

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 49, № 1, 2022.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 49, No.1, 2022.

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.

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», 2022.

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.

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, 2022.

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 49, № 1, 2022

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.

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

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

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. AuthorID (Scopus): 6507491881 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. <https://orcid.org/0000-0001-8421-0248>

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.

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

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

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. orcid.org/0000-0001-7363-1071

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

Группы научных специальностей

2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники (технические науки)

05.04.13. Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

05.13.12. Системы автоматизации проектирования (по отраслям) (технические науки)

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки)

Вестник Дагестанского государственного технического университета.

Технические науки.

Том 49, № 1

Махачкала, 2022. – 176с.

Издается по решению

Ученого Совета ФГБОУ ВО

«Дагестанский

государственный

технический

университет»

Адрес учредителя и издателя

367026, РД, г. Махачкала,

пр. И.Шамяля, 70,

ФГБОУ ВО «Дагестанский госу-

дарственный технический уни-

верситет».

Тел./факс (8722)623715;

(8722)623964

e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника.....	6
О.В. Евдулов, А.М. Хайбулаев. Экспериментальные исследования системы охлаждения электронных плат	6
И.Е. Лобанов. Моделирование теплообмена и гидравлического сопротивления в коротких и длинных прямых круглых трубах с полукруглыми турбулизаторами в зависимости от геометрических и режимных параметров	14
Информационные технологии и телекоммуникации	25
Т.В. Бощенко, С.Ю. Лебедев, А.Н. Королевских. Применение численного моделирования для модернизации выхлопной системы газотурбинных двигателей	25
Е.А. Данилова, Г.В. Таньков, Н.К. Юрков. Некоторые особенности разработки и построения конечно-разностных моделей стержневых конструкций радиоэлектронных средств	33
А.Л. Золкин, В.С. Тормозов. Принципы построения и внедрения интегрированной системы электронного документооборота	41
С.А. Ибрагимов. Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами кривых в программном комплексе электродинамического моделирования.	49
И.А. Магомедов, М.М. Мирзабеков, Т.Г. Айгунов. Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами	59
Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн	79
Строительство и архитектура	87
Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, М.И. Кадомцев, Е.В. Труфанова, Н.А. Савельева. Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания	87
А.Л. Большеротов. Основные категории экологической оценки территории строительства	95
И.Ю. Глинянова. Экологический мониторинг металлических примесей в мелкодисперсной пыли (PM _{2.5}) населенных пунктов	104
А.В. Журтов, Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, А.А. Карданов, М.А. Шогенцуков. Напряженно-деформированное состояние двухслойных армоцементных оболочек в условиях пожара	112
А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом	122
А.А.Крутилин, Т.В. Крапчетова, Н.А. Инькова, О.К.Пахомова. Зависимость расхода энергии в пересчете на 1м ³ бетона при использовании цементов различной удельной поверхности	133
М.Р. Нахаев. Межфазные явления при увлажнении электростатического фибробетона	140
М.Ш. Саламанова. Исследование свойств цемента для тампонирования нефтяных скважин	149
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, <u>Т.О. Устарханов</u> . Исследование эффективности шпренгельных балок с двумя стойками	156
Требования к оформлению статей	173

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 9 , N o . 1 , 2 0 2 2 .	
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. Krugljakow, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche 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; Gadzhimiet 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. Shakhtarin, 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.Khadzhishalapov, 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 Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexey N. Davidyuk, 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. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 05.04.13.Hydraulic machines and hydropneumatic units (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 05.13.12.Design automation systems (By Branches)(Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security(Technical Sciences), 2.1.3.Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9.Construction mechanics (Technical Sciences), 2.1.10 Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences) Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science.Vol. 49, No.1 Makhachkala, 2022–176p. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964

CONTENTS

Energy and Electrical engineering	6
O.V. Evdulov, A.M. Khaibulaev. Experimental studies of the electronic board cooling system	6
I.E. Lobanov. Modeling of heat transfer and hydraulic resistance in short and long straight round pipes with semicircular turbulators depending on geometric and operating parameters	14
Information technology and telecommunications	25
T.V. Boshchenko, S.YU. Lebedev, A.N. Korolevskikh. Application of numerical simulation for the modernization of the exhaust system of gas turbine engines	25
E.A. Danilova, G.V. Tankov, N.K. Yurkov. Some features of the development and construction of finite-difference models of rod structures of radio-electronic means	33
A.L. Zolkin, V.S. Tormozov. Principles for the construction and implementation of an integrated electronic document management system	41
S.A. Ibragimov. Investigation of the dependences of the Vivaldi antenna with two curve radii in the electrodynamic modeling software package	49
I.A. Magomedov, M.M. Mirzabekov, T.G. Aygumov. Problems of constructing logical-linguistic models of complex management dynamic objects	59
Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov. Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of seismic wave velocities	79
Building and architecture	87
E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, M.I. Kadomtsev, E.V. Trufanova, N.A. Savelyeva. Digital modeling of progressive collapse for high-rise building	87
A.L. Bolsherotov. Basic environmental assessment of the construction area	95
I.Yu. Glinyanova. Environmental monitoring of metallic impurities in fine dust (PM _{2.5}) of settlements	104
A.V. Zhurtov, T.A. Khezhev, G.N. Khadzhishalapov, A.A. Kardanov, M.A. Shogentsukov. Stress-strain state of two-layer reinforced cement shells under fire conditions	112
A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method	122
A.A. Krutilin, T.V. Krapchetova, N.A. Inkova, O. K. Pakhomova. Dependence of energy consumption in terms of 1 m ³ of concrete when using cements of different specific surface	133
M.R. Nakhaev. Interphase phenomena during humidification electrostatic fiber concrete	140
M.Sh. Salamanova. Study of cement properties for plugging oil wells	149
A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, <u>T.O. Ustarhanov</u> . Study of the effectiveness of trussed beams with two posts.....	156
Formatting requirements for papers	173

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-6-13

Оригинальная статья /Original Paper

Экспериментальные исследования системы охлаждения электронных плат

О.В. Евдулов, А.М. Хайбулаев

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

Резюме. Цель. Целью исследования является освещение полученных данных экспериментальных исследований, методики проведения измерений, а также конструкции лабораторного стенда для проведения натурных испытаний термоэлектрической системы (ТЭС) для неравномерного охлаждения электронных плат. **Метод.** Описан экспериментальный стенд и методика проведения измерений лабораторного образца термоэлектрической системы для охлаждения элементов электронных плат. Экспериментальный стенд выполнен на основе измерительного оборудования лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». **Результат.** Получены графики зависимости изменения во времени температуры контрольных точек термоэлектрической системы при различных токах питания термоэлектрической батареи (ТЭБ). Определены температурные зависимости тепловыделяющих элементов имитатора электронной платы при их неравномерном охлаждении от параметров ТЭБ и рабочего вещества, а также изменение во времени температуры оболочки емкости с рабочим агентом. **Вывод.** В результате натурных испытаний прибора установлено, что применение охлаждающей системы уменьшает температуру тепловыделяющих элементов до приемлемых значений, в частности, при суммарной мощности тепловыделений электронной платы 120 Вт температура источников теплоты снижается до 345 К и 344 К (от 428 К и 396 К). При этом также уменьшается температурный фон, создаваемый тепловыделяющими элементами в близлежащих к ним областях имитатора электронной платы. Оценено расхождение между предварительными и экспериментальными результатами расчетов, которое составило 8 %.

Ключевые слова: элемент радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), электронная плата, термоэлектрическая система, термоэлектрическая батарея, экспериментальный стенд, методика измерений, температура, натурные испытания

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Хайбулаев. Экспериментальные исследования системы охлаждения электронных плат. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(1):6-13. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-6-13

Experimental studies of the electronic board cooling system

O.V. Evdulov, A.M. Khaibulaev

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to illuminate the obtained experimental research data, measurement technique, as well as the design of a laboratory bench for full-scale tests of thermoelectric system (TES) for uneven cooling of electronic boards. **Method.** The article describes the experimental set-up and measurement procedure of laboratory thermoelectric system for electronic circuit boards cooling. The experimental stand is made on the basis of the measuring equipment of the laboratory of semiconductor thermoelectric devices and devices of Daghestan State Technical University. **Result.** We obtained plots of time dependences of temperature changes in thermoelectric system

checkpoints at different thermoelectric battery (TEB) supply currents. Determined were the temperature dependences of the thermoelectric elements of the electronic board simulator at their non-uniform cooling on the parameters of FEB and working substance as well as the time variation of the temperature of the shell of the vessel with the working agent. **Conclusion.** As a result of full-scale tests of the device it was found that the use of a cooling system reduces the temperature of heat-generating elements to acceptable values. In particular, the temperature of heat sources decreases to 345 K and 344 K (from 428 K and 396 K) if the total heat-generating power of the electronic board is 120 W. At the same time, the temperature background created by the heat-generating elements in the nearby areas of the electronic board simulator also decreases. The discrepancy between the results of calculations carried out beforehand and the experiment was estimated to be 8%.

Keywords: radio-electronic equipment (REA) element, electronic board, thermoelectric system, thermoelectric battery, experimental bench, measurement technique, temperature, full-scale tests

For citation: O.V. Evdulov, A.M. Khaibulaev. Experimental studies of the electronic board cooling system. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (1): 6-13. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-1-6-13

Введение. Широкое применение электронных плат в различных радиоэлектронных устройствах дает существенный выигрыш в надежности, габаритах, весе, сроке службы подобной аппаратуры [1-4]. Все это раскрывает большие перспективы дальнейшего улучшения их качественных показателей. Существенным недостатком элементов электронных плат является ограничение их мощности без принятия специальных технических мер. Данное обстоятельство связано с наличием температурного диапазона, при котором обеспечивается оптимальная и стабильная работа радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [5]. Превышение верхнего значения температуры в этом случае ведет к существенному снижению показателей работы элементов РЭА и повышает вероятность выхода их из строя.

В настоящее время для увеличения мощности электронных плат используются различного рода системы охлаждения. К ним относятся технические средства, реализующие воздушный, жидкостной, испарительный и кондуктивный метод отвода теплоты [6-11]. Каждое из них обладает определенными преимуществами и недостатками. Так, системы воздушного охлаждения просты в эксплуатации и имеют высокую надежность, но дают возможность снижения температуры элементов РЭА только до температуры окружающей среды [12]. Устройства, реализующие жидкостной и испарительный метод отвода теплоты обладают высокой эффективностью, но имеют сложную конструкцию и технологию изготовления [13]. Технические средства, использующие кондуктивную теплопередачу обладают недостаточной эффективностью, но имеют небольшие габаритные размеры и высокий ресурс работы [14]. В данных условиях имеет большое практическое значение и актуальность разработка новых систем и устройств отвода теплоты от электронных плат, характеризующихся улучшенными характеристиками.

Постановка задачи. Целью исследования является освещение полученных данных экспериментальных исследований, методики проведения измерений, а также конструкции лабораторного стенда для проведения натурных испытаний термоэлектрической системы (ТЭС) для неравномерного охлаждения электронных плат.

Методы исследования. Для обеспечения нормальных температурных условий работы элементов электронных плат и их равномерного охлаждения, при котором все тепловыделяющие элементы охлаждаются с одинаковой интенсивностью, является не целесообразным. Более рационально осуществлять неравномерный отвод теплоты [15]. В этом случае радиоэлементы с большей величиной мощности рассеяния будут охлаждаться с большей интенсивностью, а элементы с меньшим уровнем тепловыделений - с меньшей.

Разработана конструкция охлаждающей системы [16], изображенная на рис.1, в которой совместно использованы термоэлектрические батареи (ТЭБ) и плавящиеся рабочие вещества.

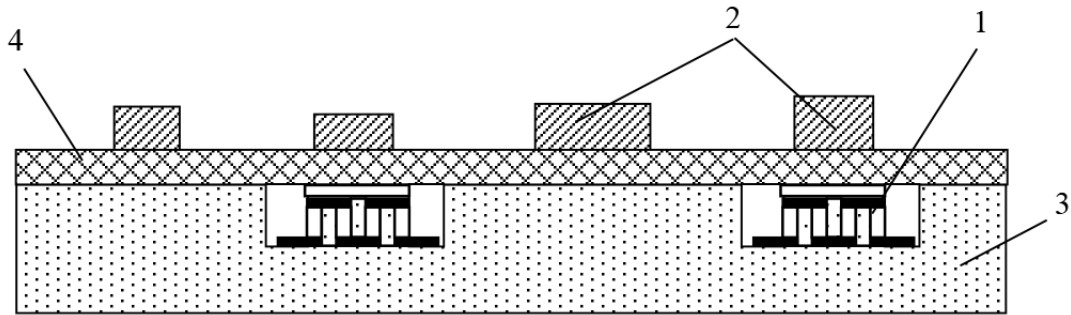


Рис.1. Структурная схема термоэлектрической системы для охлаждения электронных плат
Fig.1. Structural diagram of a thermoelectric system for cooling electronic circuit boards

В данной схеме охлаждения применяются однокаскадные ТЭБ 1, размещаемые в местах установки элементов РЭА 2, наиболее критичных к температурному режиму функционирования или требующих существенного снижения температуры. ТЭБ устанавливаются в углублениях на поверхности металлической емкости 3, заполненной рабочим веществом, имеющим большое значение теплоты плавления и температуру плавления в диапазоне 35-65°C [17], контактирующей с остальной частью электронной платы 4. Конструкция имеет упрощенную технологию изготовления, предусматривает возможность согласования режимов работы отдельных ТЭБ и энергосбережения.

Проведены экспериментальные исследования описанной ТЭС на соответствующем стенде, изображенном на рис.2. Исследования прибора проводились в теплоизолированной климатической камере 1, заданная температура и относительная влажность в которой регулируется блоком управления 2, связанным с датчиком температуры и влажности 3, показания которого регистрируются цифровым табло 4.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец системы охлаждения, представляющий емкость 5, заполненную рабочим веществом – парафином. Верхняя поверхность емкости выполнена профилированной с образованием двух пазов, в которых размещены ТЭБ 6 типа DRIFT-08 (производитель ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [18]. Место расположения пазов соответствует размещению на имитаторе электронной платы 7 тепловыделяющих элементов 8, в качестве которых применялись плоские нихромовые электронагреватели.

Топология размещения на имитаторе электронной платы тепловыделяющих элементов показана на рис.3 (размеры даны в миллиметрах). Имитатор соответствует проектируемой электронной плате высокочастотного усилителя мощности ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Пleshакова». Для определения основных параметров исследуемого опытного образца при испытаниях замерялись следующие величины: напряжение и ток на ТЭМ; температуры на их спаях; напряжение и ток на нагревателях, температуры в контрольных точках имитатора электронной платы, включая нагреватели, оболочки емкости с рабочим веществом [19].

Температуры на горячей и холодной сторонах ТЭБ, а также в контрольных точках имитатора электронной платы измерялись медь-константановыми термопарами 9, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 10. Выходные сигналы с термопар через многоканальный переключатель 11 поступали на измерительный комплекс ИРТМ 12, к выходу которого подключалась персональная ЭВМ 13, регистрирующая показания измеряемых температур через заданный промежуток времени.

Питание ТЭМ осуществлялось регулируемым источником постоянного тока 14. Ток, проходящий через ТЭМ, и напряжение на нем контролировались встроенными в блок питания приборами. Для питания имитаторов тепловой нагрузки (электронагревателей) использовался аналогичный источник постоянного тока 15. Основной задачей, стоящей при проведении экспериментальных исследований, являлось определение температурных зависимостей тепловы-

деляющих элементов имитатора электронной платы при их неравномерном охлаждении от параметров ТЭБ и рабочего вещества, а также изменение во времени температуры оболочки емкости с рабочим агентом.

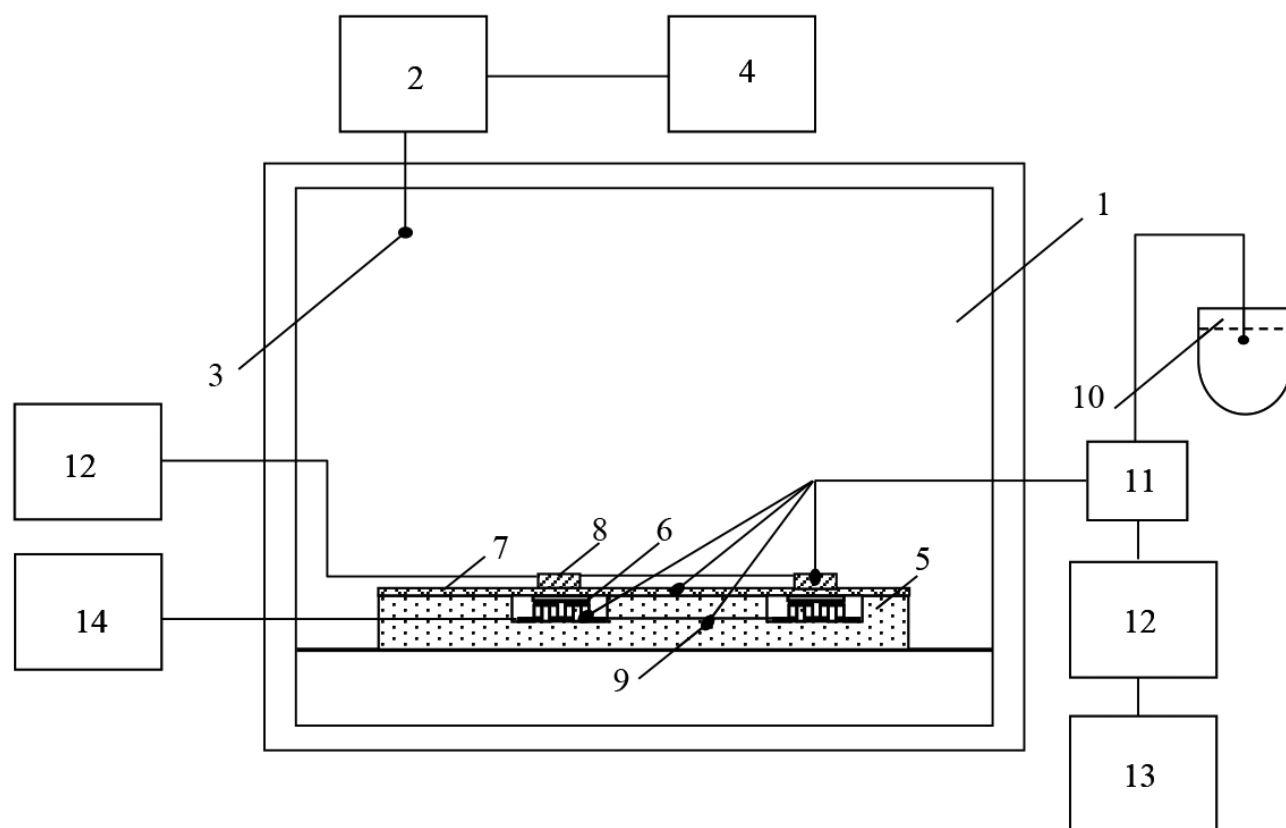


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental stand

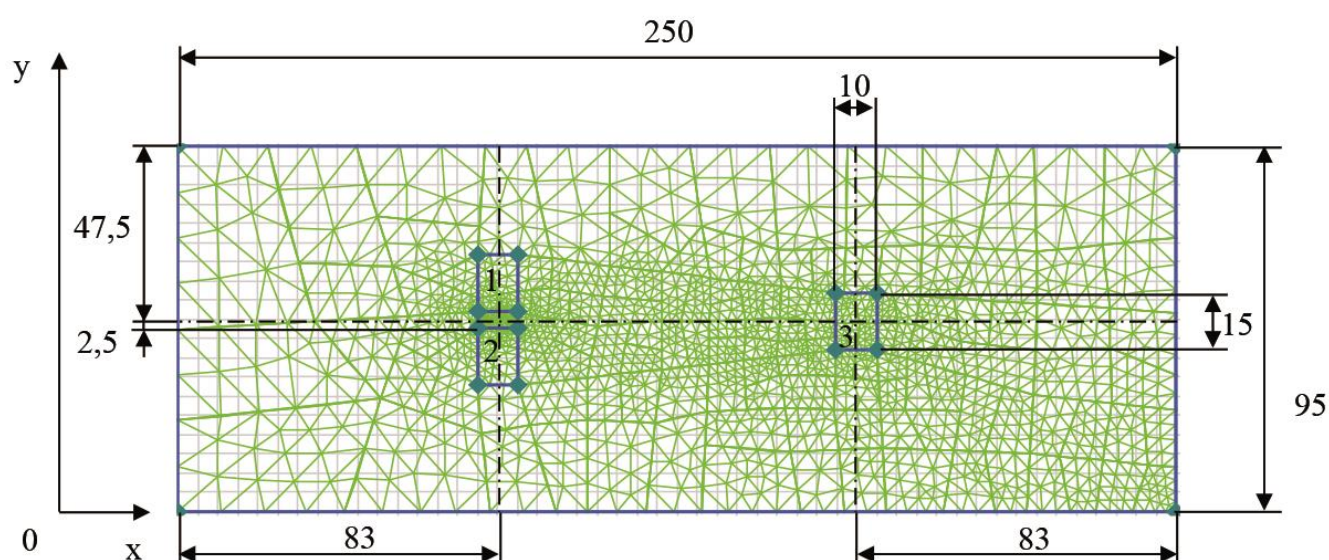


Рис. 3. Топология имитатора электронной платы

Fig. 3. Board Simulator Topology

Обсуждение результатов. Получены экспериментальные зависимости изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени без системы охлаждения при различных мощностях. Согласно данным температура тепловыделяющих элементов значительно повышается.

Так, для источника теплоты 1 в стационарном режиме ее значение составляет 428 К при мощности тепловыделений 120 Вт и 410 К при мощности тепловыделений 100 Вт (те же значения температуры и для тепловыделяющего элемента 2), а для источника теплоты 3 соответственно - 396 К и 382 К. При этом также велика температура в областях имитатора электронной платы, близлежащих к источникам теплоты, что говорит о наличии значительного температурного фона, который может сказаться на работе элементов электронной платы – служить причиной выхода их из строя.

На рис.4 приведен график изменения температуры в контрольных точках имитатора электронной платы во времени при использовании опытного образца системы охлаждения. Согласно представленным данным применение охлаждающей системы уменьшает температуру тепловыделяющих элементов до приемлемых значений. Для случая, соответствующего рис.3, температура источников теплоты снижается до 345 К и 344 К. При этом также уменьшается температурный фон, создаваемый тепловыделяющими элементами в близлежащих к ним областях имитатора электронной платы.

Для анализа энергетических характеристик системы охлаждения на рис.5 показано изменение температуры контрольных точек имитатора электронной платы от силы, питающего ТЭБ электрического тока и потребляемой электрической энергии. В соответствии с полученными данными с увеличением силы тока, протекающего через ТЭБ, температура всех контрольных точек уменьшается. При этом ее наименьшее значение для данного случая при мощности источников теплоты 120 Вт составляет 344 К, что соответствует току питания ТЭБ 9 А. Очевидно, что дальнейшее увеличение электрического тока вплоть до оптимального для данного типа ТЭМ значения (11,3 А) даст дальнейшее снижение температуры контрольных точек.

Соответственно, с ростом тока питания ТЭБ увеличивается потребляемая ею электрическая мощность. Для случая, представленного на рис.4 току 9 А соответствует потребляемая мощность 360 Вт. Получены экспериментальные зависимости температуры оболочки в зависимости от времени при плавлении рабочего вещества для различных значений тока питания ТЭБ. Согласно данным, с ростом тока питания увеличивается количество теплоты, подводимого к поверхности емкости в единицу времени (тепловой мощности), что повышает температуру оболочки. Так, при использовании в качестве рабочего агента парафина увеличение тока питания ТЭБ с 3 до 9 А повышает температуру оболочки примерно на 40 К через 1,5.

Соответственно, повышается и скорость плавления вещества. Согласно рис.5, где приведены данные о продолжительности полного плавления веществ при различных значениях тока питания ТЭБ, увеличение электрического тока с 4 до 9 А снижает время полного плавления агентов с 5,1 ч. до 3,3 ч. На практике это может привести к тому, что при соответствующих тепловых нагрузках может нарушиться нормальный режим работы элементов электронной платы. Поэтому указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании охлаждающей системы.

По результатам опытов проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных. На рис.4-6 теоретическим данным соответствуют сплошные линии. Полученные экспериментальные значения определяют приемлемую точность расчетной модели и соответствующих теоретических выкладок [20].

Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 8 %. Наибольшее отклонение расчетных данных и опыта наблюдается при измерении температуры оболочки емкости с рабочим веществом, что объясняется наличием в расчетной модели ряда допущений, снижающих точность расчета.

