклера [15]:

$$N_1 = r \cdot y(l_1), \quad N_2 = r \cdot y(l_2), \quad (10)$$

где $y(l_1)$ и $y(l_2)$ – вертикальные перемещения (прогибы) балки при $x = l_1$ и $x = l_2$, (рис. 4),

r - коэффициент жесткости (1).

Из выражения (4) найдем

$$\begin{aligned} y(l_1) &= y_0(l_1) - N_1 G \cdot (l_1, l_1) - N_2 G \cdot (l_1, l_2) \\ y(l_2) &= y_0(l_2) - N_1 G \cdot (l_2, l_1) - N_2 G \cdot (l_2, l_2) \end{aligned} \quad (11)$$

Пользуясь формулой (5), определим

$$\begin{aligned} y(l_1) &= \int_0^{l_1} G(l_1, \xi) \cdot q(\xi) d\xi, \\ y(l_2) &= \int_0^{l_2} G(l_2, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя прогибы (11) в равенство (10), получаем систему 2-х алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} N_1 \left[G(l_1, l_1) + \frac{1}{r} \right] + N_2 G \cdot (l_1, l_2) &= y_0(l_1), \\ N_1 G \cdot (l_2, l_1) + N_2 \left[G(l_2, l_2) + \frac{1}{r} \right] &= y_0(l_2), \end{aligned} \quad (13)$$

Решив эту систему относительно неизвестных, получим

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{y_0(l_2) \cdot a_{12} - y_0(l_1) \cdot \left(a_{22} + \frac{1}{r}\right)}{a_{12} \cdot a_{21} - \left(a_{11} + \frac{1}{r}\right) \cdot \left(a_{22} + \frac{1}{r}\right)}, \\ N_2 &= \frac{y_0(l_1) \cdot a_{21} - y_0(l_2) \cdot \left(a_{11} + \frac{1}{r}\right)}{a_{12} \cdot a_{22} - \left(a_{11} + \frac{1}{r}\right) \cdot \left(a_{22} + \frac{1}{r}\right)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь введены обозначения:

$$a_{11} = G(l_1, l_1), \quad a_{12} = G(l_1, l_2), \quad (15)$$

$$a_{21} = G(l_2, l_1), \quad a_{22} = G(l_2, l_2).$$

Теперь функция прогибов (4) вполне определена. Изгибающие моменты и поперечные силы легко выражаются известными формулами:

$$M(x) = -EJ \cdot \frac{d^2 y(x)}{dx^2}, \quad Q(x) = -EJ \cdot \frac{d^3 y(x)}{dx^3}. \quad (16)$$

Подставляя функции (4) и (5) в равенство (16), имеем

$$M(x) = -EJ \cdot \left[y_0''(x) - N_1 \frac{\partial^2 G(x, l_1)}{\partial x^2} - N_2 \frac{\partial^2 G(x, l_2)}{\partial x^2} \right], \quad (17)$$

$$Q(x) = -EJ \cdot \left[y_0'''(x) - N_1 \frac{\partial^3 G(x, l_1)}{\partial x^3} - N_2 \frac{\partial^3 G(x, l_2)}{\partial x^3} \right], \quad (18)$$

где N_1 и N_2 даны формулами (14).

Выше мы привели выражение (18) для определения внутренних усилий M и Q в сечениях перекладины. Кроме этих усилий в перекладине возникает усилия и сжатия F . Далее мы излагаем методику определения усилий F .

Рассмотрим равновесие нижнего левого узла шпренгельной балки (рис.1), приведенного на рис. (5)

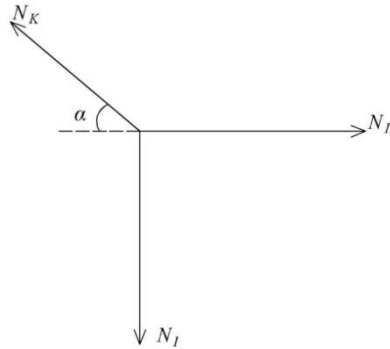


Рис. 5. Схема действия усилий
Fig. 5. Scheme of action of efforts

где N_r — усилие в горизонтальной затяжке

N_k — усилие в косой затяжке формулой

N_l — усилия в стойке, определяемые формулой (14).

Горизонтальная затяжка из-за различия в усилиях N_1 и N_2 (14) не вполне горизонтальна. Влияние этого фактора на усилия N_r, N_k мы можем учесть.

Однако здесь делать этого не будем в силу его незначительности. Поэтому горизонтальную затяжку будем считать приближенно - горизонтальной.

С учетом этого проектируя все силы на вертикаль (рис. 5), будем иметь:

$$N_l = N_k \cdot \sin \alpha.$$

Отсюда

$$N_k = \frac{N_l}{\sin \alpha}, \quad (19)$$

где

$$\sin \alpha = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}}.$$

Высота h показана на рис. 1,

N_l — определена формулой 14.

Теперь, проектируя все силы на горизонталь (рис. 5), запишем

$$N_r = N_k \cdot \cos \alpha.$$

С учетом формулы (19) последнее представим так:

$$N_r = N_l \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = N_l \cdot \cotg \alpha, \quad (20)$$

где $\cotg \alpha = \frac{l}{3h}$, (рис. 1.)

Далее рассмотрим равновесие левого опорного узла (рис. 1).

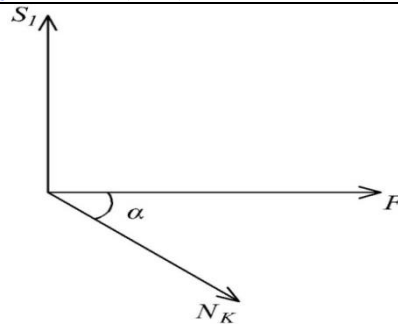


Рис. 6. Схема действия усилий
Fig. 6. Scheme of action of efforts

Проектируя силы на горизонталь (рис.6), будем иметь

$$F + N_k \cdot \cos a = 0$$

или

$$F = -N_k \cdot \cos a = -N_1 \cdot \cot g a, \quad (21).$$

где

$$\cos a = \frac{\frac{l}{3}}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}}.$$

Здесь знак минус указывает на то, что перекладина сжата силой F .

Сравнивая формулу (20) и (21), приходим к выводу:

Усилие N_r (рис.5) и усилие F (рис. 6) равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. Такой вывод очевиден.

Проектируя на вертикаль все силы (рис. 6), находим

$$S_1 = N_k \cdot \sin a, \quad (22)$$

где N_k дается формулой (19).

Поперечная сила Q_0 в опорном сечении перекладины равна

$$Q_0 = F_{on} - S_1,$$

где F_{on} – опорная реакция шпренгельной балки на левой опоре.

При $q = const$ $F_{on} = \frac{ql}{2}$.

В других случаях опорные реакции мы определяем из условия равновесия всей шпренгельной балки при произвольной $q(x)$ (по обычным правилам). Поперечную силу Q_0 можно определить и из формулы (18), приняв $x = 0$.

Таким образом, мы располагаем выражениями для определения внутренних усилий в элементах шпренгельной балки (рис. 1).

Эти выражения даны формулами (18) (в общем случае) или формулами (48) (в частном случае) и равенствами (19), (20), (21).

Далее рассмотрим пример вычисления внутренних усилий. В соответствии с рис. 2 и 4 примем

$$l_1 = \frac{l}{3}, \quad l_2 = \frac{2 \cdot l}{3}.$$

Нагрузку q (рис. 3) распределим по пролету равномерно, $q = const$.

Такая схема часто встречается в практике проектирования и изготовления шпренгельных балок с двумя стойками. В первую очередь упростим формулы (14). С этой целью определим функцию $y_0(x)$.

При $q = \text{const}$ из формулы (5) имеем

$$y_0(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi = q \cdot \int_0^l G(x, \xi) d\xi. \quad (23)$$

Подставляя функцию Грина (6) в интеграл (23), с учетом выражений (7),(8),(9), запишем

$$y_0(x) = q \cdot \int_0^x G_2(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi + q \cdot \int_0^l G_1(x, \xi) \cdot d\xi. \quad (24)$$

Теперь, внося подынтегральные выражения (24), функции (8 и 9), и выполняя интегрирование, находим

$$y_0(x) = -\frac{q}{EJ} \cdot \left(\frac{lx^3}{12} - \frac{x^4}{24} - \frac{l^3 x}{24} \right). \quad (25)$$

Отсюда:

$$J_0(l_1) = \frac{ql^4}{EJ} \cdot \frac{11}{12 \cdot 3^4};$$

$$J_0(l_2) = \frac{ql^4}{EJ} \cdot \frac{11}{12 \cdot 3^4}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что $J_0(l_1) = J_0(l_2)$.