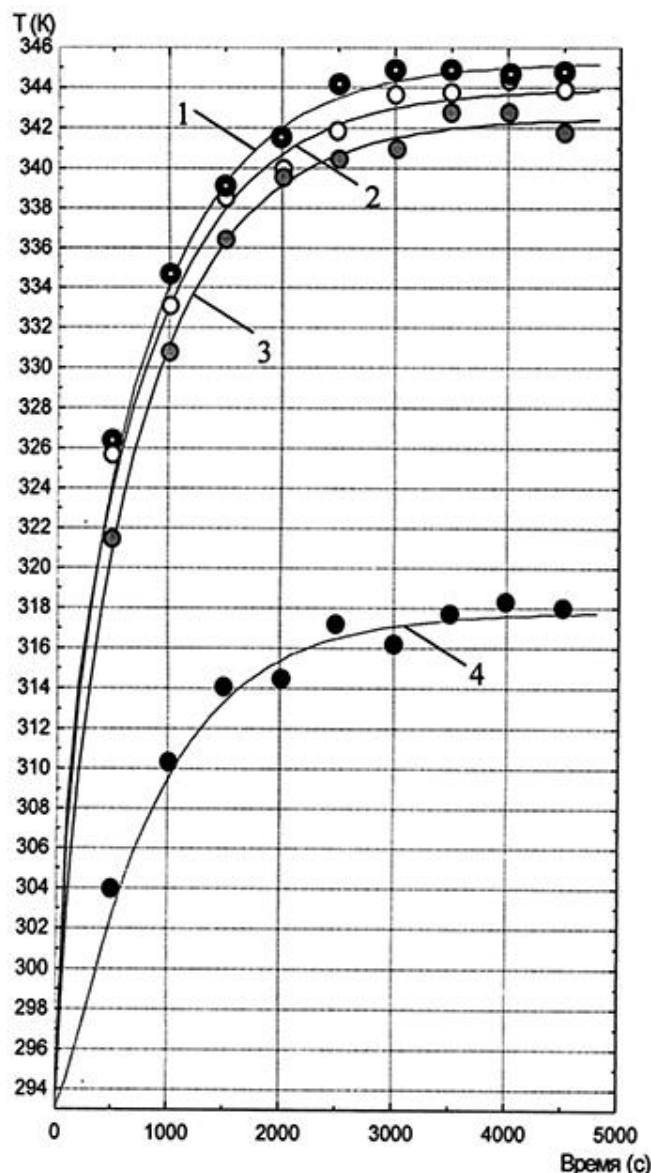


Рис. 4. Изменение температуры различных точек электронной платы во времени при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт и токе питания ТЭБ 10 А

1 – температура источника теплоты 1; 2 – температура источника теплоты 3; 3 – температура при $x=125$ мм, $y=47,5$ мм; 4 – температура при $x=17$ мм, $y=14$ мм

Fig. 4. Change in temperature of various points of the electronic board over time at a power of fuel elements of 120 W and a supply current of a thermopile of 10 A

1 – temperature of heat source 1; 2 – temperature of heat source 3; 3 – temperature at $x=125$ mm, $y=47.5$ mm; 4 – temperature at $x=17$ mm, $y=14$ mm

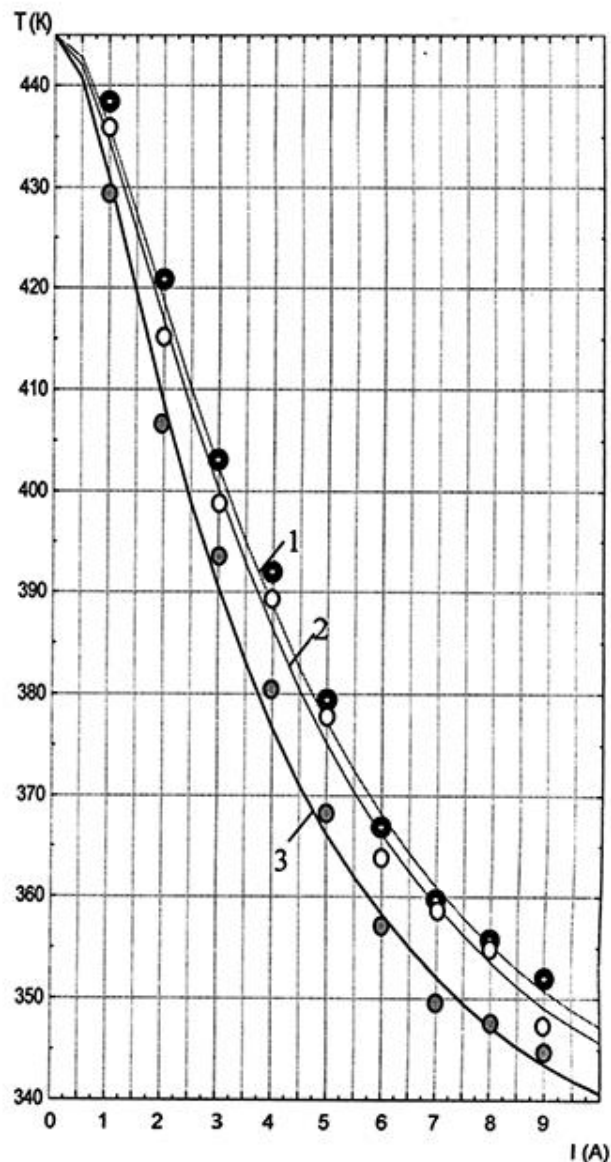


Рис. 5. Изменение температуры различных точек электронной платы от тока питания ТЭБ в стационарном режиме при мощности тепловыделяющих элементов 120 Вт

1 – температура источника теплоты 1; 2 – температура источника теплоты 3; 3 – температура при $x=125$ мм, $y=47,5$ мм

Fig. 5. Variation of the temperature of various points of the electronic board from the supply current of the thermopile in the stationary mode at the power of the fuel elements of 120 W

1 – temperature of heat source 1; 2 – temperature of heat source 3; 3 – temperature at $x=125$ mm, $y=47.5$ mm

Вывод. Разработан новый тип системы охлаждения радиоэлектронных приборов, выполненных в виде электронных плат. Для организации эффективного отвода теплоты от таких элементов РЭА использована схема неравномерного охлаждения, реализованная на основе совместного использования плавящихся рабочих веществ и ТЭБ.

Проведены экспериментальные исследования разработанной ТЭС, примененной для отвода теплоты от электронной платы высокочастотного усилителя мощности, разработанной

ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Плешакова».

В результате натурных испытаний прибора установлено, что применение охлаждающей системы уменьшает температуру тепловыделяющих элементов до приемлемых значений, в частности при суммарной мощности тепловыделений электронной платы 120 Вт температура источников теплоты снижается до 345 К и 344 К (от 428 К и 396 К).

При этом также уменьшается температурный фон, создаваемый тепловыделяющими элементами в близлежащих к ним областях имитатора электронной платы. Оценено расхождение между результатами расчетов, осуществленными предварительно, и экспериментально, которое составило 8 %.

Библиографический список:

1. Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов//Вестник ВГТУ. - 2014. - Т. 10. - №. 1. - С. 97-104.
2. В.А. Кораблев, Д.А. Минкин, Л.А. Савинцева, А.В. Шарков. Исследование мощности тепловыделений в элементах электронной и оптоэлектронной техники//Известия Вузов. Приборостроение - 2013. - т. 56, № 3 - С.98-100.
3. Bahman Zohuri Heat pipe design and technology / Zohuri Bahman. New York: Springer international publishing, 2016; 513.
4. Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.]. Optimum Cooling of Data Centers / New York: Springer-Verlag, 2014; 186.
5. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов // Журнал технической физики. 2017. -Т.87, № 1. - С. 80-86.
6. Shabany Y. Heat transfer: thermal management of electronics. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010; 471.
7. А. Ю. Меркульев, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков. Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий // Молодой ученый. - 2013. - № 11 (58). - С. 143-145.
8. П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий / Пенза: ПГУ, 2012. - 130 с.
9. Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015.- Т. 36.- №1- С.38-44. doi.org/10.21822/2073-6185-2015-36-1-38-44
10. Пат. 2314663, Рос. Федерация: МПК⁷ Н 05 К 7/20, Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.Г. Вердиев, А.М. Менафов, № 2005112476; опубл. 10.01.2008, Бюл. №1.
11. Пат. 2338300, Рос. Федерация: МПК⁷ Н 01 L 35/28, Термоэлектрическая батарея / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.Г. Вердиев, № 2007122856; опубл. 10.11.2008, Бюл. №31.
12. Etemoglu A.B. A brief survey and economical analysis of air cooling for electronic equipment. International communication in heat and mass transfer. 2007; 34:103-113.
13. В.П. Черепанов, Е.И. Посысаев. Защита радиоэлектронной аппаратуры от перегрузок / М.: РадиоСофт, 2015. - 216 с.
14. Пат. 2604097, Рос. Федерация: МПК⁷ Н05К 7/20, Теплоотводящее основание радиоэлектронного блока / Васильев А.В., Задорожный В.В., Ларин А.Ю., Омельчук И.С., Пойменов Д.Ю., Чернышев М.И., № 2015117505; заявл. 07.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.
15. Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей / СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
16. Пат. 2365071, Рос. Федерация: МПК⁷ Н 05 К 7/20, Устройство для охлаждения электронных плат / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Агаев М.У., № 2008129473; заявл. 17.07.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. №24.
17. Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов/Курск: Наукотом, 2016. - 248 с.
18. <http://www.kryotherm.spb.ru> (дата доступа 09.03.2022).
19. В.Л. Ткалич, Р.Я. Лабковская. Обработка результатов технических измерений. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. - 72 с.
20. Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, М.У. Агаев. Математическое моделирование системы неравномерного охлаждения электронных плат при совместном использовании плавящихся рабочих веществ и термоэлектрического метода преобразования энергии /Известия вузов России. Радиоэлектроника. – СПб, 2010. - №6. - С. 51-58.

References:

1. D.A. Kononov, I.N. Lazarenko, I.G. Drozdov, D.P. Shmatov. Modern approaches to the development and creation of elements of thermal protection systems for radio-electronic components. [Vestnik VGTU] *VGTU Bulletin*. 2014; 10 (1): 97-104. (In Russ)
2. V.A. Korablev, D.A. Minkin, L.A. Savintseva, A.V. Sharkov. Study of the power of heat release in the elements of electronic and optoelectronic equipment. [Izvestiya Vuzov. Priborostroyeniye] *Izvestiya Universities. Instrumentation*. 2013; 56(3): 98-100. (In Russ)
3. Bahman Zohuri. Heat pipe design and technology. New York: *Springer international publishing*, 2016; 513.
4. Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.] Optimum Cooling of Data Centers. New York: *Springer-Verlag*, 2014; 186.
5. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of thermoelectric cooling regimes for heat-loaded elements. [Zhurnal tekhnicheskoy fiziki] *Journal of technical physics*. 2017; 87(1): 80-86. (In Russ)
6. Shabany Y. Heat transfer: thermal management of electronics. Boca Raton: *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2010; 471.
7. A.Yu. Merkuliev, N. V. Goryachev and N. K. Yurkov. Cooling systems for semiconductor electrical and radio products. [Molodoy uchenyy] *Young scientist*. 2013; 11 (58): 143-145. (In Russ)
8. P.G. Andreev, I.Yu. Naumov. Protection of radio-electronic means from external influences. *Penza: PGU*, 2012; 130. (In Russ)

9. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, D.V. Evdulov. Heat removal systems from REA elements based on consumable heat accumulators [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2015; 36 (1): 38-44. doi.org/10.21822/2073-6185-2015-36-1-38-44 (In Russ)
10. Pat. 2314663, Ros. Federation: MPK7 H 05 K 7/20, Device for cooling elements of radio-electronic equipment operating in the mode of intermittent heat release / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.G. Verdiev, A.M. Menafov, No. 2005112476; publ. 01/10/2008, Bull. No. 1. (In Russ)
11. Pat. 2338300, Ros. Federation: MPK7 H 01 L 35/28, Thermoelectric battery / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.G. Verdiev, No. 2007122856; publ. November 10, 2008, Bull. No. 31. (In Russ)
12. Etemoglu A.B. A brief survey and economical analysis of air cooling for electronic equipment / A.V. Ete-moglu. *International communication in heat and mass transfer*. 2007; 34:103-113.
13. V.P. Cherepanov, E.I. Posysaev. Protection of electronic equipment from overloads. M.: *Radio-Soft*, 2015; 216. (In Russ)
14. Pat. 2604097, Ros. Federation: MPK7 H05K 7/20, Heat-removing base of the radio-electronic unit / Vasiliev A.V., Zadorozhny V.V., Larin A.Yu., Omelchuk I.S., Poymenov D.Yu., Chernyshev M.I., No. 2015117505; dec. 05/07/2015; publ. 12/10/2016, Bull. No. 34. (In Russ)
15. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov. Cooling systems based on high-current thermoelectric semiconductor converters. *St. Petersburg: Politekhnik*, 2020; 285. (In Russ)
16. Pat. 2365071, Ros. Federation: MPK7 H 05 K 7/20, Device for cooling electronic boards / Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., Agaev M.U., No. 2008129473; dec. 07/17/2008; publ. 27.08.2009, Bull. No. 24. (In Russ)
17. Alekseev V.A. Fundamentals of designing spacecraft heat accumulators. *Kursk: Naukom*, 2016; 248. (In Russ)
18. <http://www.kryotherm.spb.ru> (accessed 03/09/2022). (In Russ)
19. V.L. Tklich, R.Ya. Labkovskaya. Processing of the results of technical measurements. St. Petersburg: *St. Petersburg State University ITMO*, 2011; 72. (In Russ)
20. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, M.U. Agaev. Mathematical modeling of the system of non-uniform cooling of electronic boards with the joint use of consumable working substances and the thermoelectric method of energy conversion. [Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelectronics*. St. Petersburg, 2010; 6: 51-58. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

Хайбулаев Абдурахман Магомедович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники, khaibulaew@mail.ru.

Information about authors:

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

Abdurakhman M. Khaibulaev, Post-graduate student of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering, khaibulaew@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.01.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.01.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 01.02.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-14-24

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование теплообмена и гидравлического сопротивления в коротких
и длинных прямых круглых трубах с полукруглыми турбулизаторами
в зависимости от геометрических и режимных параметров**

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 являлось определение зависимости распределений среднеинтегральных гидравлических сопротивлений и конвективного теплообмена при турбулентном течении в трубах с малыми (короткий канал) и большими (длинный канал) последовательностями полукруглых периодических выступов на основе численных решений систем уравнений Рейнольдса, замыкающихся при помощи моделей переносов сдвигового напряжения Менстера, и уравнений энергии на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке. **Метод.** Методика расчёта, основанная на решениях конечно-объёмными методами уравнения Рейнольдса, замыкаемого при помощи модели переносов сдвигового напряжения Менстера и уравнения энергии на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке позволила с приемлемыми погрешностями произвести расчёт средних коэффициентов гидравлических сопротивлений и теплоотдачи в трубе с различными количествами кольцевых полукруглых выступов. **Результат.** Проведены аналитические сравнения проделанных расчётных соотношений по относительным теплообмену и гидравлическому сопротивлению от количества выступов в каналах с различными значениями относительных высот турбулизаторов h/D , относительных шагов между турбулизаторами t/D , различными значениями критериев Рейнольдса Re , при остальных эквивалентных параметрах, которые показали, в каком случае качественные девиации вышеупомянутых характеристик осуществляются монотонно, а в каком случае — сопровождаются экстремумами или перегибами, а также показали случаи качественных изменений расчётных характеристик. С переходом от 30 выступов к 50 происходят, как правило, лишь количественные различия для относительных параметров гидросопротивлений и теплоотдачи, а их качественные изменения незначительны; с дальнейшим переходом от 50 выступов к 100 незначительными становятся и количественные их изменения. **Вывод.** Характер закономерностей распределений среднеинтегральных характеристик потоков и теплоотдачи для канала с выступами различного количества необходимо учитывать для короткого канала. Анализ полученной расчётной информации показал, что при переходе от короткого канала с турбулизаторами к длинному, чаще всего, имеет место увеличение относительного теплообмена и снижение относительных гидравлических сопротивлений, что обосновывает преимущество, с точки зрения интенсификации, теплоотдачи турбулизацией потока последних каналов по отношению к первым каналам.

Ключевые слова: моделирование, математический, теплообмен, гидросопротивление, конвективный, турбулизатор, труба, модель, Менстер, канал, короткий, длинный.

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование теплообмена и гидравлического сопротивления в коротких и длинных прямых круглых трубах с полукруглыми турбулизаторами в зависимости от геометрических и режимных параметров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1): 14-24. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-14-24

Modeling of heat transfer and hydraulic resistance in short and long straight round pipes with semicircular turbulators depending on geometric and operating parameters

I.E. Lobanov

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

Abstract. Objective. The aim of the study was to determine the dependence of the distributions of average integral hydraulic resistances and convective heat transfer in turbulent flow in pipes with small (short channel) and large (long channel) sequences of semicircular periodic protrusions based on numerical solutions of the Reynolds equation systems, closed using Menter's shear stress transfer models, and energy equations on a multi-scale intersecting structured grid. **Method.** The calculation technique based on finite volume solutions of the Reynolds equation, closed using the Menter shear stress transfer model and the energy equation on a multi-scale intersecting structured grid, made it possible, with acceptable errors, to calculate the average coefficients of hydraulic resistance and heat transfer in a pipe with different quantities annular semicircular ledges. **Result.** Analytical comparisons were made of the calculated ratios for relative heat transfer and hydraulic resistance on the number of protrusions in channels with different values of relative heights of turbulators h/D , relative steps between turbulators t/D , different values of the Reynolds criteria Re , with other equivalent parameters, which showed that in in which case the qualitative deviations of the above characteristics are carried out monotonously, and in which case they are accompanied by extrema or inflections, and also showed cases of qualitative changes in the calculated characteristics. With the transition from 30 protrusions to 50, as a rule, only quantitative differences occur for the relative parameters of hydraulic resistance and heat transfer, and their qualitative changes are insignificant; with a further transition from 50 protrusions to 100, their quantitative changes also become insignificant. **Conclusion.** The nature of the patterns of distributions of the mean integral characteristics of flows and heat transfer for a channel with protrusions of various numbers must be taken into account for a short channel. An analysis of the calculated information obtained showed that when moving from a short channel with turbulators to a long one, most often, there is an increase in relative heat transfer and a decrease in relative hydraulic resistance, which justifies the advantage, from the point of view of intensification, of heat transfer by turbulence of the flow of the last channels in relation to the first channels.

Keywords: modeling, mathematical, heat transfer, hydraulic resistance, convective, turbulator, pipe, model, Mentor, channel, short, long

For citation: I.E. Lobanov. Modeling of heat transfer and hydraulic resistance in short and long straight round pipes with semicircular turbulators depending on geometric and operating parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 14-24. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-14-24

Введение. Общеизвестный и в достаточной мере проверенный практически метод смерчевой интенсификации теплоотдачи заключается в применении повторяющихся выступов на стенках омываемой поверхности [1]. Исследования зависимости теплоотдачи и гидросопротивлений в этих случаях чаще всего проводились опытными способами, а существующие теории в этом направлении ограничены и базируются на интегральном подходе [2, 11, 17-21]. Сейчас при решении задачи по смерчевой теплофизике интенсивным образом развивается многоблочная вычислительная технология, базирующаяся на пересекающейся структурированной сетке [4, 5, 7].

Постановка задачи. Настоящая статья является продолжением применения существующих способов [8-16] для анализа турбулентных течений и теплоотдачи в трубе с выступами полукруглых профилей с различными относительными высотами, шагами и режимами течений теплоносителей, для цели наиболее тщательного анализирования интенсифицированной теплоотдачи для длинных и коротких труб с выступами.

Методы исследования. Системы уравнения Рейнольдса и уравнения энергий, записанных для естественных переменных, решаются при помощи конечно-разностной полностью неявной схемы на центрированных неравномерных косоугольных сетках. Используются принципы расщеплений по физическому процессу. Конвективное слагаемое аппроксимируется при помощи квадратичных противопоточных схем.

Процедуры SIMPLEC применяются при расчёте полей давлений. Решения разностных уравнений реализуются при помощи высокоэффективных способов неполных матричных факторизаций. Ускорения сходимостей реализуется применением методов аддитивных коррекций. Для корректных описаний турбулентной теплоотдачи применяются многоблочные алгоритмы решений задач на пересекающейся разномасштабной сетке, апробированные для решения задачи динамики вихрей и теплоотдачи [4]. Был применён метод для описания турбулентных переносов при помощи зональных низкорейнольдсовых моделей Ментера [5].

Разработанные в объектно-ориентированных средах C++ расчётные программы содержат пользовательские интерфейсы для решения в Windows 8.

Последовательности работ с программами включают нижеследующие этапы: введение (коррекция) начальных данных; выполнение расчёта и предусмотрены режимы генерации файла для результата в форме для TECPLOT (Amtec Engineering, Inc.) с визуализацией графики пространственного течения; просмотры, сопоставления, анализирование, вывод на печать результата расчётов.

Исследуются каналы постоянных цилиндрических сечений с расположением на стенке выступами с формой периодической диафрагмы количеством N от 4 до 30, и до 50, которые имеют полукруглые поперечные сечения.

Диапазон изменений характеристик выступов: $d/D = 0,85 \div 0,99$; $t/D = 0,25 \div 1$, где t — шаг размещений выступов; d — диаметры диафрагм; D — диаметры труб. Интервалы изменений критериев Рейнольдса: $Re = 10^4 \div 10^5$. В настоящей статье расчёты теплоотдачи проводятся на воздухе: $Pr = 0,72$.

2-мерная и 3-х-мерная расчётные области включают целый ряд секций, которые содержат по одному выступу. Постулируется, что для нескольких выступов турбулентные течения приобретают установившиеся тенденции.

Расчёты теплоотдачи в статье проводились с граничными условиями на стенках 1-го рода.

В настоящей статье количество секций увеличены с 4 до 30 и до 50, с целью установления закономерности изменений интенсифицирования теплоотдачи для длинных и коротких труб. Подробнее конкретные аспекты модели численного расчёта реализованного метода ранее рассматривалась в [4, 7-16].

При сравнении в [7-11; 13-16] использовались соответствующие опытные данные по теплообмену и гидросопротивлению для каналов с турбулизаторами сходных параметров, в которых имелось хорошее коррелирование расчётных и экспериментальных данных. Указанное обосновало применение этого способа расчётов при исследовании теплоотдачи и гидросопротивления в длинных и коротких круглых каналах с периодическими поверхностными выступами полукруглых поперечных сечений в зависимости от режимных и геометрических характеристик.

Обсуждение результатов. Влияние геометрических и режимных характеристик параметров на осреднённые параметры течения и теплообмена.

Соответственность имеющимся опытным данным сгенерированной расчётной модели для местных и средних параметров течений и теплоотдачи в трубе с выступами обосновывает её использование для выявления закономерностей средних характеристик течений и теплоотдачи в трубе с разным числом выступов (от 4 до 30 и до 50) в зависимости от режимов течений теплоносителей и геометрии каналов.

В данной статье были рассмотрены выступы полукруглых поперечных сечений (они наиболее распространены), что характерно в трубах с диафрагмами. Этот вопрос является значительным, т.к. нужна информация: длинные или короткие каналы с выступами наиболее эффективны для интенсифицирования теплоотдачи как зависимость от определяющих факторов. В статье были реализованы расчётные характерные линии токов для трубы с выступами для рассматриваемых диапазонов геометрических и режимных параметров ($d/D=0,95$; $0,90$; $t/D=0,25$; $0,50$; $1,00$; $Re=10^4$; 10^5 ; $Pr=0,72$).

Подробные анализы линий токов в трубе с турбулизаторами приводились в [13-16], поэтому в данной статье данному аспекту не уделено основное внимание, т.к. он не является для неё специфичным. Проведение аналогичных исследований [13-16] анализов позволяют выявить характеры изменений для интегральных характеристик течений и теплоотдачи как зависимость от режимных и геометрических параметров труб с выступами в длинных и коротких трубах.

Выполнение вышеизложенных методов расчёта позволило рассчитать распределения средних тепловых нагрузок для трубы с выступами при их разных количествах (от 4 до 30 и до 50) полукруглых поперечных сечений как зависимость от геометрических параметров каналов (относительных высот и шагов выступов) и режимов течений теплоносителей.

Подробно рассмотрим вышеуказанные зависимости. Характерное распределение относительных параметров гидравлических сопротивлений и теплоотдачи $\xi/\xi_{гЛ}$ ($Nu/Nu_{гЛ}$) как зависимость от количества выступов в трубе приводятся на рис. 1 для нижеследующих геометрических характеристик каналов и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,95$; $t/D=1,00$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$.

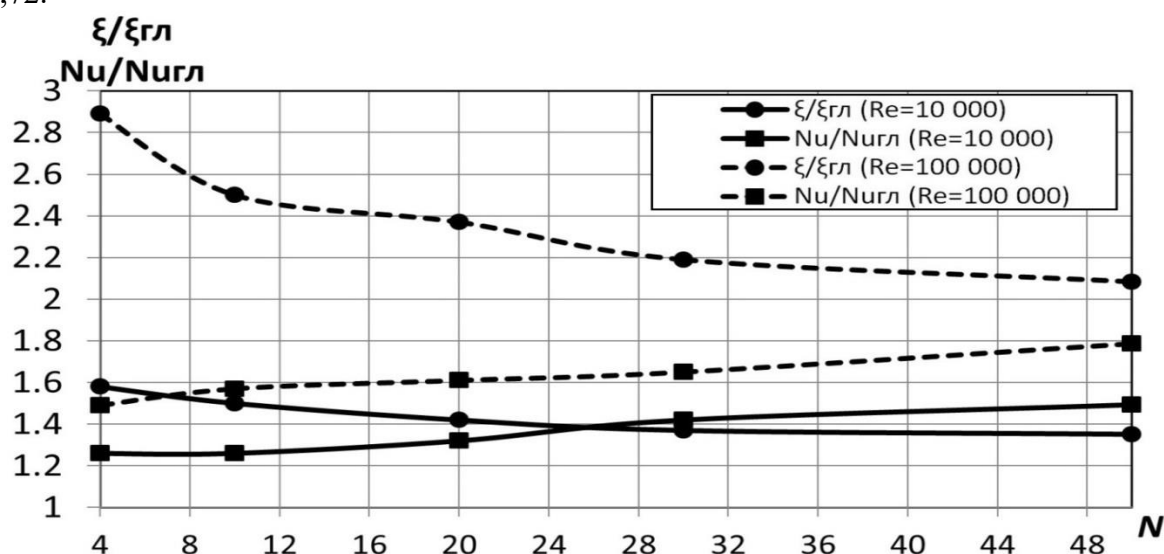


Рис. 1. Значения относительных гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{гЛ}$ и теплоотдачи $Nu/Nu_{гЛ}$ как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,95$; $t/D=1,00$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 1. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and heat carrier flow regimes: $d/D=0,95$; $t/D=1,00$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

На рис. 1 отчётливо видно, что при увеличении количества выступов имеет место уменьшение относительных гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{гЛ}$ и повышение относительных критериев Нуссельта $Nu/Nu_{гЛ}$; при числе выступов в трубах порядка тридцати повышение теплообмена даже в некоторой степени превышает относительное гидросопротивление. Этот эффект был неоднократно образом подтверждён в исследованиях экспериментального характера Э.К.Калинина и Г.А.Дрейцера [1]. Для пятидесяти выступов в трубе вышеупомянутое превышение незначительно повышается в сравнении с тридцатью выступами.

На рис. 2 приводятся соответствующие рис. 1 результаты для больших значений критерия Рейнольдса $Re=10^5$ ($d/D=0,95$; $t/D=1,00$; $Pr=0,72$), где также характерно повышение относительной теплоотдачи при уменьшении относительных гидросопротивлений, однако повышение относительной теплоотдачи уже не так значительно и меньше относительных гидросопротивлений при большом количестве выступов в трубе, а зависимости относительных гидросопротивлений имеют перегибы примерно при шестнадцати выступках. Для пятидесяти выступов сохранена тенденция определённого повышения относительной теплоотдачи и понижения относительных гидросопротивлений.

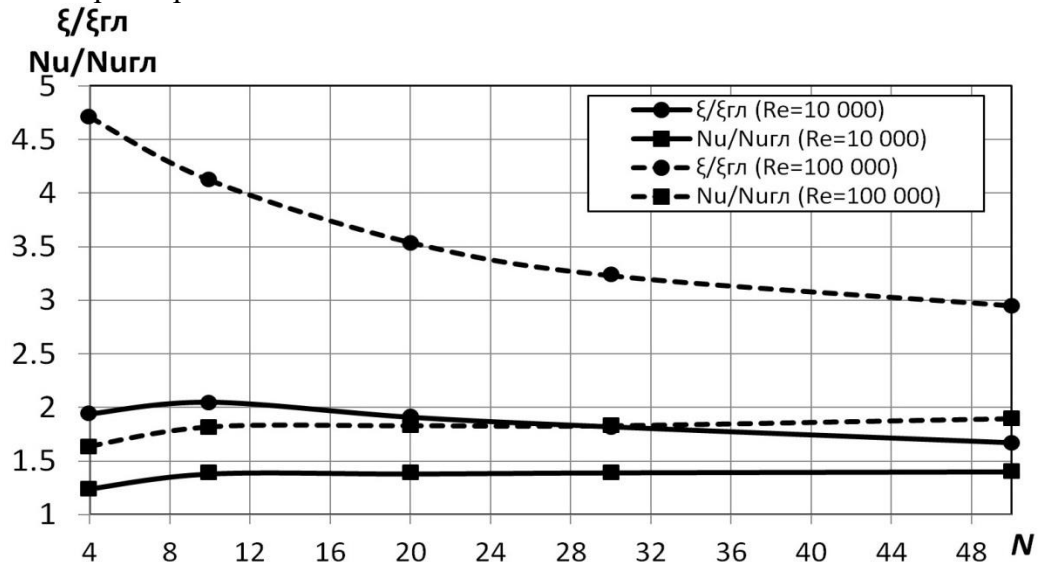


Рис. 2. Значения относительных гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{гл}$ и теплоотдачи $Nu/Nu_{гл}$ как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,95$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 2. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and coolant flow regimes: $d/D=0,95$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

Для уменьшенных величин относительных шагов между выступами ($t/D=0,50$) аналогичные соотношения будут представлены нижеследующим образом: для критерия Рейнольдса $Re=10^4$ ($d/D=0,95$; $Pr=0,72$) относительные гидравлические сопротивления также будут уменьшаться от небольших чисел выступов к большим, однако будет присутствовать максимум в области десяти выступов (рис. 2), а относительная теплоотдача будет повышаться при увеличении количества выступов с примерной стабилизацией после десяти выступов.

Аналогичные значения для $Re=10^5$ ($t/D=0,50$; $d/D=0,95$; $Pr=0,72$) приводятся на рис. 2, где наглядно видно, что тенденция изменений относительной теплоотдачи приблизительно такая же, что и для рис. 2, а зависимости относительных гидросопротивлений не имеют максимумов.

Для пятидесяти выступов реализуется последующее повышение относительной теплоотдачи и понижение относительных гидросопротивлений. Для небольших величин относительных шагов между выступами ($t/D=0,25$) соответствующие рис. 1, 2 графики для относительной теплоотдачи и относительных гидросопротивлений имеют сходную (с $t/D=0,50$) тенденцию, но при $Re=10^4$ ($t/D=0,25$; $d/D=0,95$; $Pr=0,72$) максимумы гидросопротивлений сдвигаются в направлении больших количеств выступов (порядка двадцати) рис. 3, следовательно, абсолютные уменьшения относительных гидравлических сопротивлений будут присутствовать уже после тридцати выступов в трубе, в области пятидесяти выступов; повышение относительной теплоотдачи тоже будет иметь место до большего числа выступов, чем при случае с $t/D=0,50$ ($d/D=0,95$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$). От тридцати до пятидесяти выступов относительная теплоотдача изменяется довольно незначительно.

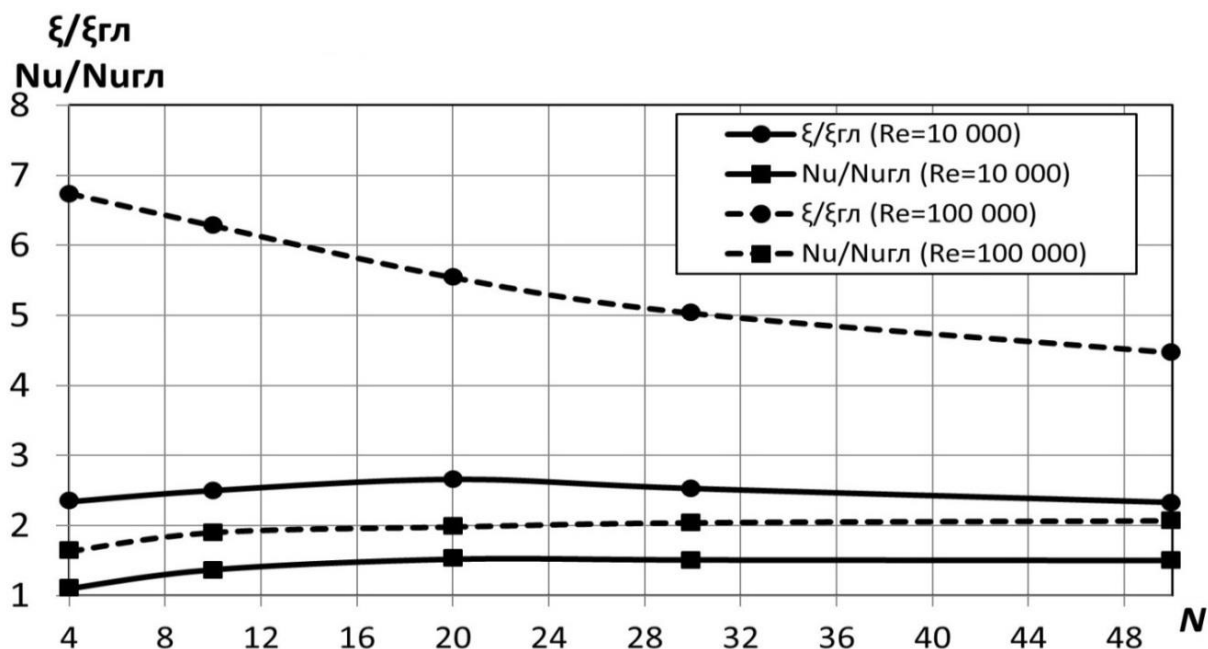


Рис. 3. Значения относительных гидравлических сопротивлений ξ/ξ_{GL} и теплоотдачи Nu/Nu_{GL} как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,95$; $t/D=0,25$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 3. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and heat carrier flow regimes: $d/D=0,95$; $t/D=0,25$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

При небольших значениях относительных шагов между выступами ($t/D=0,25$) и ещё больших критериях Рейнольдса $Re=10^5$ ($d/D=0,95$; $Pr=0,72$) понижение относительных гидравлических сопротивлений и повышение относительной теплоотдачи имеют тенденцию, сходную с соответствующими закономерностями для средних шагов между выступами ($t/D=0,50$); различия будут лишь в их абсолютных величинах рис. 3.

Для пятидесяти выступов будет реализовываться та же тенденция, что и при меньшем количестве выступов. Впоследствии, необходимо исследовать закономерности для турбулизатора с большими относительными высотами $d/D=0,90$, которые аналогичны представленным на рис. 1-3.

Для большого относительного шага ($t/D=1,00$) и большой относительной высоты турбулизатора ($d/D=0,90$) тенденция снижения относительных гидравлических сопротивлений будет сходна и для невысоких ($Re=10^4$), и для высоких критериев Рейнольдса ($Re=10^5$), а тенденция повышения относительной теплоотдачи будет приблизительно линейной (рис. 4).

Для пятидесяти выступов поддерживается тот же характер изменений относительной теплоотдачи и относительных гидросопротивлений, что и для тридцати турбулизаторах. Для среднего относительного шага ($t/D=0,50$) и большой относительной высоты турбулизатора ($d/D=0,90$) при невысоких критериях Рейнольдса ($Re=10^4$) зависимости относительных гидросопротивлений имеют максимумы в области десяти турбулизаторов. В то же время для высоких критериев Рейнольдса ($Re=10^5$) снижения относительных гидросопротивлений при увеличении количества выступов происходят монотонным образом (рис. 5); зависимости относительной теплоотдачи в данном случае поначалу увеличиваются, а потом сравнительно незначительным образом снижаются; последнее больше проявляется для более низких критериев Рейнольдса (рис. 5).

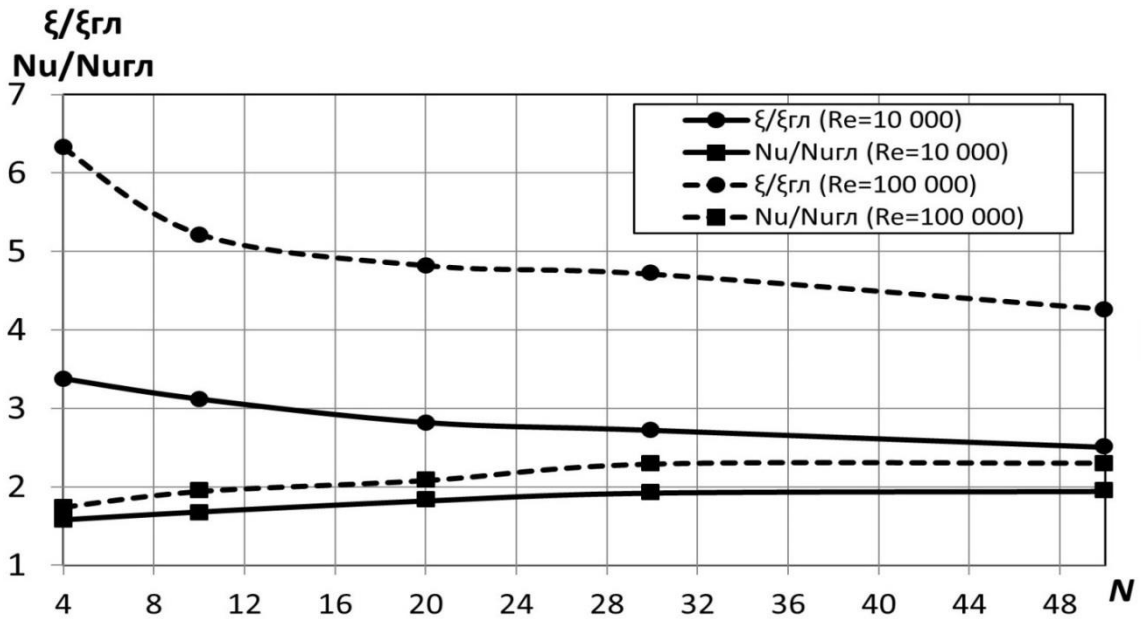


Рис. 4. Значения относительных гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{\text{гл}}$ и теплоотдачи $Nu/Nu_{\text{гл}}$ как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,90$; $t/D=1,00$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 4. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and heat carrier flow regimes: $d/D=0,90$; $t/D=1,00$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

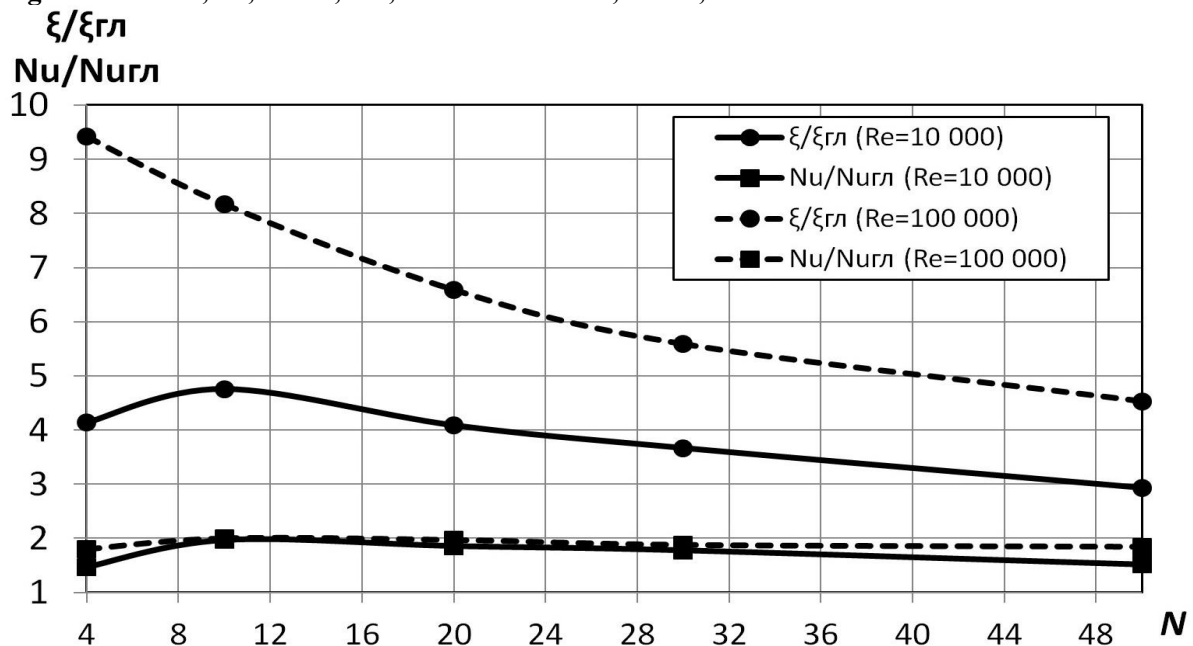


Рис. 5. Значения относительных гидравлических сопротивлений $\xi/\xi_{\text{гл}}$ и теплоотдачи $Nu/Nu_{\text{гл}}$ как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,90$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 5. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and heat carrier flow regimes: $d/D=0,90$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

Для пятидесяти выступов тенденция при изменении относительных параметров остаётся неизменной. Для относительно малого шага ($t/D=0,25$) и большой относительной высоты турбулизатора ($d/D=0,90$) понижение гидравлических сопротивлений осуществляется при слабом максимуме для небольших критериев Рейнольдса ($Re=10^4$), а для больших критериях Рейноль-

дса ($Re=10^5$) максимума не наблюдается (рис. 6); тенденция повышения относительной теплоотдачи происходит при перегибе (рис. 6).

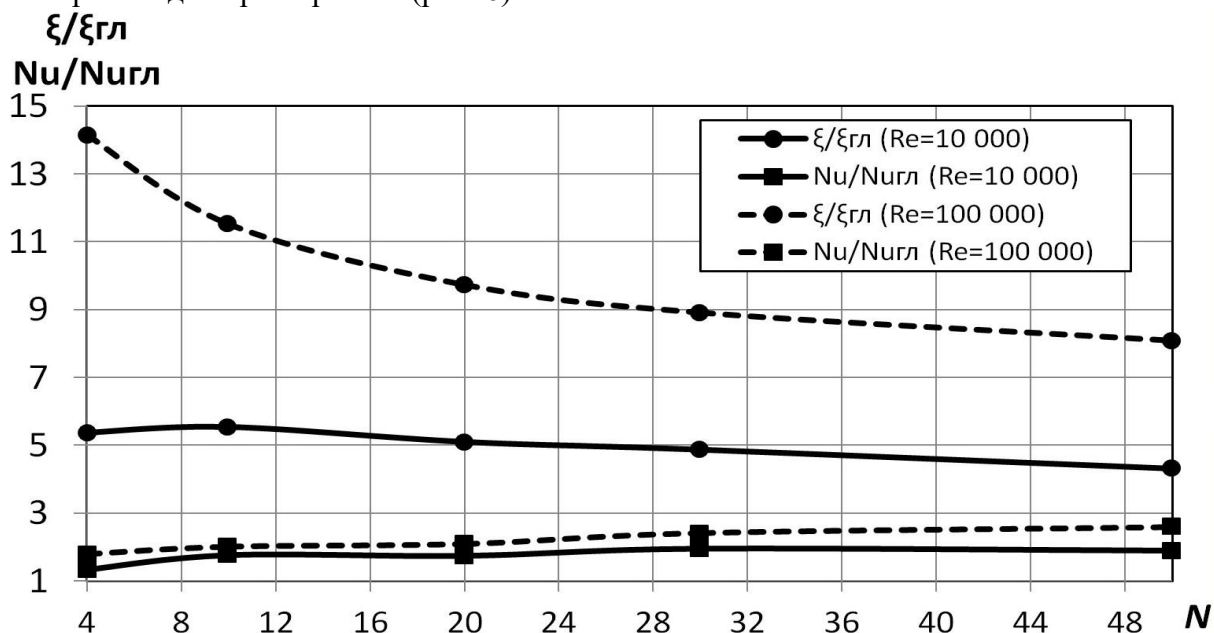


Рис. 6. Значения относительных гидравлических сопротивлений ξ/ξ_{GL} и теплоотдачи Nu/Nu_{GL} как зависимость от количества выступов в трубе N для нижеследующих геометрических характеристик труб и режимов течений теплоносителей: $d/D=0,90$; $t/D=0,25$; $Re=10^4$ и 10^5 ; $Pr=0,72$.

Fig. 6. Values of relative hydraulic resistances ξ/ξ_{HL} and heat transfer Nu/Nu_{HL} as a function of the number of protrusions in the pipe N for the following geometric characteristics of pipes and coolant flow regimes: $d/D=0,90$; $t/D=0,25$; $Re=10^4$ and 10^5 ; $Pr=0,72$.

От тридцати до пятидесяти выступов происходит аналогичное понижение относительных гидросопротивлений, но относительная теплоотдача незначительно изменяется.

Далее было необходимо проведение аналогичных расчётов для характеристик течений и теплоотдачи, но при 100 турбулизаторах, и для ограниченных диапазонов с определяющими параметрами, а именно: с относительно малыми турбулизаторами и малыми критериями Рейнольдса – $Re=10^4$; $d/D=0,95$; $t/D=0,25 \div 1,00$; $Pr=0,72$.

Расчётные результаты для ограниченных диапазонов определяющих характеристик будут следующими ($d/D=0,95$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$):

- при $t/D=0,25$ – $\xi/\xi_{GL}=2,33$ для пятидесяти турбулизаторов и $\xi/\xi_{GL}=2,32$ для ста турбулизаторов; $Nu/Nu_{GL}=1,50$ для пятидесяти турбулизаторов и $Nu/Nu_{GL}=1,51$ для ста турбулизаторов;
- при $t/D=0,50$ – $\xi/\xi_{GL}=1,67$ для пятидесяти турбулизаторов и $\xi/\xi_{GL}=1,66$ для ста турбулизаторов; $Nu/Nu_{GL}=1,40$ для пятидесяти турбулизаторов и $Nu/Nu_{GL}=1,41$ для ста турбулизаторов;
- при $t/D=1,00$ – $\xi/\xi_{GL}=1,35$ для пятидесяти турбулизаторов и $\xi/\xi_{GL}=1,34$ для ста турбулизаторов; $Nu/Nu_{GL}=1,49$ для пятидесяти турбулизаторов и $Nu/Nu_{GL}=1,51$ для ста турбулизаторов.

Анализируя полученные расчётные данные можно заключить, что различие относительных величин по теплоотдаче и гидросопротивлению с переходом от пятидесяти к ста турбулизаторам не велико, как качественно, так и количественно.

Сравнительный анализ реализованных в статье результатов зависимостей относительной теплоотдачи и относительного гидросопротивления от количества выступов в каналах при переменных величинах относительных высот турбулизаторов ($h/D=(1-d/D)/2$) при остальных эквивалентных условиях позволяет сделать вывод, что реализуются лишь количественные различия вышесказанных параметров, в то же время их качественный характер остаётся приблизительно постоянным (рис. 1-6).

Сравнительный анализ реализованных в статье результатов зависимостей относительной теплоотдачи и относительного гидросопротивления от количества выступов в каналах при переменных величинах относительных шагов между выступами t/D при остальных эквивалентных условиях позволяет сделать вывод, что закономерности относительной теплоотдачи различаются, по большей части, лишь количественными величинами, а закономерности относительных гидравлических сопротивлений при небольших критериях Рейнольдса $Re=10^4$ с увеличением шагов между выступами t/D сдвигаются от монотонных к кривым с максимумами, а потом к кривым с перегибами, а для высоких критериев Рейнольдса $Re=10^5$ понижения относительного гидросопротивления происходят монотонным образом.

Сравнительный анализ реализованных в статье результатов зависимостей для относительной теплоотдачи и относительного гидросопротивления от критерия Рейнольдса Re при остальных эквивалентных условиях позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев происходят лишь количественные различия расчётных параметров для относительной теплоотдачи, а для относительных гидросопротивлений с увеличением критерия Рейнольдса происходят качественные перераспределения от понижения к максимуму до монотонного понижения (рис. 1-6).