Это говорит о правильности вычислений.

Далее необходимо определить величины (15). Как и ранее, принимаем

$$l_1 = \frac{l}{3}, \quad l_2 = \frac{2 \cdot l}{3}, \quad q = \text{const}.$$

Из выражений (6 - 9) найдем

$$G(l_1, l_2) = \frac{7}{6 \cdot 3^4} \cdot \frac{l^3}{EJ},$$

$$G(l_2, l_1) = \frac{7}{6 \cdot 3^4} \cdot \frac{l^3}{EJ}, \quad (27)$$

$$G(l_1, l_1) = \frac{4}{3 \cdot 3^4} \cdot \frac{l^3}{EJ},$$

$$G(l_2, l_2) = \frac{4}{3 \cdot 3^4} \cdot \frac{l^3}{EJ}.$$

Из равенства (27) следует, что

$$G(l_1, l_2) = G(l_2, l_1),$$

$$G(l_2, l_2) = G(l_1, l_1).$$

Такие соотношения – естественны, когда нагрузка $q = \text{const}$, а промежуточные упруго-податливые опоры (рис. 2.а) – симметричны относительно середины пролета шпренгельной балки.

При значениях (26 и 27) из дробей (14) следует, что $N_1 = N_2$.

Подставляя выражения (26 и 27) в первую дробь из (14) и выполняя некоторые преобразования, будем иметь:

$$N_1 = N_2 = \frac{-q \cdot l \cdot \frac{11}{12 \cdot 3^4} \cdot \left(k + \frac{1}{6 \cdot 3^4}\right)}{\left(\frac{7}{6 \cdot 3^4}\right)^2 - \left(k + \frac{1}{3 \cdot 3^4}\right)}, \quad (28)$$

где
$$k = \frac{EJ}{r \cdot l^3}, \quad (29)$$

r – коэффициент жесткости (1).

Далее рассмотрим два частных случая:

1. при $r = 0$, $k \rightarrow \infty$ из равенства (28) следует, что $N_1 = N_2 = 0$;
2. при $r \rightarrow \infty$, $k = 0$ из равенства (24) получим

$$N_1 = N_2 = \frac{ql}{30} \cdot 11. \quad (30)$$

В общем случае, когда коэффициенты r и k – произвольные и реакции упруго-податливых опор (при $l_1 = \frac{l}{3}$, $l_2 = \frac{2 \cdot l}{3}$, $q = const$), значения N_1 и N_2 определяются по формуле (28). Эту формулу с достаточно высокой точностью можно представить приближенно так:

$$N_1 = N_2 = \frac{-ql \cdot \left(\frac{1}{80} \cdot k + \frac{1}{80} \cdot \frac{1}{486}\right)}{-\left(k^2 + \frac{1}{30}k + \frac{1}{565}\right)}$$

или

$$N_1 = N_2 \approx \frac{\frac{1}{80}qlk}{k^2 + \frac{1}{30}k} \approx \frac{ql}{2,7 + 80k},$$

Далее примем

$$N_1 = N_2 = \frac{ql}{2,7 + 80k}. \quad (31)$$

При $k = 0$ из (31) имеем $N_1 = N_2 = \frac{ql}{2,7}$.

Эта величина совпадает со значением $N_1 = N_2$, которое дано формулой (30). При $k \rightarrow \infty$ ($r = 0$) из (31) следует, что $N_1 = N_2 = 0$.

Такой вывод вытекает и из формулы (28).

Далее вернёмся к равенствам (17) и (18). Пользуясь выражениями (6 - 9) и (25), найдем производные функций, входящих в равенства (17) и (18). Пропуская промежуточные операции, приводим окончательные выражения:

$$\begin{cases} y_0''(x) = -\frac{q}{EJ} \left(\frac{lx}{2} - \frac{x^2}{2} \right), \\ y_0'''(x) = -\frac{q}{EJ} \left(\frac{l}{2} - x \right). \end{cases} \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 G(x, \varepsilon)}{\partial x^2} = [1 - e(x - \xi)] \cdot \frac{\partial^2 G_1}{\partial x^2} + e(x - \xi) \cdot \frac{\partial^2 G_2}{\partial x^2}, \quad (33)$$

$$\frac{\partial^3 G(x, \varepsilon)}{\partial x^3} = [1 - e(x - \xi)] \cdot \frac{\partial^3 G_1}{\partial x^3} + e(x - \xi) \cdot \frac{\partial^3 G_2}{\partial x^3}.$$