Вывод. Резюмируя, можно сказать, что вышепредставленные результаты расчётов позволяют сделать следующее заключение: для большинства случаев с переходом от короткого турбулизированного канала к аналогичному длинному происходит повышение относительного теплообмена и понижение относительных гидравлических сопротивлений, что приводит к редукции в плане интенсифицирования теплоотдачи первого по отношению к последнему.

1. Разработанная и применённая в данной статье методика расчётов, основанная на решениях конечно-объёмными методами уравнения Рейнольдса, замыкаемого при помощи модели переносов сдвигового напряжения Менстера и уравнения энергий на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке позволила с приемлемыми погрешностями произвести расчёт средних коэффициентов гидравлических сопротивлений и теплоотдачи в трубе с различными количествами кольцевых полукруглых выступов.

2. Теоретическим расчётным способом были исследованы зависимости распределений интегральных характеристик течений и теплоотдачи для конвективного теплообмена в трубах с поверхностными периодическими турбулизаторами полукруглых профилей на базе численных решений систем уравнений Рейнольдса, которые замыкались при помощи моделей переносов сдвигового напряжения Менстера, и уравнений энергий на разномасштабной пересекающейся структурированной сетке, которые в значительной степени зависят от режимов течений теплоносителей и канальной геометрии.

3. В статье были проведены аналитические сравнения проделанных расчётных соотношений по относительным теплообмену и гидравлическому сопротивлению от количества выступов в каналах с различными значениями относительных высот турбулизаторов h/D , относительных шагов между турбулизаторами t/D , различными значениями критериев Рейнольдса Re , при остальных эквивалентных параметрах, которые показали, в каком случае качественные девиации вышеупомянутых характеристик осуществляются монотонно, а в каком случае - сопровождаются экстремумами или перегибами, а также показали случаи качественных изменений расчётных характеристик.

4. С переходом от тридцати выступов к пятидесяти происходят, как правило, лишь количественные различия для относительных параметров гидросопротивлений и теплоотдачи, а их качественные изменения незначительны; с дальнейшим переходом от пятидесяти выступов к ста незначительными становятся и количественные их изменения.

5. Характер закономерностей распределений среднеинтегральных характеристик потоков и теплоотдачи для канала с выступами различного количества необходимо учитывать для короткого канала.

6. Полученная в статье расчётная информация позволила выявить, что переходы от короткого канала с турбулизаторами к длинному каналу с турбулизаторами почти во всех случаях

сопровожаются повышением относительного теплообмена и понижением относительных гидравлических сопротивлений, что обуславливает преимущественное интенсифицирование теплообмена в длинном канале в сравнении с коротким.

Библиографический список:

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З.Копп и др. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 408 с.
2. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей с переменными физическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. - М.: Изд-во МЭИ, 2002. - С. 144-147.
3. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д.Госмен, В.М. Пан, А.К.Ранчел и др. -М.: Мир, 1986. - 234 с.
4. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В.Ермишина и С.А.Исаева. - М.–СПб, 2001. - 360 с.
5. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. - 1994. - V. 32. - № 8. - P. 1598.
6. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. - М.: Высшая школа, 1988. - 479 с.
7. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев и др. - СПб: Судостроение, 2005. - 398 с.
8. 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 учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. - М.: МЭИ, 2003. - Т. 1. - С. 57-60.
9. 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.
10. 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.
11. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. - М., 2005. - 632 с.
12. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. - Минск, 2008. - Т. 1. - С. 101-103.
13. 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.
14. Лобанов И.Е. Структура вихревых зон между периодическими поверхностно-расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Электронный научный журнал «Исследования технических наук». - 2012. - Май. - Выпуск 4. - Том 2. - С. 18-24.
15. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. - 2012. - Т. 24. - № 7. - С. 45—58.
16. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование кинетической энергии турбулентных пульсаций и её составляющих в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. - 2013. - № 1. - С. 23-30.
17. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и композитных моделей турбулентного пограничного слоя. - М.: МГАКХиС, 2010. - 288 с.
18. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. - М.: Издательство МАИ, 2011. - 160 с.
19. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на базе четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Современные проблемы науки и образования. - 2010. - № 3. - С. 81-89.
20. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами для теплообменников современного металлургического производства с применением четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя // Техника и технология. - 2010. - № 3. - С. 67-77.
21. Лобанов И.Е. Теория интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах на базе четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов - М.: Издательский дом МЭИ, 2011. - С. 149-151.

References:

1. Effective heat transfer surfaces / E.K. Kalinin, G.A. Dreitzer, I.Z. Kopp et al. - M.: *Energoatomizdat*, 1998; 408. (In Russ)
2. Lobanov I.E. Modeling of heat transfer and resistance in turbulent flow in channels of heat carriers with variable physical properties under conditions of heat transfer intensification // *Proceedings of the Third Russian National Conference on Heat Transfer*. In 8 volumes. T.6. Intensification of heat transfer. Radiation and complex heat transfer. - M.: *MPEI Publishing House*, 2002; 144-147. (In Russ)
3. Numerical methods for studying viscous fluid flows / A.D. Gosmen, V.M. Pan, A.K. Ranchel and others. M.: *Mir*, 1986; 234. (In Russ)
4. Flow control around bodies with vortex cells as applied to integrated aircraft (numerical and physical modeling), Ed. A.V. Ermishina and S.A. Isaev. - M.-SPb, 2001; 360. (In Russ)
5. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994; 32(8): 1598.
6. Yudaev B.N. Technical thermodynamics. Heat transfer. M.: [Vysshaya shkola] *Higher school*, 1988; 479. (In Russ)

7. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev N.A. et al. - Numerical modeling of vortex heat transfer intensification in pipe packages. [Sudostroyeniye] *Shipbuilding*, 2005; 398. (In Russ)
8. Dreitser 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 School-seminar for young scientists and specialists under the guidance of Academician A.I. Leontiev. M.: MPEI, 2003; 1: 57-60. (In Russ)
9. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions. [Vestnik MAI]. *Vestnik MAI*. 2004; 11(2): 28-35. (In Russ)
10. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulators [Teplofizika vysokikh temperatur] *High Temperature Thermophysics*. 2005; 43(2): 223-230. (In Russ)
11. Lobanov I.E. Mathematical modeling of enhanced heat transfer in turbulent flow in channels: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. M., 2005; 632. (In Russ)
12. Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problems of research of heat exchange processes in the flows of single-phase media at the stage of successful development of numerical modeling. Abstracts of reports and reports of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. Minsk, 2008; 1: 101-103.
13. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of streamlines and components of the kinetic energy of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators [Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk] *Branch aspects of technical sciences*. 2011; 12: 4-15. (In Russ)
14. Lobanov I.E. The structure of vortex zones between periodic surface-located flow turbulators of rectangular cross section. [Issledovanie tekhnicheskikh nauk] *Electronic scientific journal "Research of technical sciences"*. 2012; 2 (4): 18-24. (In Russ)
15. Lobanov I.E. Modeling the structure of vortex zones between periodic superficial flow turbulators of rectangular cross section [Matematicheskoye modelirovaniye] *Mathematical Modeling*. 2012; 24(7): 45-58. (In Russ)
16. Lobanov I.E. Theoretical study of the kinetic energy of turbulent pulsations and its components in pipes with turbulators [Moskovskoye nauchnoye obozreniye] *Moscow Scientific Review*. 2013; 1: 23-30. (In Russ)
17. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat transfer for metallurgical production. (General theory of intensified heat transfer for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of enhanced heat transfer in turbulent flow in channels using multilayer, supermultilayer and compound models of a turbulent boundary layer. M.: MGAKHiS, 2010; 288. (In Russ)
18. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Mathematical modeling of enhanced heat transfer during flow in channels based on complex models of a turbulent boundary layer. [Izdatel'stvo MAI] M.: MAI Publishing House, 2011; 160. (In Russ)
19. Lobanov I.E. Theory of intensified heat transfer during turbulent flow in channels based on a four-layer scheme of a turbulent boundary layer. [Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya] *Modern problems of science and education*. 2010; 3: 81-89. (In Russ)
20. Lobanov I.E., Stein L.M. Mathematical modeling of enhanced heat transfer during turbulent flow in pipes with turbulators for heat exchangers of modern metallurgical production using a four-layer model of a turbulent boundary layer [Tekhnika i tekhnologiya] *Technique and technology*. 2010; 3: 67-77. (In Russ)
21. Lobanov I.E. Theory of intensified heat transfer in turbulent flow in channels based on a four-layer scheme of a turbulent boundary layer. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows: Fourth international conference: abstracts. [Izdatel'stvo MAI] MPEI Publishing House, 2011; 149-151. (In Russ)

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, lloobbaannooff@live.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MA, lloobbaannooff@live.ru; ORCID 0000-0001-8421-0248

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 11.02.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revided 21.02.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 22.02.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.6

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

Оригинальная статья /Original Paper

**Применение численного моделирования для модернизации выхлопной системы
газотурбинных двигателей**

Т.В. Бощенко, С.Ю. Лебедев, А.Н. Королевских

Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является модернизация конструкции выхлопной системы газотурбинных двигателей (ГТД) с целью снижения аэродинамических потерь, используя численные методы (CFD-методы) моделирования течения выхлопных газов. **Метод.** Направления модернизации были выбраны путем рассмотрения картины течения выхлопных газов (отрывных зон течения и вихревых течений) в выхлопной системе при численном моделировании (Computational Fluid Dynamics). Модернизация выхлопной системы заключается в профилировании осерадиального диффузора и изменении конструкции газосборника. **Результат.** Профилирование осерадиального диффузора было выполнено, используя численные методы моделирования. Конструкция газосборника была изменена на основе технического решения, предложенного В.Б. Явкиным. Было выполнено численное моделирование течения выхлопных газов в модернизированном выхлопном устройстве. Для оценки результатов модернизации в численных моделях модернизированной конструкции и прототипа были определены значения аэродинамических потерь на выходе из осерадиального диффузора и газосборника. **Вывод.** CFD-моделирование позволило получить данные о структуре потока выхлопных газов в модернизированной выхлопной системе, увидеть картину распределения скоростей и давлений. Результаты численного эксперимента показали снижение потерь давления по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Ключевые слова: выхлопная система, осерадиальный диффузор, выхлопная улитка, CFD-моделирование, численное моделирование

Для цитирования: Т.В. Бощенко, С.Ю. Лебедев, А.Н. Королевских. Применение численного моделирования для модернизации выхлопной системы газотурбинных двигателей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 25-32. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

**Application of numerical simulation for the modernization of the exhaust system
of gas turbine engines**

T.V. Boshchenko, S.YU. Lebedev, A.N. Korolevskikh

Tyumen Industrial University,
38 Volodarskogo Str., Tyumen 625000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to modernize the design of the exhaust system of gas turbine engines (GTE) in order to reduce aerodynamic losses using numerical methods (CFD methods) for simulating the flow of exhaust gases. **Method.** The directions of modernization were chosen by considering the pattern of the flow of exhaust gases (separated flow zones and vortex flows) in the exhaust system during numerical modeling (Computational Fluid Dynamics). The modernization of the exhaust system consists in profiling the axial diffuser and changing the design of the gas collector. **Result.** The profiling of the axial diffuser was performed using numerical simulation methods. The design of the gas collector was changed based on the technical solution proposed by V.B. Yavkin. Numerical simulation of the flow of exhaust gases in the modernized exhaust device was

performed. To evaluate the results of modernization in numerical models of the modernized design and prototype, the values of aerodynamic losses at the outlet of the axial diffuser and gas collector were determined. **Conclusion.** CFD modeling made it possible to obtain data on the structure of the exhaust gas flow in the upgraded exhaust system, to see the pattern of the distribution of velocities and pressures. The results of the numerical experiment showed a decrease in pressure losses in the exhaust system by 11% relative to the prototype.

Keywords: exhaust system, axial diffuser, exhaust volute, CFD modeling, numerical simulation.

For citation: T.V. Boshchenko, S.YU. Lebedev, A.N. Korolevskikh. Application of numerical simulation for the modernization of the exhaust system of gas turbine engines. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 25-32. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

Введение. Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в нефтегазовой отрасли. Использование ГТД в качестве силовой установки компрессора газоперекачивающего агрегата дает возможность использовать объект транспортировки в качестве топлива ГТД. Увеличение энергоэффективности ГТД дает возможность снизить затраты на транспортировку газа по магистральным трубопроводам. Одним из способов повышения энергоэффективности ГТД является снижение аэродинамических потерь в выхлопной системе ГТД. Снижение аэродинамических потерь позволяет повысить КПД ГТД, что делает исследования в этом направлении весьма актуальными.

Постановка задачи. Цель исследования – модернизировать конструкцию выхлопной системы ГТД с целью снижения аэродинамических потерь, используя численные методы (CFD-методы) моделирования течения выхлопных газов.

Методы исследования. Методики расчета элементов выхлопных систем можно разделить на три основные группы: методика расчета, основанная на принципе разделения потерь [1,2]; методика расчета, основанная на теории пограничного слоя [3]; методика численного расчета [4].

Недостаток первых двух методов – невысокая точность при сложных расчетах, который устраняется при численных методах расчета.

Существует три основополагающих подхода численных методик: прямое численное моделирование; решение систем уравнений, определенных как среднее по Рейнольдсу; подход, применяющий методы крупных вихрей.

Значительный рост вычислительной мощности ЭВМ в последние десятилетия позволил создать программное обеспечение (ПО), использующее численные методы для расчета газодинамических задач. Решение таких задач получило название – решение методами CFD (Computational Fluid Dynamics). CFD-методы могут заменить, в ряде случаев, физический эксперимент, что позволяет снизить время и затраты на проектирование.

Важным этапом при применении CFD-методов является изучение моделей турбулентности в целях определения границ их применения [5-9]. Анализ литературы показал, что наиболее достоверные данные (на 20-30% точнее других методов расчета), соответствующие экспериментальным данным, дают CFD методы при моделях турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и SST. Из всего выше сказанного заключаем, что для совершенствования конструкции выхлопной системы ГТД необходимо использование численных (компьютерных) методов расчета (CFD-методы).

Модернизация выхлопной системы. В качестве прототипа примем выхлопную систему для ГТД НК-38СТ, устанавливаемого на ГПА-16 «Волга». На рис. 1 и в табл. 1 представлены конфигурация и основные геометрические размеры осерадиального диффузора (ОРД) и газосборника, входящие в состав выхлопной системы прототипа.

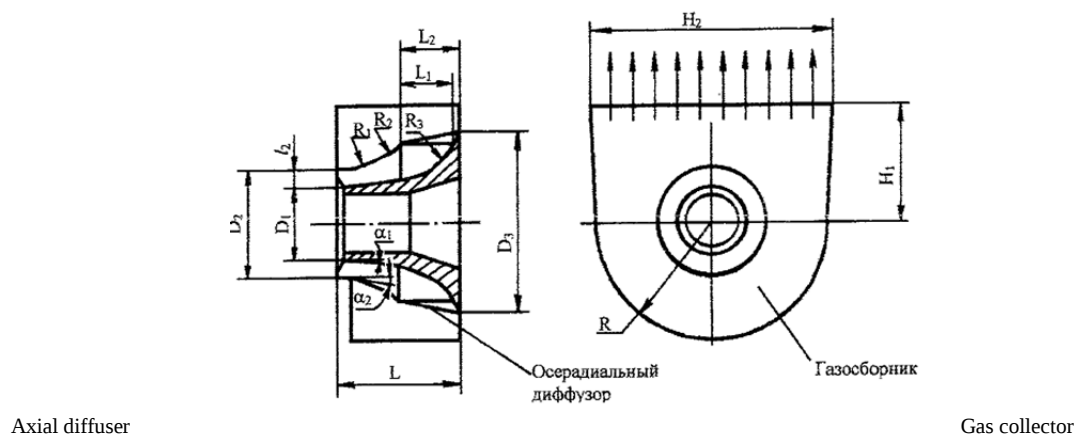


Рис. 1. Конструкция осерадимального диффузора и газосборника
Fig. 1. Design of the axial diffuser and gas collector

Таблица 1. Основные геометрические размеры осерадимального диффузора и газосборника
Table 1. Main geometric dimensions of the axial diffuser and gas collector

Наименование / Name	Значение/ Meaning
Осерадимальный диффузор / Axial diffuser	
Начальный диаметр обтекателя диффузора / Initial diffuser fairing diameter D_1 , мм	985,5
Начальный диаметр обечайки диффузора/ The initial diameter of the diffuser shell D_2 , мм	1690
Выходной диаметр обечайки диффузора/ Diffuser shell outlet diameter D_3 , мм	2580
Ширина выходного сечения диффузора/ Diffuser outlet width L_1 , мм	720
Ширина выходного сечения диффузора (за рамкой)/ Diffuser outlet width (behind the frame) L_2 , мм	772
Площадь входного сечения диффузора/ Diffuser inlet area $F_{вх}$, м ²	1,48
Площадь выходного сечения диффузора / Diffuser outlet area $F_{вых}$, м ²	4,38
Входной угол обтекателя диффузора α_1 , град/ Entrance angle of diffuser fairing	2°
Входной угол обечайки диффузора α_2 , град/ Diffuser shell inlet angle	9°15'
Радиус поворотного участка обечайки (начальный) / Radius of the turning section of the shell (initial) R_1 , мм	830
Радиус поворотного участка обечайки / Radius of the turning section of the shell R_2 , мм	907,5
Радиус поворотного участка обтекателя / Fairing turning radius R_3 , мм	755
Газосборник / Gas collector	
Радиус наружной обечайки газосборника/ The radius of the outer shell of the gas collector R , мм	1400
Длина газосборника/ Gas collector length L , мм	1560
Высота верхней части газосборника/ Height of the upper part of the gas collector H_1 , мм	1400
Ширина выходного сечения газосборника/ Width of the outlet section of the gas collector H_2 , мм	2800

Чтобы изучить структуру потока и определить отрывные зоны в представленном прототипе, исследуем газодинамику течения выхлопных газов в ОРД, газосборнике и переходнике, используя CFD-методы моделирования.

Рассмотрим подробнее основную идею CFD-методов моделирования. Большинство гидродинамических расчетов включают в себя решение систему уравнений Навье-Стокса четвертого порядка. Уравнения описывают законы сохранения массы, импульса и энергии. Информация по уравнениям представлена в [10-13].

Система уравнений Навье-Стокса не имеет аналитического решения, поэтому при решении используют численные методы. Возможность программной реализации численных методов и рост расчетной мощности ЭВМ позволили создать программное обеспечение для решения задач гидродинамики со сложной геометрией течений. В основе большинства программ, получивших название CFD-пакетов или комплексов, лежит метод конечных объемов (МКО).

Компьютерное моделирование на основе CFD-методов обладает рядом положительных качеств: снижение затрат времени на разработку новых технических решений; выполнение неосуществимых натурных экспериментов; снижение затрат на проведение исследований. Одним из наиболее универсальных CFD-пакетов является программный комплекс ANSYS CFX, который позволяет решать различные задачи газодинамики, а также теплообмена, горения и др. Преимуществом ANSYS CFX является использование расчетных схем разного порядка точности, соответствующих различным способам дискретизации конвективных составляющих из обобщенного уравнения Навье-Стокса.

Этапы исследования численной модели в программном комплексе ANSYS CFX следующие: создание геометрии численной модели (3D-модели); построение сеточной модели, позволяющей выполнить расчет на штатном ПК и получить адекватные результаты; задание расчетной области и граничных условий на основе сеточной модели; исследование численной модели; анализ полученных результатов.

Геометрия была выполнена в программном комплексе SolidWorks и импортирована в геометрический модуль ANSYS DesignModeler через формат Parasolid (.x_t). Полученная модель (раздел 3.1) импортируются внутри программного комплекса ANSYS CFX в сеточный генератор Meshing.

Задаем в сеточном генераторе структурированную, гексаэдральную модель со сгущениями ячеек вблизи стенок, для разрешения течения в пограничном слое. Параметры сеточной модели: число элементов – 4015553; размер элемента – 0,040 м). Далее импортируем сеточную модель в модуль CFX-Pre, где первым этапом создаём домен сеточной модели. В качестве материала задаваемого домена используем «Air Ideal Gas», т.к. в стандартной библиотеке ANSYS CFX нет материала «выхлопные газы», а для оценки потери и поиска отрывных зон теплофизические параметры газа не играют значимой роли.

Следует отметить, что для расчета возможно применение различных моделей турбулентности: модель Буссинеска, модель Спаларта-Альмараса, модель Ментера SST, модель типа k-ε, модель типа k-ω, модели рейнольдсовых напряжений. Они отличаются друг от друга сложностью решения уравнения движения и точностью описания течения.

В текущем исследовании выбраны полуэмпирические модели турбулентности типа модель Ментера SST, модель типа k-ε, модель типа k-ω, т.к. в работе [14] доказано, что применение в численном эксперименте этих моделей турбулентности дают результаты, наиболее соответствующие натурному эксперименту.

Заключительным этапом является задание граничных условий. К ним относим поверхности входа и выхода потока, и поверхности, контактирующие со стенками улитки и переходника. Задаем расход потока на входе 54 кг/с; на выходе давление 101325 Па (атмосферное давление); тип контакта со стенками «Isothermal».

Исследование численной модели в модуле CFX-Solver Manager выполнено на штатном ПК фирмы «HP» модель Laptop 15db-0xxx. Объем оперативной памяти ПК составляет 8 гигабайт; процессор 2-х ядерный с частотой 3,10 ГГц.

Время вычисления одной расчетной сетки в среднем составило 4-5 минут. Сходимость решения наблюдалось примерно после 50-55 математических итераций.

Для наблюдения за ходом численного эксперимента в модуле CFX-Solver Manager используются графики сходимости различных параметров. График отображает максимальное (Max) отклонение в одной из ячеек или среднеквадратичное отклонение (RMS) во всех ячейках какого-либо параметра при каждой итерации.

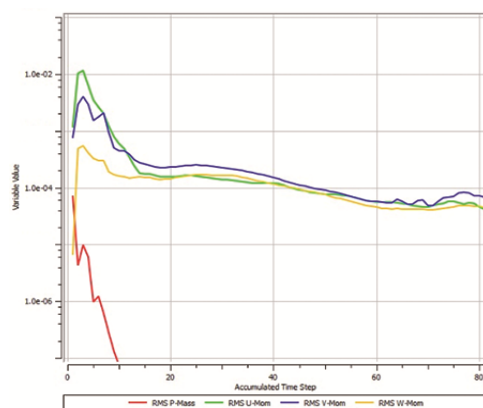


Рис. 2. График сходимости давления и скорости потока
Fig. 2. Convergence plot of pressure and flow rate

Для оценки сходимости нашего исследования необходимо использование графиков сходимости параметров давления, скорости, турбулентности, а также графики расходов на входе и выходе потока (рис. 2). При среднеквадратичном отклонении ниже 0,0001 ($1,0e-04$) численный эксперимент завершался.

Обсуждение результатов. Выполнив численный эксперимент, рассмотрим картину течения в каждом элементе прототипа. Конструкция ОРД представляет собой две поверхности вращения называемых обводами (рис. 3). Внутренний обвод именуется обечайкой, а внешний – обтекателем. В виду большей длины образующей внешнего обвода и резкому увеличению площади поперечного сечения потока выхлопных газов в ОРД возникает отрывная зона течения **А** (рис. 3). Разворот течения выхлопных газов в вертикальное направление создает центробежную силу, в результате которой поток сталкивается с обтекателем, снижая давление на поверхности внутреннего обвода, создавая отрывное течение – зона **Б**. Выходя из ОРД, поток выхлопных газов попадает в газосборник, где меняет свое направление с горизонтального на вертикальное.

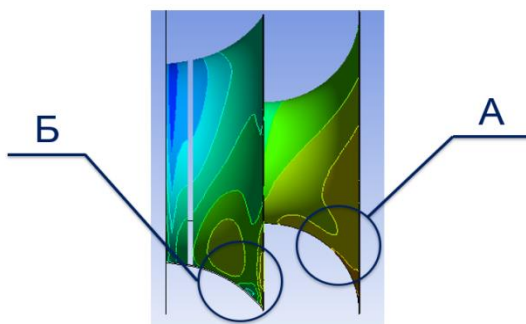


Рис. 3. Контуры полного давления на поверхности осерадиального диффузора
Fig. 3. Total pressure contours on the surface of an axial-radial diffuser

На рис. 4 видно, как в результате изменения направления течения возникает спиральное течение, что снижает эффективность выхлопной системы.

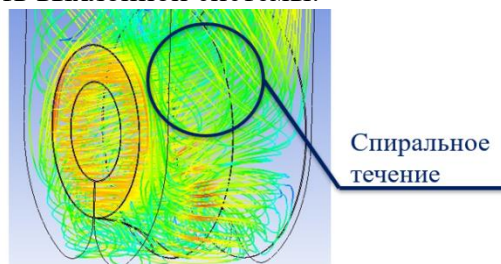


Рис. 4. Линии тока в газосборнике
Fig. 4. Current lines in the gas collector

В результате численного моделирования течения выхлопных газов в выхлопной системе были определены следующие направления модернизации:

1) Снижение области отрывного течения газов в ОРД, корректируя изменение площади поперечного сечения потока, зависящей от угла раскрытия ОРД.

2) Организация потока выхлопных газов в газосборнике: снижение завихрения потока.

В качестве инструмента для совершенствования диффузора также будем использовать CFD-методы моделирования. Для этого выполним моделирование течения потока выхлопных газов в ОРД при различных углах раскрытия ($2-7^\circ$). Геометрия ОРД позволяет выполнить исследование двумерной модели, что сократит время расчета при каждой итерации. Во всех расчетах ОРД применялась модель турбулентности к- ϵ при максимальном размере элемента сетки 1 мм. Результаты моделирования представлены на рис. 5

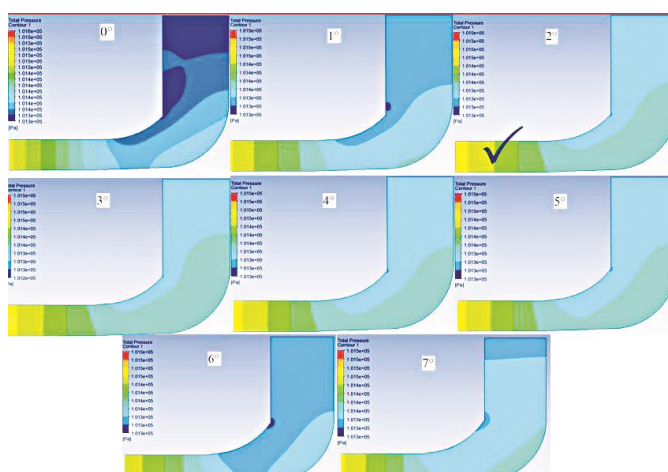


Рис. 5. Моделирование течения потока выхлопных газов в осерадиальном диффузоре при различных углах раскрытия

Fig. 5. Simulation of the flow of exhaust gases in an axial diffuser at various opening angles

При полном отсутствии угла раскрытия в профиле ОРД наблюдаются наиболее низкие значения давлений, что говорит о более высоких скоростях потока, однако, при угле раскрытия в 2 градуса поле давлений во всем профиле диффузора выравнивается, что должно устранить отрывные зоны по всему профилю ОРД.

Для снижения давления в нижней части газосборника и минимизации вихревых потоков было использовано решение, предложенное Явкиным В.Б. [15]. Суть изменения состоит в увеличении ширины газосборника и создании «кармана» (рис. 6), что должно улучшить организацию потока и снизить его завихрение.

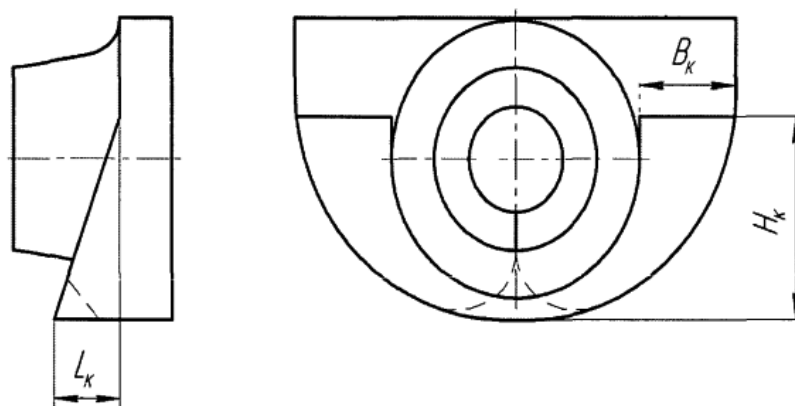


Рис. 6. Конструкция газосборника, предложенная Явкиным В.Б.[15]

Fig. 6. The design of the gas collector proposed by Yavkin V.B.[15]

В табл.2 представлено распределение потерь в элементах выхлопной системы при различных моделях турбулентности для прототипа и усовершенствованной выхлопной системы. Значения в табл.2 получены путем осреднения давлений по площади или массовому расходу в контролируемых сечениях и нахождения разности давления между текущим и предыдущим сечениями.

Таблица 2. Потери давления в элементах выхлопной системы

Table 2. Pressure losses in the elements of the exhaust system

		Потери давления/ Pressure loss, Па					
Осреднение давления/ Pressure averaging		по площади/ by area			по массе/ by weight		
модель турбулентности/Turbulence model		k-ε	k-ω	SST	k-ε	k-ω	SST
Диффузор/ Diffuser	Прототип Prototype	1590	2131	1627	1542	1736	1587
	Модернизация/ Modernization	1401	1985	1446	1370	1403	1399
Газосборник/ Gas collector	Прототип Prototype	2100	1658	2164	1484	1340	1547
	Модернизация/ Modernization	1929	1411	2005	1281	1142	1339
Переходник/ Adapter	Прототип Prototype	348	424	447	422	470	351
	Модернизация/ Modernization	311	395	409	389	444	319
Суммарные потери/ Total losses	Прототип Prototype	4038	4213	4238	3448	3546	3485
	Модернизация/ Modernization	3641	3791	3860	3040	2989	3057
Среднее значение/ Mean	Прототип Prototype	3828					
	Модернизация/ Modernization	3397					

Среднее значение суммарных потерь в таблице 2 показывают снижение потерь по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Вывод. 1. Рассмотрев основные методы расчета диффузоров, было решено использовать численные методы расчета (CFD-моделирование) при выполнении модернизации.

2. Используя CFD-моделирование, была рассмотрена структура течения в элементах выхлопной системы ГТД.

3. На основе исследования течения газов в выхлопной улитке выполнена модернизация выхлопной системы.

4. CFD-моделирование позволило получить данные о структуре потока выхлопных газов в модернизированной выхлопной системе, увидеть картину распределения скоростей и давлений. Результаты численного эксперимента показали снижение потерь давления по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Библиографический список:

1. К вопросу проектирования выхлопных устройств газотурбинных установок / И.С. Давлетшин [и др.] // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011», КНИГУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2011. С. 300-302.
2. Дорфман А.Ш. Назарчук М.М. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин: учебник. Издательство академии наук украинской ССР, Киев, 1960. 189 с.
3. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров выхлопных патрубков турбомашин. Москва: «Энергия», 1970.
4. Дорфман А.Ш. Сайковский М.И. Приближенный метод расчета потерь в криволинейных диффузорах при отрывных течениях // Промышленная аэродинамика, 1966, вып. 28, С.98-121.
5. Schluter J.U. Wu X., Pitsch H. Large-Eddy Simulations of a Separated Plane Diffuser // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, 2005, Reno, NV.
6. Lai Y.G. Calculation of Planar and Conical Diffuser Flows / Y.G. Lai, R.M. Sot, B.C. Hwangt // AJAA Journal. 1989; 27(5):542-548
7. Зинина С.А., Попов А.И., Брагин Д.М., Еремин А.В. Исследование процесса теплопереноса в тепловыделяющем элементе цилиндрической формы // Инженерный вестник Дона, 2021, №8 URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7154>

8. Долганов В.А., Адамия Д.Д., Томарева И.А. Инновационные технологии строительства нефте- и газопроводов в вечномёрзлых грунтах // Инженерный вестник Дона, 2021, №5 URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_4_dolganov_adamiya_tomareva.pdf 295b4a8739.pdf
9. Давлетшин И.С., Мингазов Б.Г. Поиск направлений оптимизации выхлопного устройства ГПА-Ц-16 // XVIII Тулолевские чтения. Т.2, Изд-во Казан., гос. техн. ун-та, 2010. -С. 18-19.
10. Sovran G. Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section / G. Sovran, E.D. Klomp // Fluid Dynamics of Internal Flow, Elsevier Publishing Co., 1967
11. Vassiliev V. Experimental and numerical investigation of the impact of swirl on the performance of industrial gas turbines exhaust diffusers / V. Vassiliev // ASME Journal of turbomachinery. 2003 GT2003- 38424.
12. Vassiliev V. Refitting of exhaust diffuser of industrial gas turbine / V. Vassiliev, M. Rothbrust, S. Irmisch // ASME Journal of turbomachinery. 2008. GT2008-50165.
13. Vassiliev V. CFD analysis of industrial gas turbine exhaust diffusers / V. Vassiliev, S. Irmisch, S. Florjancic // ASME Journal of turbomachinery. 2002. 2002-GT-30597.
14. Проектирование проточной части выхлопных устройств ГТУ с конвертированными авиационными ГТД: дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 / И.С. Давлетшин; Казань, 2013.
15. Явкин В.Б. Оптимизация проточной части выхлопного диффузора стационарной ГТУ // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011». - С. 398-401.

References:

1. On the issue of designing exhaust devices for gas turbine installations / I.S. Davletshin [et al.] // Problems and prospects for the development of aviation, land transport and energy "ANTE-2011", *KNIGU im. A.N. Tupolev, Kazan*, 2011; 300-302. (In Russ)
2. Dorfman A.Sh. Nazarchuk M.M. Aerodynamics of diffusers and exhaust pipes of turbomachines: a textbook. *Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kiev*.1960; 189.
3. Deitch M.E., Zaryankin A.E. Gas dynamics of diffusers of exhaust pipes of turbomachines. Moscow: [Energiya] Energy, 1970. (In Russ)
4. Dorfman A.Sh. Saykovsky M.I. Approximate method for calculating losses in curvilinear diffusers with separated flows. [Promyshlennaya aerodinamika] *Industrial Aerodynamics*, 1966; 28: 98-121. (In Russ)
5. Schluter J.U. Wu X., Pitsch H. Large-Eddy Simulations of a Separated Plane Diffuser. *43rd AIAA Aero-space Sciences Meeting and Exhibit*, January 10-13, 2005, Reno, NV.
6. Lai Y.G. Calculation of Planar and Conical Diffuser Flows / Y.G. Lai, R.M. Sot, B.C. Hwangt. *AJAA Journal*. 1989; 27(5):542-548
7. Zinina S.A., Popov A.I., Bragin D.M., Eremin A.V. Study of the heat transfer process in a cylindrical fuel element. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*. 2021; 8 URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n8y2021/7154>(In Russ)
8. Dolganov V.A., Adamiya D.D., Tomareva I.A. Innovative technologies for the construction of oil and gas pipelines in permafrost soils. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*, 2021; 5 URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_4_dolganov_adamiya_tomareva.pdf 295b4a8739.pdf (In Russ)
9. Davletshin I.S., Mingazov B.G. Search for optimization directions for the GPA-Ts-16 exhaust device. XVIII Tupolev Readings. T.2, *Kazan Publishing House, state. tech. un-ta*, 2010; 18-19. (In Russ)
10. Sovran G. Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section / G. Sovran, E.D. Klomp. *Fluid Dynamics of Internal Flow, Elsevier Publishing Co.*, 1967.
11. Vassiliev V. Experimental and numerical investigation of the impact of swirl on the performance of industrial gas turbines exhaust diffusers. *ASME Journal of turbomachinery*. 2003; GT2003- 38424.
12. Vassiliev V. Refitting of exhaust diffuser of industrial gas turbine / V. Vassiliev, M. Rothbrust, S. Irmisch. *ASME Journal of turbomachinery*. 2008; GT2008-50165.
13. Vassiliev V. CFD analysis of industrial gas turbine exhaust diffusers / V. Vassiliev, S. Irmisch, S. Florjancic. *ASME Journal of turbomachinery*. 2002; 2002-GT-30597.
14. Design of the flow part of the exhaust devices of gas turbines with converted aviation gas turbine engines: dis. ... cand. those. Sciences: 05.07.05 / I.S. Davletshin; Kazan, 2013. (In Russ)
15. Yavkin V.B. Optimization of the flow part of the exhaust diffuser of a stationary gas turbine.[Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki «ANTE-2011] *Problems and prospects for the development of aviation, land transport and energy "ANTE-2011"*. 2011; 398-401. (In Russ)

Сведения об авторах:

Бощенко Татьяна Викторовна, доцент, кафедра «Прикладная механика», boschenkotv@tyuiu.ru
Лебедев Сергей Юрьевич, ассистент, кафедра «Прикладная механика», lebedevsergey1995@gmail.com
Королевских Анастасия Николаевна, старший преподаватель, кафедра «Прикладная механика», korolevskihan@tyuiu.ru

Information about authors:

Tatyana V. Boshchenko, Assoc. Prof., Department of Applied Mechanics, boschenkotv@tyuiu.ru
Sergey Yu. Lebedev, Assistant, Department of Applied Mechanics, lebedevsergey1995@gmail.com
Anastasia N. Korolevskikh, Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics, korolevskihan@tyuiu.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 21.01.2022г.

Одобрена после рецензирования / Revised 17.02.2022.

Принята в печать / Accepted for publication 18.02.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 629.1

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-33-40

Оригинальная статья/Original Paper

**Некоторые особенности разработки и построения конечно-разностных моделей
стержневых конструкций радиоэлектронных средств**

Е.А. Данилова, Г.В. Таньков, Н.К. Юрков

Пензенский государственный университет,
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение конечно-разностных моделей, с помощью которых можно проводить тестирование изгибных колебаний стержня при различных условиях крепления, решая задачу в частотной или временной области. **Метод.** Исследование основано на применении метода конечных разностей и метода конечных элементов. **Результат.** Обоснована необходимость применения и предложена методика математического моделирования при конструкторском проектировании радиоэлектронных средств, работающих в условиях динамических внешних воздействий. Проанализированы значимость применения дискретных моделей и особенности их создания для исследования динамики определенных конструктивов электронной аппаратуры. Предложена концепция исследования простых моделей стержневых конструкций для анализа и проверки теоретических положений построения моделей конструкций. Показаны особенности в разработке моделей по расчету собственных форм и частот изгибных колебаний стержней. **Вывод.** Оценка вибропрочности и виброустойчивости нестационарных конструкций радиоэлектронных средств возможна методами и средствами математического моделирования, применяемых в качестве тестовых моделей для проверки различных гипотез и теоретических положений при исследовании динамики сложных конструкций и проектировании радиоэлектронных средств.

Ключевые слова: математическое моделирование, конечно-разностный анализ, радиоэлектронное средство, частота и формы колебаний, разностная схема, стержень, дискретная модель

Для цитирования: Е.А. Данилова, Г.В. Таньков, Н.К. Юрков. Некоторые особенности разработки и построения конечно-разностных моделей стержневых конструкций радиоэлектронных средств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 33-40. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-33-40

Some features of the development and construction of finite-difference models of rod structures of radio-electronic means

E.A. Danilova, G.V. Tankov, N.K. Yurkov

Penza State University,
40 Krasnaya Str., Penza 440026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to build finite-difference models that can be used to test the bending vibrations of a rod under various fastening conditions, solving the problem in the frequency or time domain. **Method.** The study is based on the application of the finite difference method and the finite element method. **Result.** The necessity of application is substantiated and the technique of mathematical modeling is proposed for the design engineering of radio-electronic means operating under conditions of dynamic external influences. The significance of the use of discrete models and the peculiarities of their creation for studying the dynamics of certain constructs of electronic equipment are analyzed. The concept of studying simple models of bar structures for the analysis and verification of the theoretical positions of constructing models of structures is proposed. The

features in the development of models for the calculation of natural shapes and frequencies of bending vibrations of rods are shown. **Conclusion.** Assessment of vibration strength and vibration resistance of non-stationary structures of radio-electronic means is possible by methods and means of mathematical modeling used as test models to test various hypotheses and theoretical positions in the study of the dynamics of complex structures and the design of radio-electronic means.

Keywords: mathematical modeling, finite difference analysis, radio electronic means, frequency and waveforms, difference circuit, rod, discrete model

For citation: E.A. Danilova, G.V. Tankov, N.K. Yurkov. Some features of the development and construction of finite-difference models of rod structures of radio-electronic means. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 33-40. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-33-40

Введение. При эксплуатации радиоэлектронных средств на подвижных носителях возможно возникновение вибраций стержневых и пластинчатых конструктивов, которые в случае возникновения резонансов могут оказывать существенное влияние на функционирование аппаратуры в целом. Для оценки работоспособности радиоэлектронных средств в жестких условиях эксплуатации желательно еще на этапе проектирования определить динамические характеристики конструкции, ее элементов и узлов, что можно сделать расчетным путем. Но конструкции современных радиоэлектронных средств – это сложные механические системы со множеством упругих и жестких связей и неклассическими способами крепления отдельных конструктивных элементов. Расчет колебаний таких систем в общем случае – сложная задача и применение аналитических методов для решения задач динамики конструкций сопряжено со значительными трудностями [1].

На практике применение получили дискретные модели, основанные на использовании сеточных методов – метода конечных разностей (МКР) и метода конечных элементов (МКЭ) [2]. Для расчета конструкций сравнительно простых геометрических форм и однородных по структуре (стержневые и пластинчатые элементы) целесообразно использование МКР и построение на его основе конечно-разностных моделей [2]. В практике исследовательских работ могут оказаться весьма полезными модели стержневых конструкций, так как можно достаточно просто построить расчетную модель динамики стержня, и, решая тестовые задачи, проверить различные варианты моделей, вносимые концепции и другие теоретические построения.

Постановка задачи. В данной работе показано как на основе МКР строятся дискретные модели по расчету динамики стержневых элементов конструкций РЭС. Показаны некоторые особенности в разработке этих моделей, с помощью которых можно проводить тестирование изгибных колебаний стержня при различных условиях крепления, решая задачу в частотной или временной области. Как отметил Морз «задача нахождения нормальных мод колебаний (простых гармонических колебаний) не является простым учебным упражнением. Для систем более сложных чем струна, закрепленная между двумя жесткими упорами, мы не имеем метода графического анализа...и единственно возможным является метод исследования движения путем разложения его на простые гармонические компоненты» [3].

Методы исследования. При исследовании простых однородных конструкций РЭС (стержни, пластины, коробки), обязательным этапом должно стать построение модели по расчету собственных форм (и частот) изгибных колебаний конструкции (решение в частотной области), основные положения которого рассмотрены далее.

Построение модели и расчетного алгоритма изгибных колебаний стержня.

1. Решение в частотной области. а) Постановка задачи. Расчет изгибных колебаний стержней представляет интерес для практики, так как жесткость стержней на изгиб значительно ниже жесткости на растяжение – сжатие и кручение. При расчетах полагается, что упругая ось стержня совпадает с линией центров масс поперечных сечений и при колебаниях, все точки стержня смещаются перпендикулярно первоначальному направлению стержня. Все поперечные

сечения стержня остаются плоскими. Считаем, что стержень шарнирно оперт и нагружен распределенной нагрузкой $q(x)$ (рис. 1).

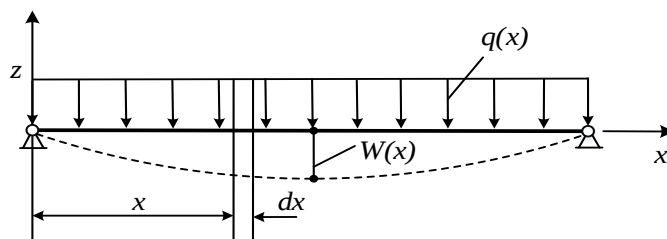


Рис. 1. Геометрическая модель стержня

Fig. 1. Geometric model of the rod

Заменяем в уравнении статического изгиба распределенную нагрузку $q(x)$ силами инерции:

$$EJ_y \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = -q(x) = -\rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; S – площадь поперечного сечения, м²; E – модуль упругости, Н/м²; J_y – момент инерции сечения стержня, м⁴; w – смещение (прогиб) стержня в i -ой точке, м; t – время, с.

Если прогнуть стержень и мгновенно убрать внешнюю силу, стержень будет совершать свободные (собственные) изгибные колебания и уравнение (1) здесь выражает равенство действующих на элемент стержня равномерно распределенных нагрузок от сил инерции и сил упругости. Уравнение (1), дополненное граничными и начальными условиями, будет служить математической моделью стержневого элемента [4].

б) Построение дискретной модели. В соответствии с МКР разбиваем стержень по длине на дискретные элементы с шагом h_x . Массу каждого элемента сосредоточиваем в его центре (узле), а силы взаимодействия между элементами заменяем упругими связями. Получаем геометрическую дискретную модель стержня, состоящую из N узлов, соединенных упругими связями (рис. 2).

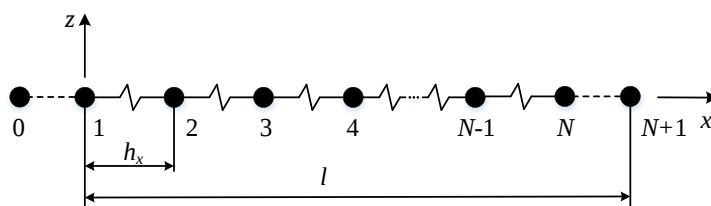


Рис.2. Дискретная модель стержня

Fig.2. Discrete rod model

Считаем, что каждый узел модели (рис. 2) колеблется во времени по закону $w = W \sin \omega t$, где ω – частота колебаний. Подставим это выражение в (1) и продифференцируем по t . Получаем:

$$EJ \frac{\partial^4 W_x}{\partial x^4} = -\rho S (-W_x \omega^2),$$

или

$$\frac{\partial^4 W_x}{\partial x^4} = \lambda W_x, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{\rho S}{EJ} \omega^2$ – собственный параметр, а индекс при J_y – опущен.

Заменяем производную в левой части разностным аналогом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\frac{W(x+h) - 2W(x) + W(x-h)}{h_x^2} \right] = \\ &= \frac{1}{h_x^2} \left[\frac{W(x+2h) - 2W(x+h) + W(x)}{h_x^2} - 2 \frac{W(x+h) - 2W(x) + W(x-h)}{h_x^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{W(x) - 2W(x-h) + W(x-2h)}{h_x^2} \right] = \\ &= \frac{1}{h_x^2} [W(x+2h) - 4W(x+h) + 6W(x) - 4W(x-h) + W(x-2h)].\end{aligned}$$

Обозначим коэффициенты: $A1 = \frac{1}{h_x^4}$, $A2 = -\frac{4}{h_x^4}$, $A3 = \frac{6}{h_x^4}$, $A4 = -\frac{4}{h_x^4}$, $A5 = \frac{1}{h_x^4}$, и упростив индексы при W в уравнении, получим разностное уравнение нашей модели

$$A1W(x+2) + A2W(x+1) + A3W(x) + A4W(x-1) + A5W(x-2) = \lambda W(x). \quad (3)$$

Уравнение (3) можно записать в форме

$$L(W_x) = \lambda_i W_x, \quad (4)$$

где L – разностный оператор; λ_i – собственный параметр в точке (узле).

Выразим значение собственного параметра из (4):

$$\lambda_i = \frac{L(W_x)}{W_x}. \quad (5)$$

Сумма λ_i дает собственный параметр всего стержня (модели). Но этот путь обладает медленной сходимостью итерационного процесса и отрицательными значениями перемещений точек (узлов).

Используем закон квадратичного приближения для отыскания собственного параметра стержня. Отметим, что исходное уравнение (4) обращается в тождество, если будет известно точное значение неизвестной – перемещения $W(x)$:

$$L(W_x) - \lambda_i W_x = 0. \quad (6)$$

Это справедливо в точке (узле). Но поскольку используются приближенные значения W_x то они должны быть такими, чтобы разность была равна какому-то минимальному значению:

$$L(W_x) - \lambda_i W_x \rightarrow \min, \text{ в каждой точке.}$$

Обозначим это значение через функционал Φ и устремим его к нулю. Для отыскания значения функционала для всего стержня нужно проинтегрировать квадрат разности по всему стержню (т.е. область Ω):

$$\int (L(W_x) - \lambda_i W_x)^2 d\Omega = \Phi, \text{ при } \Phi \rightarrow 0.$$

Для отыскания величины функционала берем производную от Φ по λ и приравняем ее к нулю:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = 0.$$

Используем производную: $(u^n)' = nu^{n-1}u'$; получим:

$$2 \int [L(W_x) - \lambda_i W_x] \cdot (-W_x) d\Omega = 0,$$

$$-\int (L(W_x)W_x) d\Omega + \int \lambda_i W_x^2 d\Omega = 0.$$

Так как область дискретна, заменим интеграл суммой:

$$\sum_1^n L(W_x)W_x = \sum_1^n \lambda_i W_x^2 = \sum_1^n \lambda_i \cdot \sum_1^n W_x^2,$$

где $\sum_1^n \lambda_i = \lambda_c$ и будет собственным параметром всего стержня, тогда

$$\lambda_i = \frac{\sum_1^n L(W_x)W_x}{\sum_1^n W_x^2}. \quad (7)$$

На основе уравнения (2) и значения λ_c получаем алгоритм расчета перемещений (в каждом узле модели) первой собственной формы колебаний:

$$W_x = \frac{A1W(x+2) + A2W(x+1) + A4W(x-1) + A5W(x-2)}{\lambda_c - A3}, \quad (8)$$

где при расчете перемещений в каждом узле используется собственный параметр стержня.