Здесь:

$$\frac{\partial^2 G_1}{\partial x^2} = -\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{\xi}{l} \right) \cdot x, \quad \frac{\partial^2 G_2}{\partial x^2} = -\frac{1}{EJ} \left(-\frac{\xi}{l} x + \xi \right), \quad \frac{\partial^3 G_1}{\partial x^3} = -\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{\xi}{l} \right), \quad \frac{\partial^3 G_2}{\partial x^3} = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{\xi}{l}. \quad (34)$$

При $\xi = l_1$ и $\xi = l_2$ из формул (23) и (34) имеем:

$$\frac{\partial^2 G(x, l_1)}{\partial x^2} = [1 - e(x - l_1)] \cdot \left[-\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) x \right] + e(x - l_1) \left[-\frac{1}{EJ} \left(-\frac{l_1}{l} x + l_1 \right) \right], \quad (35)$$

$$\frac{\partial^2 G(x, l_2)}{\partial x^2} = [1 - e(x - l_2)] \left[-\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_2}{l} \right) x \right] + e(x - l_2) \left[-\frac{1}{EJ} \left(-\frac{l_2}{l} x + l_2 \right) \right].$$

$$\frac{\partial^3 G(x, l_1)}{\partial x^3} = [1 - e(x - l_1)] \left[-\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) \right] + e(x - l_1) \left(\frac{1}{EJ} \cdot \frac{l_1}{l} \right),$$

$$\frac{\partial^3 G(x, l_2)}{\partial x^3} = [1 - e(x - l_2)] \left[-\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_2}{l} \right) \right] + e(x - l_2) \left(\frac{1}{EJ} \cdot \frac{l_2}{l} \right). \quad (36)$$

Теперь внутренние усилия в сечениях перекладины шпренгельной балки (рис. 3) вполне определены формулами (17) и (18), (35) и (36).

Далее мы переходим к определению оптимального значения коэффициента k (29).

С этой целью найдём координату $x = x_1$ (рис.3.а), при которой изгибающий момент на первом пролёте имеет максимальное значение. Эту координату ($x = x_1$) можно вычислить из условия

$$\frac{dM(x)}{dx} = 0. \quad (37)$$

Производная функции моментов даётся выражением (18). Подставляя функции (32) и (36) в равенство (18), а полученное – в условие (37), с учётом свойств функции (7), запишем уравнение

$$q \cdot \left(\frac{l}{2} - x \right) - N_1 \cdot \left(\frac{l_1}{l} + \frac{l_2}{l} \right) = 0$$

или с учётом равенства (31)

$$\frac{l}{2} - x - \frac{l}{2,7+80 \cdot K} = 0. \quad (38)$$

Отсюда

$$x = x_1 = \frac{l}{2} - \frac{l}{2,7+80 \cdot K}.$$

Введём обозначение

$$Z = \frac{1}{2,7+80 \cdot K} \quad (39)$$

Тогда $x = x_1 = l \left(\frac{1}{2} - Z \right).$

(40)

При $k = 0$ ($r \rightarrow \infty$)

$$x_1 = \frac{l}{2} - \frac{l}{2,7} = l \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2,7} \right) = \frac{l}{7,7}.$$

При значении $x = x_1$ (формула 40) изгибающие моменты на первом пролёте шпренгельной балки (рис.3.а) имеют максимальное значение. Вычислим $M(x_1)$. Подставляя (25), (34) и (35) в равенство (17), находим при $x < l_1$:

$$M(x) = q \cdot \left(\frac{lx}{2} - \frac{x^2}{2} \right) - N_1 \cdot \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) x - N_2 \cdot \left(1 - \frac{l_2}{l} \right) x.$$

Это выражение упростим с учётом формулы (31) и обозначения (39):

$$M(x) = q \cdot \left(\frac{lx}{2} - \frac{x^2}{2} \right) - qlzx. \quad (41)$$

Максимальное значение этого момента найдём по формуле (40), приняв $x = x_1$.