Обсуждение результатов. При реализации разработанной модели в виде алгоритма можно использовать итерационный метод, который состоит в последовательном уточнении значений перемещений при резонансе в узлах модели и собственной частоты.

Необходимо реализовать блок сохранения расчетных перемещений узлов каждой итерации. Перед началом расчета массив следует обнулить и в каждую ячейку записать перемещения узлов первого (исходного) приближения (кроме закрепленных узлов).

Затем считается собственный параметр λ_c и уточняется по (8) перемещения узлов в первом шаге итерации. Далее следует провести проверку окончания вычислений:

$$\left| \frac{\lambda_c^{(m+1)} - \lambda_c^m}{\lambda_c^m} \right| \leq \varepsilon^2,$$

где m – номер итерационного цикла; ε – величина, определяющая сходимость процесса.

Если это условие не выполняется, алгоритм предусматривает переход на следующий шаг расчета: задаются условия на границе, вычисляется λ_c , затем перемещения узлов модели в следующем шаге итераций и т.д. Если условие по ε выполняется, то нужно заполнить массив перемещений первой собственной формы колебаний (W_x0) и перейти к расчету второй собственной формы и частоты:

$$W_x2 = W_x0 - W_x1 \frac{\sum_x W_x0 \cdot W_x1}{\sum_x [W_x1]^2}, \quad (9)$$

где W_x0 – массив перемещений формы исходного приближения; W_x1 – массив перемещений первой собственной формы; W_x2 – массив перемещений второй формы.

Для расчета третьей формы алгоритм будет иметь вид:

$$W_x3 = W_x0 - W_x1 \frac{\sum_x W_x0 \cdot W_x1}{\sum_x [W_x1]^2} - W_x2 \frac{\sum_x W_x0 \cdot W_x2}{\sum_x [W_x2]^2}, \quad (10)$$

где W_x3 – массив перемещений третьей собственной формы.

Аналогично можно построить остальные алгоритмы расчета собственных форм колебаний стержня.

2. Решение во временной области. Здесь рассматриваются не свободные (собственные), а вынужденные колебания стержня под действием внешней силы (переменной), которая передается на стержень через точки крепления от корпуса носителя.

Чтобы определить истинные значения амплитуд формы колебаний, необходимо ввести в модель затухание и значение амплитуды внешнего воздействия. Запишем уравнение вынужденных колебаний стержня с учетом энергии в виде вязкости

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) + \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F(x, t), \quad (11)$$

где $\eta = \frac{\lambda_d}{\pi \omega_i}$ – коэффициент вязкости; λ_d – логарифмический декремент колебаний; ω_i – собственная частота; $F(x, t)$ – значение внешнего воздействия, задается в начальных условиях.

Обозначим $EJ = C_s$, возьмем производную по времени (второе слагаемое в (11)) и запишем (11) в виде: $C_s L(w_t) + \frac{\eta}{\tau} [C_s L(w_t) - C_s L(w_{t-\tau})] = -\rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$.

Иначе

$$-\left[\frac{\left(1 + \frac{\eta}{\tau}\right) C_s}{\rho S} L(w_t) - \frac{\frac{\eta}{\tau} C_s}{\rho S} L(w_{t-\tau}) \right] = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Правая часть в (12) представляет собой ускорение колеблющейся точки (узла) (вторая производная от перемещения по времени). Левая часть (12) равна этому ускорению – обозначим его «а». Разложим правую часть в конечные разности и запишем (12) в виде:

$$-\tau^2 a = w_x(t + \tau) - 2w_x(t) + w_x(t - \tau),$$

где τ – шаг дискретизации по времени; t , $t - \tau$, $t + \tau$ – обозначения трех моментов дискретного времени – настоящего, прошедшего, будущего.

Отсюда можно получить явную разностную схему для расчета перемещений колеблющейся точки:

$$-\tau^2 a + 2w_x(t) - w_x(t - \tau) = w_x(t + \tau). \quad (13)$$

Здесь в (12) через разностный оператор $L(w_t)$ обозначено:

$$L(w_t) = \frac{\partial^4 w_t}{\partial x^4} = \frac{1}{h_x^4} [w(x+2) - 4w(x+1) + 6w(x) - 4w(x-1) + w(x-2)].$$

Обозначим $\frac{\eta}{\tau} = AKV$, тогда левая часть (12) будет из двух слагаемых:

$$U1 = \frac{1 + AKV}{\rho S h_x^4} C_s [w_0(x+2) - 4w_0(x+1) + 6w_0(x) - 4w_0(x-1) + w_0(x-2)],$$

$$U2 = \frac{AKV}{\rho S h_x^4} C_s [w_1(x+2) - 4w_1(x+1) + 6w_1(x) - 4w_1(x-1) + w_1(x-2)],$$

где индекс «0» указывает, что перемещение берется в массиве времени «t», а индекс «1» – перемещение берется в массиве $(t - \tau)$.

Тогда ускорение a , будет равно $a = US = U1 - U2$, и перемещение внутренних точек в (13) в момент времени $t + \tau$ будет: $w_2(x) = -\tau^2 US + 2w_0 - w_1$. (14)

Разработанный алгоритм служит основой программы расчета вынужденных колебаний стержня, где перемещения узлов стержня вычисляются на основе явной разностной схемы (14) с учетом вязкости.

3. Определение масштабного коэффициента. Чтобы определить истинные значения амплитуд формы колебаний, необходимо определить некий коэффициент, где будут учтены вязкость среды и значение амплитуды внешнего воздействия. Запишем (11) в форме:

$$-\left(EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\right)\right) = \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (15)$$

Представим смещение колеблющейся точки в виде $w = w_0 + \tilde{w}$, где $w_0 = W_0 \sin \omega t$ – смещение от внешнего воздействия (постоянная составляющая), а $\tilde{w} = A(t) w_i$ – истинные смещения собственной формы, т.к. $A(t)$ есть некий масштабный коэффициент.

Тогда уравнение (14) можно записать как

$$-EJL(\tilde{w}) - \eta \frac{\partial}{\partial t} (EJL(\tilde{w})) = \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (16)$$

где L – дифференциальный оператор от $\tilde{w}$, т.к. производная от W_0 в этом операторе обращается в ноль, как от постоянной величины.

Умножим обе части (16) на w_i и преобразуем его к виду:

$$-A(t)EJL(w_i) \cdot w_i - \eta EJL(w_i) \cdot w_i \frac{\partial A(t)}{\partial t} = \rho S w_i^2 \frac{\partial^2 A(t)}{\partial t^2} + \rho S w_i \omega_0^2 W_0 \sin \omega t.$$

Проинтегрируем это уравнение и, заменив интеграл суммой, получим:

$$\begin{aligned} (-EJ \sum L(w_i) w_i) A(t) + (-\eta EJ \sum L(w_i) w_i) \frac{\partial A(t)}{\partial t} + (-\rho S \sum w_i^2) \frac{\partial^2 A(t)}{\partial t^2} = \\ = \rho S \omega_0^2 W_0 \sum w_i \sin \omega t. \end{aligned} \quad (17)$$

Обозначим выражения при $A(t)$, $\frac{\partial A(t)}{\partial t}$ и $\frac{\partial^2 A(t)}{\partial t^2}$ через коэффициенты a , b , m соответственно, а при $\sin \omega t$ – через F_0 .

Тогда (17) можно представить в виде:

$$aA(t) + \left(-b \frac{\partial A(t)}{\partial t}\right) + \left(-m \frac{\partial^2 A(t)}{\partial t^2}\right) = F_0 \sin \omega t,$$

т.е. в виде уравнения вынужденных колебаний одномассовой системы с одной степенью свободы. Для случая резонанса решение этого уравнения [5] имеет вид $-A(t) = \frac{F_0}{b\omega_0}$. Подставив

сюда значения коэффициентов b , F_0 , получим выражение для масштабного коэффициента:

$$A = \frac{\pi \rho S \omega_0^2 W_0 \sum |w_i|}{\lambda EJ \sum L(w_i) w_i}. \quad (18)$$

Тогда истинное значение перемещения точки (узла) будет: $WIS_i = 1000 A W_i (x)$, мм.

Вывод. Оценка вибропрочности и виброустойчивости нестационарных конструкций РЭС – сложная и важная задача при конструировании ЭС. Ее решение на ранних этапах проектирования возможно с использованием методов и средств математического моделирования.

Модели и создаваемые на их основе программные комплексы по расчету стержневых элементов сами по себе имеют самостоятельное значение, как инструмент анализа конструкций РЭС. Но их можно использовать и как тестовые модели для проверки различных гипотез и теоретических положений при исследовании динамики сложных конструкций РЭС.

Библиографический список:

1. М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.А. Фролов. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.А. Фролова. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с. ил.
2. Кофанов Ю.Н. Информационная технология моделирования механических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств / Ю.Н. Кофанов, Е.С. Новиков, А.С. Шалумов. – М.: Радио и связь, 2000. – 160 с.
3. Морз Ф. Колебания и звук / перевод с англ. под ред. проф. С.Н. Ржевкина. – Гос. изд-во технико-теоретич. литературы. – М.-Л.: 1949. – 497 с.
4. Тартаковский А.М. Краевые задачи в конструировании радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во Сарат. ун-та, 1984. 132 с.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. – М.: Высшая школа, 1962. – 772 с.
6. Личковаха А.С., Шемшур Б.А., Кузнецов С.А. Исследование деформированного состояния и перемещений гибкого стержня с начальной кривизной. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47(1):156-164. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164>
7. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 559 с.
8. Воронин Е.А., Дарина А.Н., Дивеев А.И., Прокопьев И.В., Юрков Н.К. У истоков теории надежности сложных систем // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). С. 3-4.
9. Иванычев Д.А. Метод граничных состояний в задачах механики для анизотропных тонких плит. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(2):18-30. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-18-30>

References:

1. M.F. Tokarev, E.N. Talitsky, V.A. Frolov Ed. V.A. Frolova. Mechanical effects and protection of electronic equipment: Proc. allowance for universities M.: [Radio i svyaz'] Radio and communication, 1984;224. (In Russ)
2. Kofanov Yu.N. Information technology for modeling mechanical processes in the designs of radio-electronic means / Yu.N. Kofanov, E.S. Novikov, A.S. Shalumov. M.: [Radio i svyaz'] Radio and communication, 2000; 160. (In Russ)
3. Morse F. Oscillations and sound / translation from English. ed. prof. S.N. Rzhvekin. State publishing house of technical and theoretical. literature. M.-L.: 1949; 497. (In Russ)
4. Tartakovsky A.M. Boundary value problems in the design of radio electronic equipment. Publishing house Sarat. un-ta, 1984;132. (In Russ)
5. Khaikin S.E. Physical foundations of mechanics. M.: [Vysshaya shkola] Higher School, 1962; 772. (In Russ)
6. Lichkovakha A.S., Shemshura B.A., Kuznetsov S.A. Study of the deformed state and displacement of a flexible rod with initial curvature. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2020; 47(1):156-164. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164> (In Russ)
7. Babakov I.M. Theory of vibrations. M. [Nauka] Science. 1968; 559. (In Russ)
8. Voronin E.A., Darina A.N., Diveev A.I., Prokopiev I.V., Yurkov N.K. At the origins of the theory of reliability of complex systems. [Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem] Reliability and quality of complex systems. 2020; (29): 3-4. (In Russ)
9. Ivanychev D.A. Boundary state method in problems of mechanics for anisotropic thin slabs. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2018; 45(2):18-30. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-18-30> (In Russ)

Сведения об авторах:

Данилова Евгения Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», siori@list.ru

Таньков Георгий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры», g.tankov43@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры», yurkov_nk@mail.ru

Information about authors:

Evgeniya A. Danilova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department «Design and Production of Radio Equipment»

Georgiy V. Tankov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department «Design and Production of Radio Equipment»

Nikolay K. Yurkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head. Department «Design and Production of Radio Equipment»,

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию / Received 09.02.2022г.

Одобрена после рецензирования / Revised 11.03.2022.

Принята в печать / Accepted for publication 12.03.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.3

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-41-48

Обзорная статья/ Review article

**Принципы построения и внедрения интегрированной системы
электронного документооборота**
А.Л. Золкин¹, В.С. Тормозов²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ),
¹443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23, Россия,

¹Медицинский университет «Реавиз»,
¹443010, г. Самара, ул. Чапаевская, 227, Россия,

²Тихоокеанский государственный университет,
²680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является формулирование общих принципов построения и функционирования интегрированной системы электронного документооборота, а также доказательство преимуществ автоматизации документооборота. **Метод.** В основе исследования лежат методы работы с электронными документами, поиска, обработки и хранения информации; методы автоматизации делопроизводственных функций. **Результат.** Определены потенциальные преимущества систем электронного документооборота: совершенствование документационного обеспечения внутриорганизационных и внешних коммуникаций с целью улучшения регулирования и координации операционной деятельности, взаимосогласования и корректировки управленческих решений. Доказана специфика электронных документов, особенно в части юридической силы, действительности, способов хранения, применения открытых форм и стандартов записи для обмена электронными документами. **Вывод.** Широкое применение систем электронного документооборота позволит распространить их функциональное содержание как информационную среду управления, контроля и коллективного взаимодействия. Особую актуальность приобретает юридическое обоснование удостоверения подлинности электронных документов с помощью электронной цифровой подписи или с помощью системы договоров между участниками электронного обмена. Электронные документы имеют физическую и логическую структуру, не совпадают с прежними представлениями о документе.

Ключевые слова: электронный документооборот, системы электронного документооборота, информационно-коммуникационные технологии, отраслевое документоведение, программное обеспечение

Для цитирования: А.Л. Золкин, В.С. Тормозов. Принципы построения и внедрения интегрированной системы электронного документооборота. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 41-48. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-41-48

**Principles for the construction and implementation of an integrated electronic
document management system**

A.L. Zolkin¹, V.S. Tormozov²

¹ Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PGUTI),
¹23 L.Tolstoy Str., Samara 1443010, Russia,

¹Reaviz Medical University,
¹227 Chapaevskaya Str., Samara 1443010, Russia,

²Pacific National University,
136 Tihookeanskaya Str., Khabarovsk 2680035, Russia

Abstract. Objective. Formulate the general principles for the construction and operation of an integrated electronic document management system, as well as list the possibilities of document management automation. **Method.** The article is based on methods of working with electronic documents, methods of searching, processing and storing information, methods of automating various office functions. **Result.** The potential advantages of electronic document management systems are identified, which are the improvement of documentary support for intra-organizational and external communications in order to improve the regulation and coordination of operational activities, mutual agreement and adjustment of management decisions. **Conclusion.** The widespread use of electronic document management systems will make it possible to distribute their functional content as an information environment for management, control and collective interaction. There are specifics of electronic documents, especially in terms of legal force, validity, storage methods, use of open forms and recording standards for the exchange of electronic documents. At the same time, the legal justification for certifying the authenticity of electronic documents using an electronic digital signature or using a system of contracts between participants in an electronic exchange is of great importance. Electronic documents have a physical and logical structure that do not coincide with previous ideas about a document as a rigid, unchanging structure of information and its carrier.

Keywords: electronic document management, electronic document management systems, information and communication technologies, branch document management, software

For citation: A.L. Zolkin, V.S. Tormozov. Principles for the construction and implementation of an integrated electronic document management system. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (1): 41-48. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2022-49-1-41-48

Введение. Современный этап развития общества характеризуется быстрым увеличением объемов информационных ресурсов, что приводит к необходимости рациональной организации информации и обеспечению полноценного и оперативного доступа к ней. В этих условиях документационное обеспечение управления современного предприятия характеризуется активным внедрением новых информационно-коммуникационных технологий, одним из направлений которых является формирование систем электронного документооборота организации, создающих современные условия его обращения, хранения и использования, обеспечивая эффективный и оперативный процесс принятия управленческих решений.

Электронный документооборот является краеугольным камнем электронного управления и имеет значительные преимущества по сравнению с привычным, бумажным документооборотом. Внедрение электронного документооборота обусловлено повышением культуры делопроизводства, ускорением сроков обработки документов, упрощением их поиска и контроля за исполнением, усовершенствованием механизмов обобщения материалов, предоставленных от многих корреспондентов за унифицированными электронными формами, экономией средств на тиражирование и пересылку значительного количества документов и тому подобное.

Электронный документооборот являет собой единый механизм по работе с документами, представленными в электронном виде, с реализацией концепции «бесбумажного делопроизводства» [1, 2]. Особенно это касается работы в системе электронного документооборота, которая, в настоящее время, стала неотъемлемым атрибутом современной успешно развивающейся организации. Это связано с тем, что системы электронного документооборота позволяют систематизировать и оптимизировать потоки информации в организации с использованием всех современных информационных технологий, в том числе и для руководителя, что особенно важно при принятии управленческих решений. Своевременно предоставленная и обработанная информация имеет важную роль в процессе принятия управленческого решения.

Актуальность исследования состоит в том, что в настоящее время внедрение систем электронного документооборота является распространённым явлением в управленческой среде, которая включает как предприятия, так и государственные и муниципальные органы власти. В связи с чем, многие организации постепенно переходят на электронный документооборот, по-

этому необходимо проанализировать теоретические и практические точки зрения относительно внедрения электронного документооборота, обозначить сильные и слабые его стороны.

Постановка задачи. Целью исследования является определение роли системы электронного документооборота в условиях развития современных информационных технологий в целях выявления особенностей, проблем и основных направлений совершенствования такого документооборота [3, с. 33]. Анализ общих теоретических аспектов электронного документооборота, функциональных характеристик, преимуществ и проблем, возникающих от внедрения систем электронного документооборота, посвятили научные труды следующие учёные: С.К. Байдыбекова, В.С. Иритикова, А.А. Линев, А.Б. Пахчанян, Л.В. Полушина, Д.А. Романов, Е.В. Романченко, В.Ф. Янкова [4 -10].

Система электронного документооборота представляет собой взаимосвязанную систему организационного, технического и программного обеспечения для управления различными видами документов и информацией. Такая система позволяет управлять документами на протяжении всего жизненного цикла: от создания до их уничтожения.

Методы исследования. Методологической основой исследования проблемы является системный и комплексный подходы. Для теоретического осмысления аспектов проблемы применялись методы анализа и синтеза (исследование исторического развития системы электронного документооборота, структурно-функциональное обеспечение деятельности), обобщение (уточнение принципов внедрения электронного документооборота), исторический и логический методы (исследование задач и возможности их решения); сравнительно-правовой метод (анализ нормативно-правовой базы по электронному документообороту и порядку его внедрения).

Обсуждение результатов. Система электронного документооборота стала разрабатываться с появлением доступной сети Интернет. Первоначально она предназначалась для частичной автоматизации процессов работы с различной документацией. Как только система электронного документооборота доказала свою эффективность для делопроизводства, она стала внедряться в структуры как государственных, так и частных организаций. С развитием системы электронного документооборота в них стали появляться новые функции, позволяющие максимально автоматизировать любую деятельность предприятия, связанную с разработкой и движением документов [11, с. 15].

В целях надлежащего применения систем электронного документооборота необходимо учитывать следующие требования: возможность хранения всех документов в одном центральном месте с online доступом к нему и минимальным функционалом для отслеживания версий документа [8, с. 47].

Внедрение любой системы электронного документооборота требует законодательного урегулирования. Учитывая изложенное, можно выделить следующие основополагающие нормативные правовые акты Российской Федерации, определяющие нормы и требования к организации информационного взаимодействия между субъектами электронного документооборота: Гражданский кодекс Российской Федерации, Федеральный закон от 06.04.2011 № 63-ФЗ «Об электронной подписи», Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации», Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» [5, с. 7].

Следует отметить, что применение систем электронного документооборота имеет широкое распространение в органах государственной власти, в частности таможенных органах, налоговых органах, МФЦ, а также при регистрации юридических лиц и индивидуальных предпринимателей и предоставляет новые возможности эффективного поиска нужных документов, выполнения исполнительской дисциплины сотрудников, сокращения времени на процедуры согласования документов, разделения прав доступа к документам автоматической маршрутизации наиболее типичных документов (например, счетов на оплату) с использованием, так называемых, бизнес-процессов [16, с. 43].

Кроме того, электронный документооборот в настоящее время является значительной составляющей частью документооборота в судопроизводстве. Каждое решение суда должно быть опубликовано в открытых источниках. Дополнительно все хозяйствующие субъекты, органы государственной власти и частные лица имеют возможность подать иск или жалобу в электронном виде, для чего требуется электронная цифровая подпись, поэтому оформляется электронная подпись не только крупными компаниями, но и даже частными лицами [6, с. 51].

Разработка и внедрение систем электронного документооборота позволяет решить различные проблемы, связанные с низкой эффективностью документооборота. Одной из основных целей является повышение управляемости документооборотом, т.е. благодаря внедрению систем электронного документооборота можно достигнуть некоторых важных задач: прозрачности и управляемости документооборота, централизованной (при необходимости – децентрализованной) работы с документами, в том числе и хранение дел, сохранность документов, многообразию поиска информации, предоставлению информации о документах организации, о специфике их обработки и движении [1, с. 83].

Система электронного документооборота должна формировать контейнеры электронных документов, содержащих контент и метаданные, файлы электронных подписей и визуализированную копию текстового электронного документа в формате PDF/A, и формировать из них электронные дела [17, с. 145]. Кроме того, система электронного документооборота должна обеспечивать возможность поддержки процессов экспертизы ценности документов, включая не только отбор и передачу документов для архивного хранения, но и выделения к уничтожению документов с истекшими сроками хранения [4, с. 68].

Следует отметить, что в любой системе электронного документооборота обязательно должно быть предусмотрено разграничение прав доступа пользователей. Разграничение прав доступа пользователей внутри системы электронного документооборота можно реализовать по-разному [10, с. 105]. Например, использовать подсистему, созданную разработчиком системы электронного документооборота, или применить уже известную подсистему безопасности, хорошо себя зарекомендовавшую на практике, или соединить обе эти подсистемы и адаптировать под конкретную систему электронного документооборота. При этом третье решение более перспективно, так как позволяет компенсировать недостатки разрабатываемых подсистем использованием уже проверенных практикой подсистем безопасности [7, с. 17].

Таким образом, любая система электронного документооборота должна обладать рядом функциональных возможностей, включая: оказание услуг и обработку обращений граждан; организацию делопроизводства на предприятии; обеспечение надёжного электронного архива документов; интеграцию с другими автоматизированными информационными системами; гарантию межкорпоративного юридически защищённого документооборота в организации; контроль исполнения задач; реализацию проектного управления [18, с. 92]. Каждый хозяйствующий субъект предварительно должен изучить слабые и сильные стороны электронного документооборота, чтобы принять верное и актуальное решение [13, с. 52].

К основным аспектам практической организации электронного документооборота целесообразно отнести следующие:

- 1) правовые основания для обмена электронными документами;
- 2) стандарты, инструменты и технологии электронного документооборота, в том числе программные и технические средства, используемые для юридически значимого обмена конфиденциальной информацией и защиты данных от несанкционированного доступа;
- 3) мотивация и доверие пользователей к электронному документу, организация обучения пользователей и технического персонала (администраторов) системы электронного документооборота; пользователь должен быть уверен, что:
 - а) документ, отображаемый на экране компьютера, и электронный документ, который он заверяет (подписывает) с помощью своего ключа электронной цифровой подписи, полностью идентичны;

б) канал передачи электронного документа гарантирует его конфиденциальность [15, с. 11].

В определённой степени это обеспечивается путём:

а) обязательной сертификации компетентными органами программно-технических средств электронного документооборота и процессов их использования на конкретных объектах – организациях, участвующих в электронном документообороте, а также проведением периодического аудита;

б) инфраструктуры поддержки массивов ключей криптозащиты и электронной цифровой подписи (PKI – Private Key Infrastructure), которая является основой системы электронного документооборота;

в) нотариализации электронных документов и «недокументированных» сведений из баз данных;

г) ведения юридически значимых архивов электронных документов и электронной цифровой подписи, что необходимо в связи с периодической сменой ключей электронной цифровой подписи или из-за их компрометации [9, с. 129].

Новые технологии и инструменты систем электронного документооборота в корне меняют роль делопроизводителя – он становится управляющим документами. В зону ответственности такого специалиста входит выявление связей, которые объединяют информационные потоки с основной деятельностью организации [19, с. 34]. В таких условиях документирование не может оставаться самостоятельным, поскольку управляющий документами должен работать в постоянном контакте с руководством организации, бизнес-пользователями, IT-специалистами, сотрудниками служб безопасности, юридическими и другими вспомогательными службами [12, с. 10]. В результате формируется системный подход к работе с документами, который направлен на то, чтобы обеспечить управленцев – специалистов данными, необходимыми для принятия взвешенных решений на основе достоверной, полной и динамически обновляемой информации [14, с. 48].

Эффективное функционирование систем электронного документооборота возможно при очень важном условии, а именно система электронного документооборота должна полностью соответствовать и совмещаться со сложной инфраструктурой организации, предприятия [2, с. 43]. Процесс внедрения электронного документооборота настраивает и поддерживает корпоративную культуру организации. Командный принцип работы по внедрению систем электронного документооборота и развитие благодаря этому горизонтальных связей в организации, приводит к оптимизации взаимодействия сотрудников, повышению сплочённости [20, с. 103].

Рассмотрим табл. 1, представляющей суммарные данные по каждому исполнителю по трем параметрам нотации композитного документооборота – R, A и F. Соответственно, R – суммарные данные по двенадцати месяцам по количеству ролей, в которых принимал участие исполнитель, A – по количеству действий, что было их предпринято в СЭД и F – по количеству форм документов, что было им обработано [21, с. 87]. Удаление вырожденных строк таблицы, то есть таких строк, имеющих нулевые значения по всем трем параметрам – R, A и F. Эти строки соответствуют пользователям, которые вообще не используют систему, или были приняты на работу и уволены в достаточно короткий срок. В табл. 1. насчитывается 84 исполнителя с нулевыми строками, что является 21.5% от общего количества исполнителей. Такой результат является экспериментальным подтверждением тезиса о возможности применения соотношения Парето к задачам электронного документооборота. То есть, эксперимент подтверждает тезис, что 20% исполнителей выполняют 80%

Таблица 1. Статистические данные функционирования системы электронного документооборота за 12 месяцев
Table 1. Statistical data on the functioning of the electronic document management system for 12 months

Пользователь User	R	A	F	Пользователь User	R	A	F
1	0	1	0	51	9	30	35
2	168	3	53	52	1	9	6
...	...	...	...	...	...	...	...
249	19	345	14	299	0	2	0
250	43	1	58	300	0	1	4
				301	406	4	345
				302	11	0	4
				303	3	23	66

Построим количественную оценку эффективности с помощью графической парадигмы количественной оценки системы документооборота (рис.1). Для этого необходимо отложить значения элементов колонки A на абсциссе, значения элементов колонки F на ординате и значения элементов колонки R на аппликате.

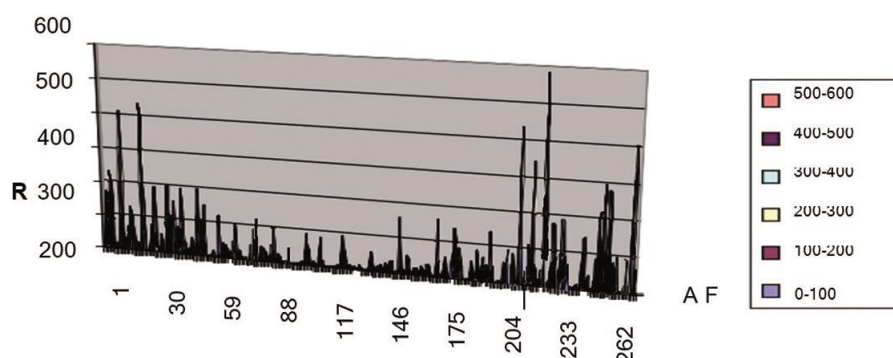


Рис. 1. Статистические данные в графической парадигме количественной оценки эффективности
Fig. 1. Statistical data in the graphic paradigm of performance quantification

Таким образом, путем получения пересечения множеств исполнителей, которые являются эффективными в соответствии с критериями A-F, R-A и R-F, получаем исполнителей, соответствующих комплексному критерию эффективности [21, с. 89]. То есть, эти исполнители выполняют свои действия, обрабатывают свои документы и принимают участие в процессах таким образом, что они соответствуют эффективной работе системы документооборота.

Вывод. Проанализировав роль систем электронного документооборота в условиях развития современных информационных технологий, можно сделать вывод о том, что документооборот имеет важное значение в информационном обеспечении принятия управленческих решений.

Основной современной мировой общей тенденцией в информационном обеспечении является переход от бумажного к электронному документообороту в организации. Необходимость перехода к электронному и смешанному документообороту неизбежна, поскольку для предприятий становится чрезвычайно важной проблема конкурентоспособности, которую можно обеспечивать разнообразными факторами, в частности эффективным ведением документооборота, что приводит к лучшему информационному обеспечению принятия управленческих решений.

Однако если сам переход неизбежен, то переход и выбор формы и средств остается невыясненным вопросом. На это решение влияют как внешние факторы, такие как имеющиеся на

рынке альтернативные информационные системы электронного документооборота, так и внутренние факторы, такие как наличие материальных ресурсов в организации и уровень владения современными информационными технологиями её персонала. Указанные проблемы требуют дальнейшего исследования, а также анализа на каждом конкретном предприятии. Постепенное и планомерное внедрение элементов электронного документооборота, начиная с внутренних документов, проведение учебной работы обязательно будут иметь свои положительные плоды.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 21.04.2020 № 075-02-2020-1529/1.

Acknowledgment. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, supplementary agreement No. 075-02-2020-1529/1 dated April 21, 2020.

Библиографический список:

1. Басаков М. И. Документационное обеспечение управления (с основами архивоведения): Учебное пособие М.: КноРус, 2013. – 215 с.
2. Белая Т. Р. Автоматизированная система документационного обеспечения управления: организация создания АС ДОУ//Делопроизводство. – 2010. – № 3. – С. 40–47.
3. Бикеева М.В., Кислякова А.С. Роль системы электронного документооборота для современного предприятия // Экономические исследования и разработки, 2017. – № 4. – С. 32–41.
4. Досмухамедов Б. Р. Формирование технологии микрокредитования на основе использования системы электронного документооборота: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Досмухамедов Булат Рамильевич. – Астрахань, 2014. – 189 с.
5. Fahrner H., Kirmann S., Gainey M., Schmucker M., Vogel M., Heinemann F. E. Multimodal Document Management in Radiotherapy, an Update //Journal of Radiation Oncology Informatics. – 2019. – Vol. 10. – No 1. – С. 9-19.
6. Иванова Е.В. Автоматизация документооборота на предприятии//Наука и образование в жизни современного общества: вестник науч. конф. по материалам межд. науч.-практ. конф. Тамбов, 2016. Ч.5. № 3–5 (7). С. 51–53.
7. Климов Б. А., Романов Д. Ю. Анализ систем документооборота в проектах по разработке программного обеспечения // Бизнес-информатика. – 2010. – № 2(12). – С. 15–23.
8. Ковалев Е.Е. Системы электронного документооборота: Учебное пособие. Москва: Спутник+, 2013. – 157 с.
9. Кунаев Н. Н., Демускин А.С., Фабричных А.Г. Конфиденциальное делопроизводство и защищенный электронный документооборот: Учебник. М: Логос, 2011. – 452 с.
10. Курченков К. Б. Электронный документооборот. Критерии разработки систем электронного документооборота // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2014. – № 12. – С. 102–106.
11. Линев А. А. Современная СЭД: от работы с документами к управлению эффективностью // Делопроизводство. – 2014. – № 1. – С. 14–19.
12. Лобанов Г. А. Информация как объект гражданского права // Научно-техническая информация. Организация и методика информационной работы. – 1999. – № 6. – С. 8–15.
13. Остелло М. Влияние новой информационной технологии на управленческий процесс. Проблемы теории и практики управления. – 2002. – № 6. – С. 49–56.
14. Полушина Л. В. Внедрение системы электронного документооборота//Современные технологии делопроизводства и документооборота. – 2015. – № 4 (52). – С. 41–59.
15. Романченко Е. В. Теоретические и практические аспекты внедрения систем электронного документооборота в холдингах Российской Федерации: автореф. дис. ... канд. историч. наук: 05.25.02 / Романченко Елена Валерьевна. – Москва, 2013. – 24 с.
16. Тормозов В. С., Золкин А. Л., Василенко К. А. Структурная оптимизация перцептрона с помощью аппарата эволюционного моделирования для задачи прогнозирования значений временных рядов //Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – №. 8. – С. 40-45.
17. Столярова В.Н., Зайцева Е.В. Системы электронного документооборота (СЭД) в обеспечении управленческой деятельности. // Региональное развитие: стратегии и человеческий капитал: материалы Международной научно-практической конференции [г. Екатеринбург, 10-11 апреля 2014 г.: в 2-х т.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 142-150.
18. Тарануха С. Н. Информационные системы в экономике. Современные системы электронного документооборота: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций, 2011. – 168 с.
19. Чернов В. Н. Системы электронного документооборота: Учебник. – М: РАГС, 2009. – 84 с.
20. Хашева И. А. Практика использования информационно-коммуникационных технологий при оказании государственных услуг// Государственное и муниципальное управление. Ученые записки СКАГС. – 2009. – № 4. – С. 99–108.
21. Круковский М. Ю. Практический расчет эффективности системы электронного документооборота//Системы поддержки принятия решений. СППР. – 2006. – Т. 2006. – №. 2. – С. 86-89.

References:

1. Basakov M. I. Documentary support of management (with the basics of archiving): Textbook M.: KnoRus, 2013; 215 (In Russ)
2. Belaya T. R. Automated system of documentation support for management: organization of the creation of an AS DOW [Deloproizvodstvo] Office work. 2010; 3: 40–47. (In Russ)
3. Bikeeva M.V., Kislyakova A.S. The role of an electronic document management system for a modern enterprise. [Ekonomicheskiye issledovaniya i razrabotki] Economic Research and Development, 2017; 4: 32–41. (In Russ)

4. Dosmukhamedov B.R. Formation of microcredit technology based on the use of an electronic document management system: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.13.10 / Dosmukhamedov Bulat Ramilevich. Astrakhan, 2014; 189. (In Russ)
5. Fahrner H., Kirmann S., Gainey M., Schmucker M., Vogel M., Heinemann F. E. Multimodal Document Management in Radiotherapy, an Update. *Journal of Radiation Oncology Informatics*. 2019; 10(1): 9-19.
6. Ivanova E. V. Automation of workflow at the enterprise // Science and education in the life of modern society: scientific bulletin. conf. according to the materials of the International scientific-practical. conf. Tambov, 2016; 5(3-5 (7): 51-53. (In Russ)
7. Klimov B.A., Romanov D.Yu. Analysis of document management systems in software development projects.[Biznes-informatika] *Business Informatics*. 2010; 2 (12): 15-23. (In Russ)
8. Kovalev E.E. Electronic Document Management Systems: Textbook. Moscow: Sputnik +, 2013; 157. (In Russ)
9. N. N. Kunyayev, A. S. Demushkin, and A. G. Fabrichnov, Russ. Confidential office work and secure electronic document management: Textbook. M: Logos, 2011; 452. (In Russ)
10. Kurchenkov K. B. Electronic document management. Criteria for the development of electronic document management systems. [Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy] *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2014; 12: 102-106. (In Russ)
11. Linev A. A. Modern EDMS: from working with documents to performance management [Deloproizvodstvo] *Office work*. 2014;1:14-19. (In Russ)
12. Lobanov G. A. Information as an object of civil law. [Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Organizatsiya i metodika informatsionnoy raboty] *Scientific and technical information. Organization and methodology of information work*. 1999; 6: 8-15. (In Russ)
13. Ostello M. Influence of new information technology on the management process. [Problemy teorii i praktiki upravleniya] *Problems of theory and practice of management*. 2002; 6:49-56. (In Russ)
14. Polushina L.V. Implementation of an electronic document management system. [Sovremennyye tekhnologii deloproizvodstva i dokumentooborota] *Modern technologies of office work and document circulation*. 2015; 4 (52): 41-59. (In Russ)
15. Romanchenko E. V. Theoretical and practical aspects of the implementation of electronic document management systems in holdings of the Russian Federation: author. dis. ... cand. historical Sciences: 05.25.02 / Romanchenko Elena Valerevna. Moscow, 2013;24. (In Russ)
16. Tormozov V. S., Zolkin A. L., Vasilenko K. A. Structural optimization of the perceptron using the evolutionary modeling apparatus for the problem of predicting the values of time series. *Industrial ACS and controllers*. 2020; 8: 40-45. (In Russ)
17. Stolyarova V.N., Zaitseva E.V. Electronic document management systems (EDMS) in providing management activities//Regional development: strategies and human capital: materials of the International scientific and practical conference [g. Yekaterinburg, April 10-11, 2014: in 2 volumes]. *Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta*, 2014;1.: 142-150. (In Russ)
18. Taranukha S. N. Information systems in the economy. Modern systems of electronic document management: Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State. University of Water Communications, 2011; 168. (In Russ)
19. Chernov VN Electronic document management systems: Textbook. M: RAGS, 2009; 84. (In Russ)
20. Khasheva I. A. The practice of using information and communication technologies in the provision of public services. [Gosudarstvennoye i munitsipal'noye upravleniye. Uchenyye zapiski SKAGS] *State and municipal management. Scientific notes of SKAGS*. 2009; 4: 99-108. (In Russ)
21. Krukovsky M. Yu. Practical calculation of the efficiency of the electronic document management system. [Sistemy podderzhki priyatiya resheniy. SPPIR] *Decision support systems. DSS*. 2006; 2: 86-89. (In Russ)

Сведения об авторах:

Золкин Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатики и вычислительной техники»; zolkin@samgups.ru

Тормозов Владимир Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»; 007465@pnu.edu.ru

Information about the authors:

Alexander L. Zolkin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department "Informatics and Computer Engineering, zolkin@samgups.ru

Vladimir S.Tormozov, Senior Lecturer, Department "Software for Computers and Automated Systems"; 007465@pnu.edu.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 03.02.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 24.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 25.02.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 001.57

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58

Оригинальная статья/Original Paper

Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами
кривых в программном комплексе электродинамического моделирования

С.А. Ибрагимов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является построение и оптимизация компьютерной модели антенны с помощью программных комплексов электродинамического моделирования. **Метод.** Исследование основано на методах динамического моделирования. **Результат.** В работе получены зависимости ширины диаграммы направленности от кривой антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. Построены графики зависимости радиусов кривых лепестков и величин раскрыва от ширины диаграммы направленности в двух плоскостях для частот 3 и 24 ГГц. Построены графики зависимости радиуса кривой, раскрыва антенны и нижней высоты антенны от максимального значения ширины диаграммы направленности для частоты 24 ГГц и минимального значения ширины диаграммы направленности для частоты 3 ГГц. Проведена аппроксимация полученных зависимостей для двух плоскостей $\theta = 90^\circ$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны). Путем регрессионного анализа получены аналитические описания и графики зависимостей максимальной ширины диаграммы направленности для 24 ГГц и минимальной ширины диаграммы направленности для 3 ГГц, от радиусов кривых, раскрыва и высоты расположения нижней кривой лепестка антенны. **Вывод.** Полученная математическая модель дает возможность получить значения радиуса кривой, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны для различных частот, в итоге, построить антенну Вивальди с нужной топологией.

Ключевые слова: антенна Вивальди, радиус кривой, лепесток, аппроксимация, математическая модель, уравнение, диаграмма направленности

Для цитирования: С.А. Ибрагимов. Исследование зависимостей антенны Вивальди с двумя радиусами кривых в программном комплексе электродинамического моделирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 49-58. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-49-58

Investigation of the dependences of the Vivaldi antenna with two curve radii in the electrodynamic modeling software package

S.A. Ibragimov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to build and optimize a computer model of the antenna using software packages for electrodynamic modeling. **Method.** The study is based on dynamic modeling methods. **Result.** In this paper, the dependences of the width of the radiation pattern on the curved Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals are obtained. Graphs of the dependence of the radii of curved petals and aperture values on the width of the radiation pattern in two planes for frequencies of 3 and 24 GHz are plotted. Curve radius, antenna aperture and lower antenna height are plotted as functions of the maximum beamwidth for 24 GHz and the minimum beamwidth for 3 GHz. The obtained dependencies were approximated for two planes $\theta = 90^\circ$ (antenna aperture plane) and $\varphi = 0^\circ$ (plane perpendicular to the antenna aperture plane). By means of regression analysis

sis, analytical descriptions and graphs of dependences of the maximum beamwidth for 24 GHz and the minimum beamwidth for 3 GHz, on the radii of the curves, aperture and the height of the lower curve of the antenna lobe were obtained. **Conclusion.** The resulting mathematical model makes it possible to obtain the values of the radius of the curve, the opening and the lower height of the antenna lobes for different frequencies, as a result, to build a Vivaldi antenna with the desired topology.

Keywords: Vivaldi antenna, curvature, petal, approximation, mathematical model, equation, radiation pattern

For citation: S.A. Ibragimov. Investigation of the dependences of the Vivaldi antenna with two curve radii in the electrodynamic modeling software package. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (1): 49-58. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-1-49-58

Введение. В настоящее время антенны с расширяющейся щелью (антенны Вивальди) широко используются в различных устройствах, в таких как станция помех, устройствах радиоразведки, медицинской технике и т.д. Ее популярность вызвана наличием преимуществ относительно других антенн, основными из которых являются: широкий диапазон рабочих частот, несложная конструкция, простые требования к изготовлению, высокий коэффициент усиления [1].

Несмотря на все вышеперечисленные преимущества, у такой антенны так же имеются и недостатки. Самым основным из них является отсутствие как таковой методики расчета. Есть множество работ, которые в определенной степени затрагивают данную проблему, но в них отсутствует конкретика и итоговое решение данной проблемы [3-5, 7-13]. На данный момент параметры подобных антенн подбираются эмпирически с помощью программных комплексов электродинамического моделирования таких, как CST Microwave Studio и HFSS Microwave Office [2].

Постановка задачи. Для исследования топологии антенны Вивальди необходимо построить и оптимизировать компьютерную модель антенны с помощью программных комплексов электродинамического моделирования. По результатам моделирования антенны необходимо определить влияния параметров антенны на ширину ее диаграммы направленности, а также определить в каком диапазоне частот коэффициент стоячей волны (КСВ) не превышает значения 2. Для этих целей необходимо провести сбор статистического материала. Полученные данные необходимо проанализировать, выявить и формализовать зависимости.

Методы исследования. Для описания кривых лепестков антенны Вивальди воспользуемся уравнением [6]:

$$\begin{cases} x = x_1 + k(x_2 - x_1); \\ y = \left(\frac{e^{R(x_1 + k(x_2 - x_1))} (y_2 - y_1) + y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

где: R – радиус кривой лепестков антенны;

y_1 – перекрытие лепестков антенны относительно оси абсцисс;

y_2 – раскрыв антенны, определяемый расстоянием от середины верхней части антенны до самого лепестка;

x – переменная, изменяемая в пределах от 0 до x_2 , определяющую функцию y , задающую изменение кривой лепестка от перекрытия до раскрыва антенны;

x_1 – переменная, задающая нижнюю точку начала лепестка;

x_2 – высота лепестка и высота всей антенны;

k – коэффициент.

Антенна реализована в виде компьютерной модели полоска в программной среде CST MicroWave Studio, с толщиной диэлектрического материала (тефлона) равной 0,5 мм, на которую нанесен проводящий слой в виде лепестков с экспоненциально зависимыми кривыми.

Зададимся перекрытием лепестков $y_1 = 0,6$ мм и будем считать, что нижняя точка начала лепестка находится в нижней части полоска, что соответствует значению $x_1 = 0$.

С учетом того, что каждый лепесток описывается двумя кривыми и подставив исходные значения в уравнение (1), определяющее топологию лепестка y , получим:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right),$$

$$y^* = \left(\frac{e^{R^*x^*} (y_2^* - 0,6) + 0,6e^{R^*x_2^*} - y_2^*}{e^{R^*x_2^*} - 1} \right) \quad (2)$$

На рис. 1 приведена оптимизированная по КСВ не превышающего значения 2 в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, компьютерная модель антенны Вивальди со следующими параметрами $x_2 = 120$ мм; $y_2 = 20$ мм; $R = 0,08$; $x_2^* = 50$; $R^* = 0,05$. Следует отметить, что оба лепестка антенны симметричны друг другу относительно оси абсцисс.

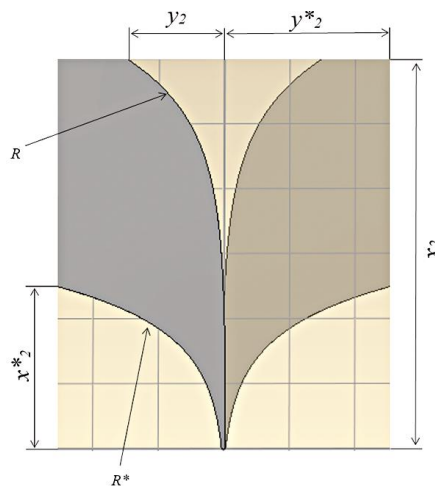


Рис. 1. Компьютерная модель антенны Вивальди
Fig. 1. Computer model of the Vivaldi antenna

При динамическом моделировании компьютерной модели антенны Вивальди было установлено, что диаграмма направленности антенны зависит от радиусов кривых лепестков R и R^* , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x_2^* антенны.

Для выявления зависимостей был произведен сбор данных зависимости ширины диаграммы направленности от радиусов кривых лепестков антенны, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны в двух плоскостях $\theta = 90^\circ$ (плоскость раскрыва антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости раскрыва антенны), в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, при этом значения y_2 менялись в диапазоне от 10 до 50 мм, значения R от 0,01 до 0,16, значения R^* от 0,02 до 0,07 и значения x_2^* от 10 до 60 мм, при этих значениях КСВ не превышало 2.

Собранные данные были сгруппированы в таблицы, где по строкам были указаны данные нижней высоты и раскрыва антенны, а по столбцам значения радиусов кривых лепестков антенны, в ячейках соответствующие значения ширины диаграммы направленности. В результате анализа полученных зависимостей было замечено, что зависимость ширины диаграммы направленности от радиуса кривой R^* незначительная, в связи с чем было решено пренебречь этим показателем при построении итоговых графиков.

На рис. 2 представлены графики зависимостей в двух плоскостях для частоты $F = 3$ ГГц. Для возможности отображения плоскостей в одной системе координат к каждому следующему слою, к исходному значению ширины диаграммы направленности прибавлялось значение 200.

Каждому слою на рис. 2 соответствует определенное значение раскрыва y_2 антенны. В каждом слое есть максимальные и минимальные значения ширины диаграммы направленности,

так для рис. 2а при $y_2 = 10$ мм ширина диаграммы меняется в диапазоне от 62,1 до 132,4 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 64,8 до 196,3 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 66,6 до 184,3 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 67,6 до 180,8 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 68,2 до 174,4 градусов, для рис. 2б при $y_2 = 10$ мм – от 49,2 до 133,0 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 45,4 до 126,9 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 43,6 до 120,8 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 41,8 до 114,7 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 40,4 до 111,0 градусов.