С учётом выражения (40) из равенства (41) определим

$$M(x_1) = \frac{ql^2}{2} \cdot \left(z^2 - z + \frac{1}{4} \right). \quad (42)$$

Из рис. 3.а следует, что наибольшее значение изгибающего момента возникает в сечении перекладины над упруго-податливыми опорами. Вычислим $M\left(\frac{l}{3}\right)$ (рис.3.а). Воспользуемся, как и ранее, выражением (17). Из равенства (32) найдём:

$$y_0''\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{9 \cdot EJ}. \quad (43)$$

Из выражения (35) при $x = l_1$, $l_1 < l_2$ вычислим:

$$\left. \frac{\partial^2 G(x, l_1)}{\partial x^2} \right|_{x=l_1} = -\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_1}{l} \right) l_1, \quad (44)$$

$$\left. \frac{\partial^2 G(x, l_2)}{\partial x^2} \right|_{x=l_1} = -\frac{1}{EJ} \left(1 - \frac{l_2}{l} \right) l_1. \quad (45)$$

Из (44) и (45) при $l_1 = \frac{l}{3}$, $l_2 = \frac{2}{3}l$, найдём:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial^2 G(x, l_1)}{\partial x^2} \right|_{x=l_1} = -\frac{2l}{9 \cdot EJ}, \\ \left. \frac{\partial^2 G(x, l_2)}{\partial x^2} \right|_{x=l_2} = -\frac{l}{9 \cdot EJ}. \end{cases} \quad (46)$$

Теперь, подставляя выражения (43) и (46) в равенство (17), находим:

$$M\left(\frac{l}{3}\right) = -EJ \left(-\frac{ql^2}{9 \cdot EJ} + N_1 \frac{2l}{9 \cdot EJ} + N_2 \frac{l}{9 \cdot EJ} \right).$$

Это равенство с учётом формулы (31) и обозначения (39). Запишем так:

$$M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{9} \cdot (3z - 1). \quad (47)$$

При $r \rightarrow \infty$, $k = 0$ по формуле (39) найдем, что $z = \frac{1}{2,72}$, точное значение $z = \frac{11}{30}$.

Для этого случая формула (47) даёт

$$M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{9} \cdot \left(\frac{3 \cdot 11}{30} - 1 \right) = -\frac{ql^2}{90}.$$

Мы получили известное решение. Это говорит о правильности выбора алгоритма исследования.

В середине второго пролёта (рис. 3.а) изгибающие моменты меньше значения $M(x_1)$ – формула (42). Поэтому расчётными моментами служат $M(x_1)$ и $M\left(\frac{l}{3}\right)$ – формулы (42) и (47). Выпишем эти формулы:

$$\begin{cases} M(x_1) = \frac{ql^2}{2} \cdot \left(z^2 - z + \frac{1}{4}\right), \\ M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{9} \cdot (3z - 1). \end{cases} \quad (48)$$

Здесь параметр z определяется равенством (39), а коэффициент k – обозначением (29).

Таким образом, мы имеем два расчётных сечения: первое – на первом пролёте, в сечении $x = x_1$; второе – над упруго-податливой опорой (рис. 3.а). Соответствующие значения расчётных моментов даны формулами (48).

Далее необходимо говорить о конструировании. Поскольку расчётные изгибающие моменты (48) различны по своей величине, мы имеем два подхода к конструированию перекладины шпренгельной балки (рис. 1).

С целью уменьшения собственного веса конструкции (экономии металла) перекладину можно проектировать переменного сечения: на участках с большими изгибающими моментами сечение можно взять с большой высотой и, наоборот, – с меньшей высотой, где моменты незначительны. Такой подход позволяет уменьшить вес конструкции, сэкономить металл и снизить стоимость затрачиваемого металла. Однако при этом усложняется технология изготовления конструкции и возрастает стоимость технологических затрат. Всё это существенно снижает эффективность шпренгельных балок. Поэтому мы предлагаем здесь другой подход к конструированию.

С целью уменьшения технологических затрат и упрощения изготовления конструкции перекладины рационально назначать её сечение постоянным по всему пролёту шпренгельной балки (в виде прокатного широкополочного двутавра, или в виде коробчатого сечения из 2- прокатных швеллеров на сварных швах, или в виде гнуто-сварного профиля, ГСП).

При этом с целью экономии металла, снижения собственного веса конструкции, параметр z , входящий в формулы (48), можно оптимизировать: меняя его значения, добиться равенства (по абсолютной величине) расчётных изгибающих моментов (48).

Другими словами, варьируя значением параметра z , можно перераспределить изгибающие моменты: разгрузить перегруженные участки и догрузить недогруженные. Это позволит уменьшить расчётный изгибающий момент, то есть позволит уменьшить сечение перекладины, снизить затраты металла. Далее мы займёмся этим вопросом подробно.

Условие минимума расхода металла на перекладину, при постоянном её сечении по всему пролёту шпренгельной балки, запишем в виде:

$$M(x_1) = \left| M\left(\frac{l}{3}\right) \right|. \quad (49)$$

Подставляя в условие (49) изгибающие моменты (48), получаем уравнение:

$$\frac{ql^2}{2} \cdot \left(z^2 - z + \frac{1}{4}\right) = \frac{ql^2}{9} \cdot (3z - 1).$$

Упростив это уравнение, будем иметь:

$$z^2 - \frac{5}{3}z + \frac{17}{4 \cdot 9} = 0. \quad (50)$$

Корни этого уравнения:

$$z_1 = \frac{5 + \sqrt{8}}{6}, \quad z_2 = \frac{5 - \sqrt{8}}{6}. \quad (51)$$

Далее из равенства (39) определим:

$$k = \frac{1 - 2,7 \cdot z}{80 \cdot z}. \quad (52)$$

При $z = z_1 = \frac{5 + \sqrt{8}}{6}$ (формула (51)) – коэффициент k (52) получается отрицательным.

Поскольку этот коэффициент по своему смыслу (29) – величина сугубо положительная, то корень $z = z_1$ мы отбрасываем и принимаем корень

$$z = z_2 = \frac{5 - \sqrt{8}}{6} \approx 0,3625.$$

Обсуждение результатов. Из равенства (52) находим

$$k = \frac{1 - 2,7 \cdot 0,362}{80 \cdot 0,362} \approx 0,7 \cdot 10^{-3}. \quad (53)$$

С учётом (53) равенство (29) запишем так:

$$\frac{EJ}{r \cdot l^3} = k = 0,69 \cdot 10^{-3} \quad (54)$$

или

$$r = \frac{EJ}{l^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}.$$

Подставляя последнее выражение в формулу (1), получаем

$$\frac{E_3 \cdot A_3 \cdot h^2}{l_3^3} = \frac{EJ}{l^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}, \quad (55)$$

где l_3 – даётся формулой (2).

Если пролёт l шпренгельной балки (рис.1) диктуется условиями эксплуатации (назначением конструкции), то в распоряжении проектировщика остаются параметры A_3, h .

Варьируя этими параметрами, можно обеспечить выполнение условия (55), то есть можно обеспечить экономию металла, уменьшить собственный вес конструкции в целом и стоимость затрачиваемого металла, при сохранении постоянства сечения перекладины по всему пролёту балки.

Для наглядности рассмотрим изменения расчётных изгибающих моментов (48) в зависимости от параметра z . При $z = \frac{11}{30}$ коэффициент k , определяемый формулой (52), равен нулю, то есть при $z = \frac{11}{30} = \frac{1}{2,72}$ коэффициент $k=0$, а коэффициент жесткости (25) упруго-податливой опоры $r \rightarrow \infty$.

Это – случай расчетной схемы по упрощённой модели (рис. 2.б). Вычислим по формулам (48) соответствующие этой схеме изгибающие моменты, приняв $z = \frac{11}{30} = \frac{1}{2,72} = 0,36666$.

$$\begin{cases} M(x_1) = \frac{ql^2}{8} \cdot \frac{64}{900} = \frac{ql^2}{112,5} \\ M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{9} \cdot \frac{1}{10} = -\frac{ql^2}{90} \end{cases}$$

Из этих значений видно, что перекладина перегружена над упруго-податливой опорой (рис. 3.а) и недогружена в сечении $x = x_1$.

Теперь уменьшим коэффициент z , приняв его, равным оптимальному значению $z = z_2 = 0,362$.

При $z=0,362$ из выражений (48) найдём:

$$\begin{cases} M(x_1) = \frac{ql^2}{105,26} \\ M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{104,64} \end{cases} \quad (56)$$

Вывод. При $z = 0,362$ изгибающие моменты $M(x_1)$ и $M\left(\frac{l}{3}\right)$ по абсолютной величине выравнились: на перегруженном участке (над упруго-податливой опорой, рис. 3.а) момент с величины $M\left(\frac{l}{3}\right) = -\frac{ql^2}{90}$ уменьшился (по абсолютной величине) до $-\frac{ql^2}{104,64}$.

И, наоборот, на недогруженном участке, при $x = x_1$ (рис. 3.а), изгибающий момент увеличился с $\frac{ql^2}{112,5}$ до $\frac{ql^2}{105,26}$.

Отсюда следует вывод: при $z = 0,362$ и $q = const$ расчётный изгибающий момент уменьшается на 14%.

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016; 42(3): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-119-131.
2. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
3. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников. Расчет стальных конструкций. М-75г. С.30-41.
4. Ливановский Н.Н., Богатырева И.В. Усиление железобетонных балок шпренгельными затяжками и вложенными шпренгелями. XII международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 21-24 апреля 2015 г. С.1338-1340.
5. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. V Международная научно-практической конференции "Научные исследования: от теории к практике". Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
6. Металлические конструкции. под ред. Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
7. Металлические конструкции. под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
8. Пат. 130333 РФ. МПК E04G 23/02. Шпренгель для усиления и обеспечения живучести изгибаемого железобетонного элемента / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Богатырева. Заявлено 08.02.2013; Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 5 с.
9. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1980. С.195-196.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартиформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
12. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
13. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2010.

14. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
15. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
16. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019
17. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(4): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-119-131.
18. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Эффективность шпренгельных балок с оптимальными параметрами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1):141-153. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-153

References:

1. Akayev N.K., Yusupov A.K. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2016; 42(3): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-119-131. (In Russ)]
2. Azhermachev S.G. Approximate method for calculating truss crane beams. [Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost]. *Construction and man-made safety.* 2011; 37: 34-39. (In Russ)]
3. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov Calculation of steel structures M.:75; 30-41. (In Russ)
4. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Reinforcement of reinforced concrete beams with truss ties and embedded trusses. XII International Conference of Students and Young Scientists "Prospects for the Development of Fundamental Sciences" Russia, Tomsk, April 21-24, 2015;1338-1340. (In Russ)
5. Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and research of new cut truss beams. V International scientific-practical conference "Scientific research: from theory to practice". Technical science. G. Cheboksary. 2015; 2:62-70. (In Russ)
6. Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986; 382-384. (In Russ)
7. Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011; 439-442. (In Russ)
8. Pat. 130333 RF. MPK E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonnoy elementa / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyreva. Zayavleno 08.02.2013; Opubl. 20.07.2013, Byul. № 20. 5 s. [Pat. 130333 RF. IPC E04G 23/02. Sprengel for strengthening and ensuring the survivability of a bent reinforced concrete element / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyrev. Stated 02/08/2013; Publ. 20.07.2013; 20: 5 p. (In Russ)]
9. Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M.: Stroyizdat, 1980;195-196. (In Russ)
10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
11. Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016; 120. (In Russ)]
12. F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, [Atlas stal'nykh konstruksiy».] *Atlas of Steel Structures.* 1977; 37-84 (In Russ)]
13. Yusupov A.K. Metal structures in questions, answers and design." Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2010. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN» [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 1. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
15. Yusupov A.K. Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008; 4. (In Russ)]
16. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalalov SH.G. Vestnik Mashinostroyeniya, [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", 2019; 12: 112 (In Russ)]
17. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O. Optimizatsiya parametrov shprengel'noy balki. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of truss beam parameters. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2020; 47(4): 119-131. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-4-119-131. (In Russ)]
18. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O. Efficiency of strut-framed beams with optimal parameters. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2021; 48(1):141-153. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-153. (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян 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».

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Khairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Tagir O. Ustarkhanov, Assistant, Department of Building Materials and Engineering Networks.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 02.09.2021.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 16.09.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 17.09.2021.

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
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «Библиографический список». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

**Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей,
поступивших в редакцию журнала**

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;
- electronic copy (e-mail is acceptable);
- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);
- Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 ImamaShamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

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 48– №3 – 2021.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 48, No.3 2021.

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 01.10.2021г. Сдано в печать 30.10.2021г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 17,00 Уч. изд.л. 17,00

Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.