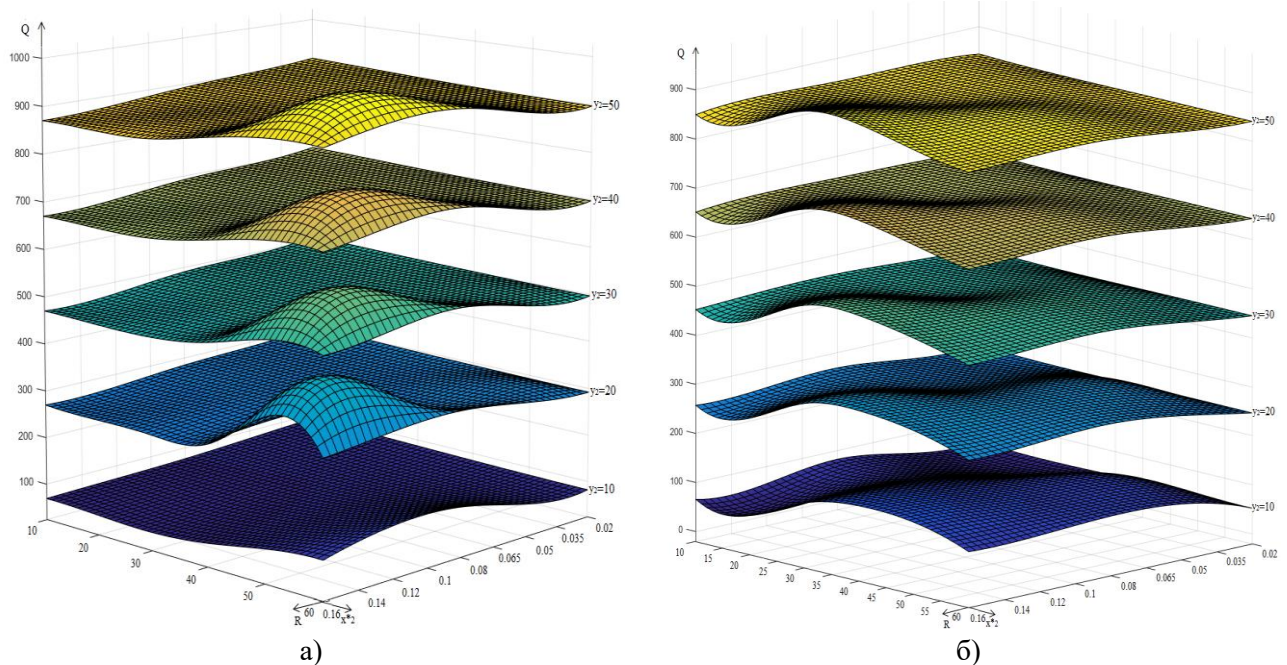


Рис. 2. Зависимость ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*2 для частоты $F = 3$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 2. Dependence of the width of the directivity pattern Q on the radius of the curve R , the opening y_2 and the lower height x^*2 for the frequency $F = 3$ GHz, а) in the plane $\varphi = 0^\circ$, б) in the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. 3 представлены графики полученных зависимостей в двух плоскостях для частоты $F = 24$ ГГц. Для возможности отображения плоскостей в одной системе координат к каждому следующему слою к исходному значению ширины диаграммы направленности прибавлялось значение: для рис. 3а – 100, для рис. 3б – 40.

На рис. 3, аналогично рис. 2 каждому слою соответствуют максимальные и минимальные значения ширины диаграммы направленности, так для рис. 3а при $y_2 = 10$ мм ширина диаграммы меняется от 22,4 до 56,1 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 19,3 до 55,2 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 16,6 до 52,5 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 17,1 до 55,7 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 18,6 до 57,8 градусов, для рис. 3б при $y_2 = 10$ мм – от 23,1 до 56,2 градусов, $y_2 = 20$ мм – от 16,1 до 89,1 градусов, $y_2 = 30$ мм – от 33,8 до 94,7 градусов, $y_2 = 40$ мм – от 35,2 до 131,1 градусов, $y_2 = 50$ мм – от 38,6 до 76,9 градусов.

В результате обработки данных выделены области наименьших значений ширины диаграммы направленности для частоты $F = 3$ ГГц, так как на данной частоте ширина диаграммы направленности, как правило, принимает большие значения и область наибольших значений ширины диаграммы направленности для частоты $F = 24$ ГГц, по причине того, что на данной частоте ширина диаграммы направленности, как правило, принимает маленькие значения.

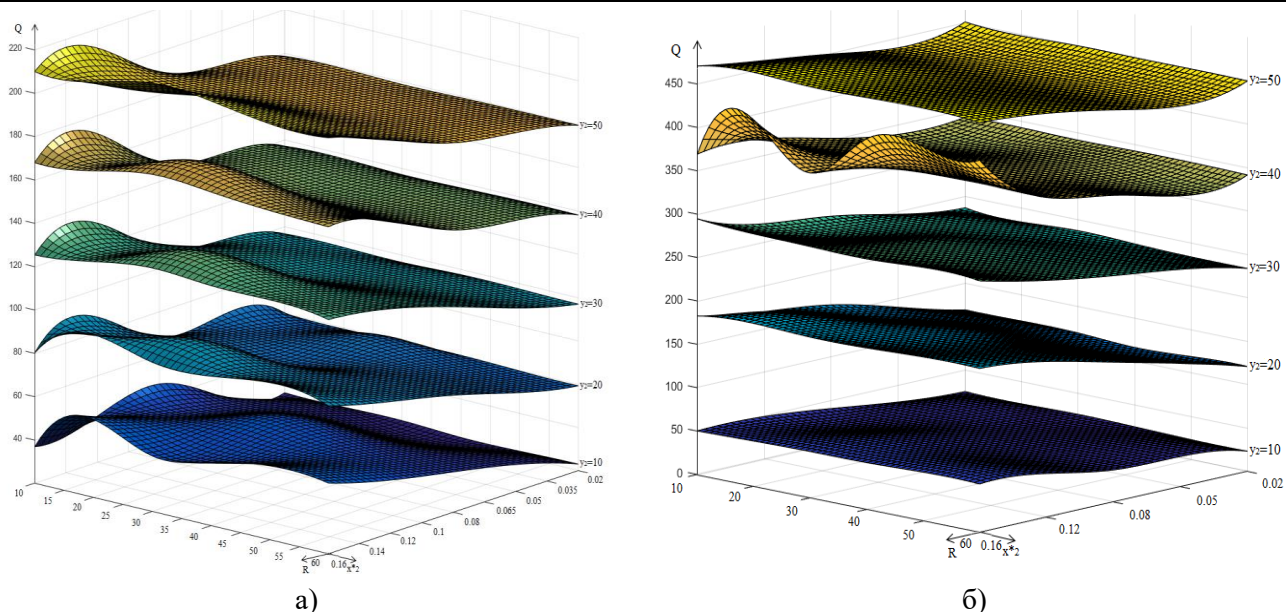


Рис. 3. Плоскости зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*_2 для частоты $F = 24$ ГГц,

а) в плоскости $\phi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 3. Planes of dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*_2 for the frequency $F = 24$ GHz,

а) in the plane $\phi = 0^\circ$, б) in the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. 4 и 5 представлены три ломаные кривые, которые показывают зависимость при наименьших для частоты 3 ГГц и наибольших для частоты 24 ГГц значений ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны x^*_2 , y_2 и R .

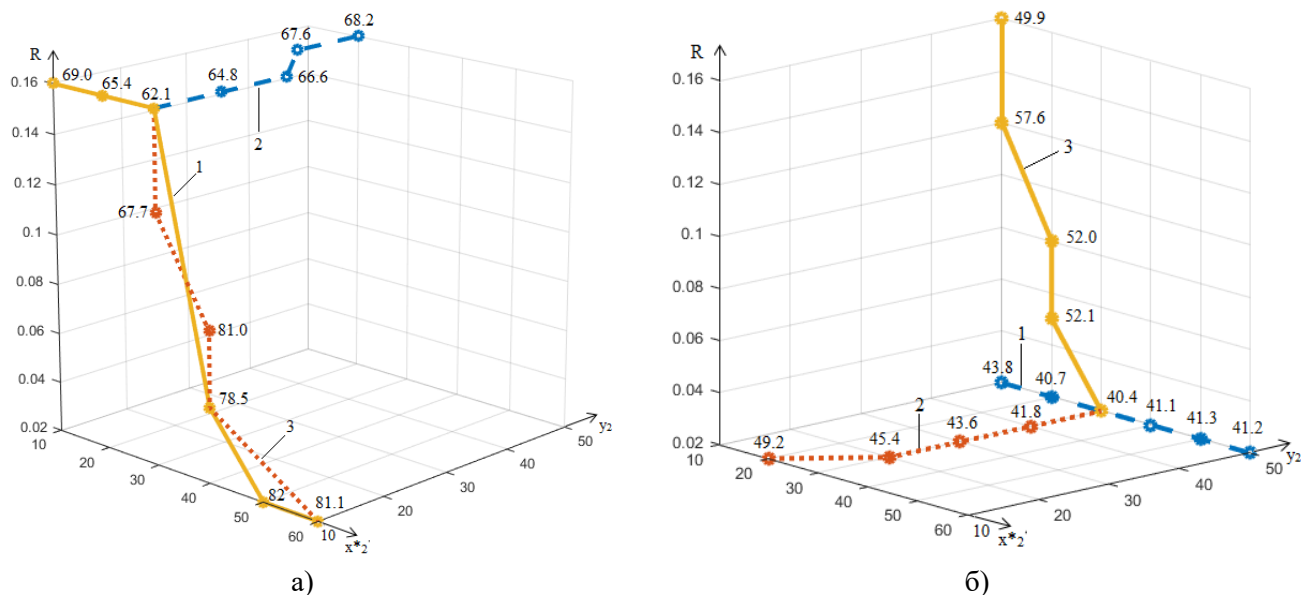


Рис. 4. График зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*_2 при наименьших значениях для частоты $F = 3$ ГГц,

а) в плоскости $\phi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 4. Graph of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*_2 at the lowest values for the frequency $F = 3$ GHz,

а) in the plane $\phi = 0^\circ$, б) in the plane $\theta = 90^\circ$

Траектории 1 соответствует зависимость ширины диаграммы направленности при изменении параметра x^*_2 от 10 до 60 мм с шагом 10 мм, траектории 2 соответствует зависимость ширины диаграммы направленности при изменении параметра y_2 от 10 до 50 мм с шагом 10 мм

и траектории 3 соответствует зависимость при изменении параметра R от 0,02 до 0,16 с шагом 0,04, при этом значения двух оставшихся параметров принимали значения соответствующие наименьшим при $F=3$ ГГц или наибольшим при $F=24$ ГГц значениям ширины диаграммы направленности.

На рис. 4 представлены три траектории движения в области наименьших значений, проведенный сравнительный анализ траекторий показал, что наиболее оптимальной из них является для рис. 4а траектория 2 от 62,1 до 68,2 градусов, а для рис. 4б траектория 1 от 43,8 до 41,2 градусов. Выбор обусловлен тем что при этих траекториях ширина диаграммы направленности для частоты $F=3$ ГГц остается в области наименьших значений. Необходимо отметить, что при обеих траекториях R принимает постоянные значения.

На рис. 5 так же три траектории движения области наибольших значений, проведенный сравнительный анализ так же показал, что самой оптимальной траекторией для рис. 5а будет траектория 2 от 57,8 до 56,1 градусов, а для рис. 5б траектория 1 от 94,7 до 129,1 градусов. Выбор обусловлен тем что при этих траекториях ширина диаграммы направленности для частоты $F=24$ ГГц остается в области наибольших значений. Необходимо отметить, что при обеих траекториях R как и в первом случае принимает постоянные значения.

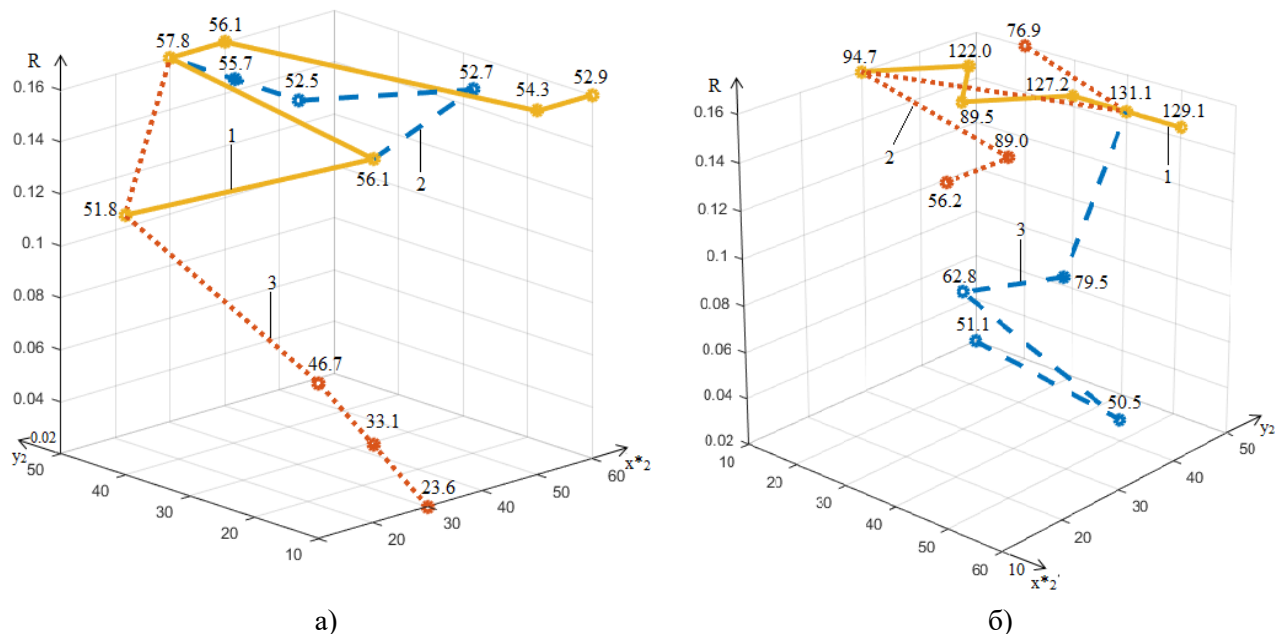


Рис. 5. График зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой R , раскрыва y_2 и нижней высоты x^*2 при наибольших значениях для частоты $F=24$ ГГц, а) в плоскости $\varphi = 0^\circ$, б) в плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 5. Graph of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve R , aperture y_2 and lower height x^*2 at the highest values for the frequency $F = 24$ GHz, a) in the plane $\varphi = 0^\circ$, b) in the plane $\theta = 90^\circ$

В результате анализа собранных данных были получены значения зависимостей ширины диаграммы направленности от радиуса кривой лепестка R , ее раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*2 для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$ и для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Полученные выборки были аппроксимированы соответствующими кривыми. При аппроксимации коэффициент детерминации превышал значение 0,97.

На рис. 6 для плоскости $\varphi = 0$ и рис. 7 для плоскости $\theta = 90^\circ$, представлены кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R (рис. 6а и рис. 7а), раскрыва y_2 (рис. 6б и рис. 7б) и нижней высоты лепестков x^*2 (рис. 6в и рис. 7в) для частот 3 и 24 ГГц. На рис. 6 и 7, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 24 ГГц.

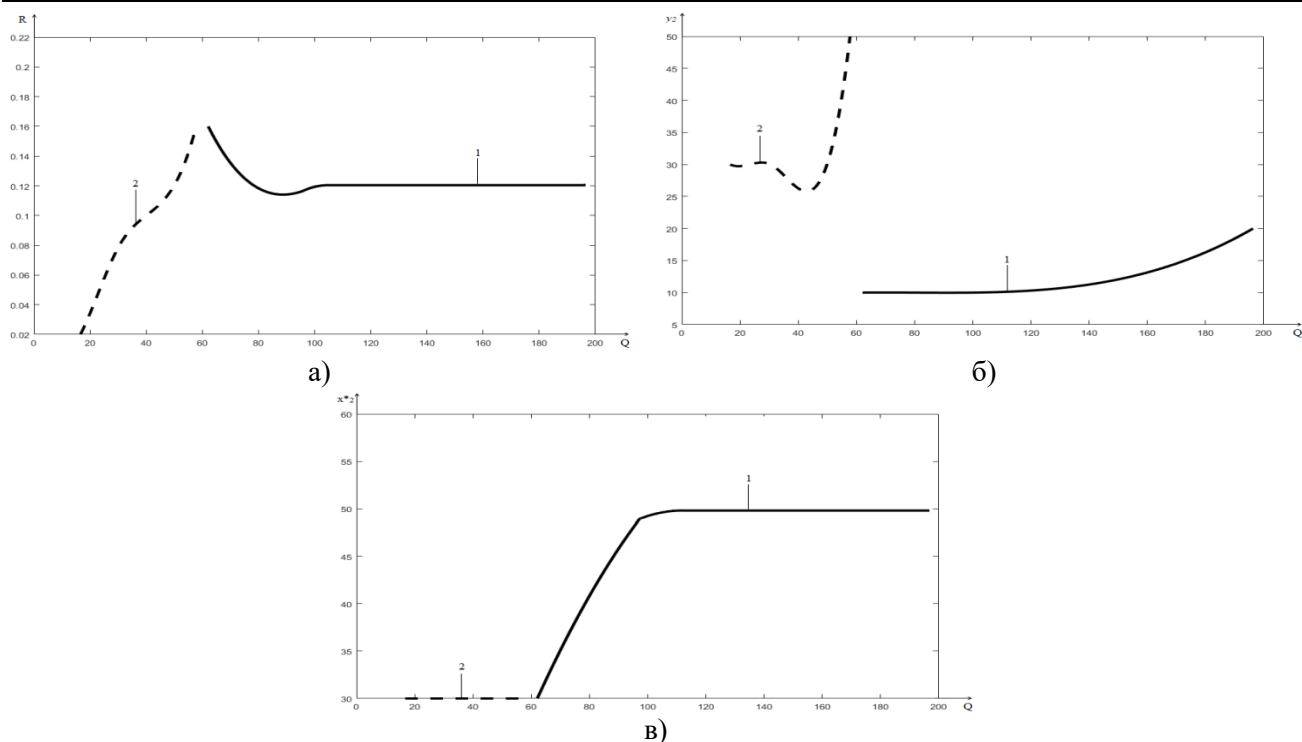


Рис. 6. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 для плоскости $\varphi = 0$

Fig. 6. Curves of the dependence of the width of the directivity pattern Q on the radius of the lobe curve R , aperture y_2 and the lower height of the petals x^*_2 for the plane $\varphi = 0$

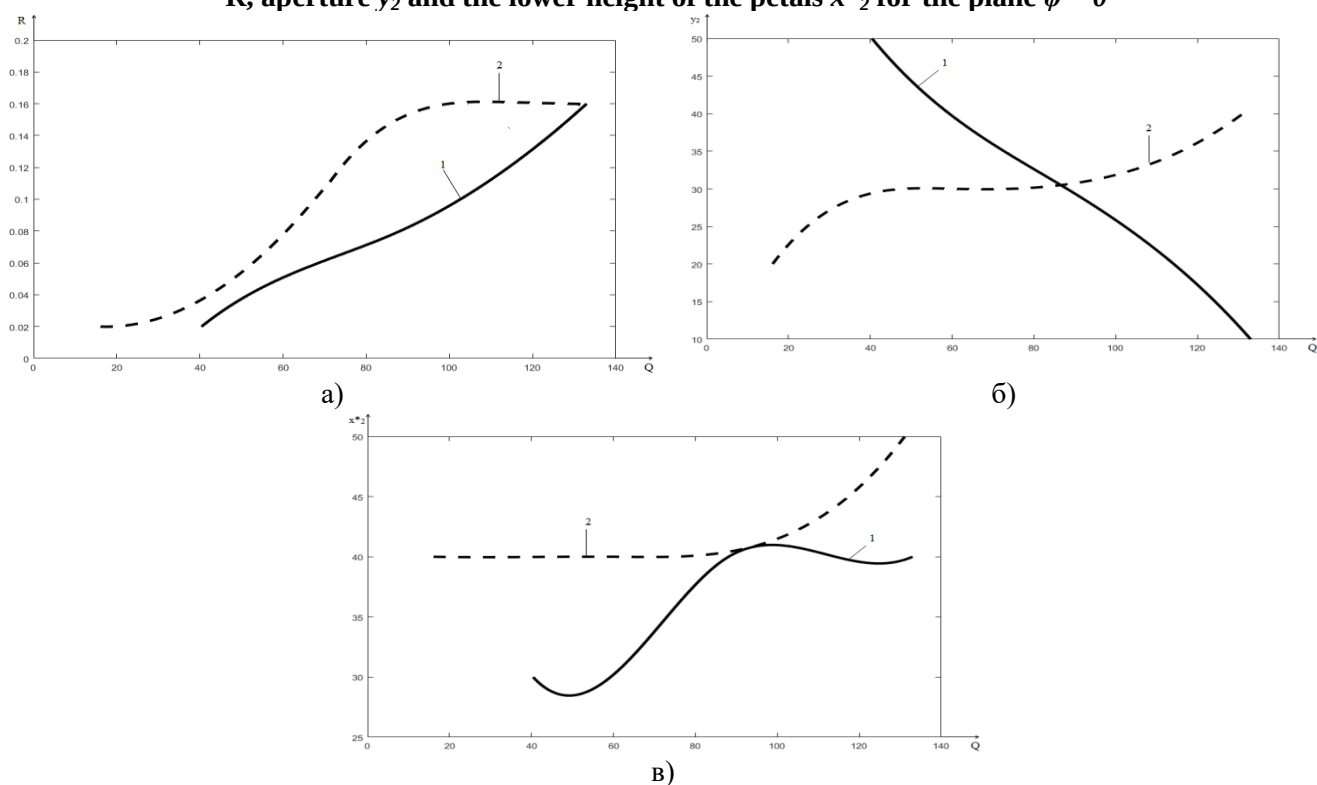


Рис.7. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от радиуса кривой лепестка R , раскрыва y_2 и нижней высоты лепестков x^*_2 для плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig.7. Curves of the dependence of the width of the radiation pattern Q on the radius of the curve of the lobe R , opening y_2 and the lower height of the lobe x^*_2 for the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. представлены графики зависимостей только для частот 3 и 24 ГГц. Из рис. 6 и 7 видно, что на одних графиках для обеих частот зависимость ширины диаграммы направленно-

сти от одного из параметров топологии антенны прямая, а на других для одной частоты прямая, а для другой обратная, данный вопрос более подробно рассматривается в статьях [14, 15].

Полученные кривые описываются соответствующими уравнениями, коэффициенты в которых подобраны с помощью программы MATLAB и приведены в табл.1.

Таблица 1. Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q

Table 1. Equations for the dependence of the controlled parameter on the width of the radiation pattern Q

Частота, ГГц/ Frequency, GHz	Плоскость/ Plane	Регулируемый параметр/ Adjustable parameter	Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q/ Equations for the de- pendence of the controlled parameter on beamwidth Q
3	$\theta = 90^\circ$	R	$-0.18 * \cos(0.01 * Q + 0.1) + 0.18$
		y_2	$38.8 * \cos(0.02 * Q + 3) - 1.1 * Q + 125.1$
		x^*_2	$2 / (0.2 + e^{-0.737 * Q + 52.7}) + 30$
	$\varphi = 0^\circ$	R	$8.92 / (0.22 + e^{0.2 * Q - 7}) + 0.12$
		y_2	$167 * e^{0.09 * Q - 22.36} + 10$
		x^*_2	$12.19 / (0.44 + e^{-0.1 * Q + 6.5}) + 23.34$
24	$\theta = 90^\circ$	R	$-0.08 * \cos(0.035 * Q - 0.79) + 0.098$
		y_2	$-47.1 * \cos(0.02 * Q - 10) + e^{0.014 * Q + 2.79} - 46.29$
		x^*_2	$e^{0.23 * Q - 28.41} + 40$
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{0.004 * Q - 0.46} + 0.01 * \cos(0.2 * Q) - 0.64$
		y_2	$e^{1.44 * Q - 80.48} + 30$
		x^*_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30/ takes a constant value over the entire Q range and is 30

Обсуждение результатов. В результате получены графики, демонстрирующие основные зависимости ширины диаграммы направленности антенны Вивальди от ее параметров топологии в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц в двух плоскостях.

По полученным результатам, можно наблюдать некоторые скачкообразные отклонения одной плоскости графика от другой, так из рис. 2а видно, что в слое $y_2=10$ мм распределение значений ширины диаграммы направленности равномерное, но в слое $y_2=20$ мм появляется резкий скачок при больших значениях параметров x^*_2 и R, который в дальнейшем уменьшается. Это связано с тем, что при этих значениях параметров топологии на частоте $F=3$ ГГц происходит объединение боковых лепестков с основным, за счет чего резко меняется значение ширины диаграммы направленности.

На рис.2б аномалий не наблюдается, как и на рис.3а. На рис. 3б при $y_2=40$ мм наблюдается скачкообразное изменение значений ширины диаграммы направленности, чего не наблюдается в остальных плоскостях. Для понимания этих изменений необходимо провести дополнительные исследования в окрестностях данного слоя для значений $y_2=35$ и $y_2=45$ мм.

При анализе областей наименьших и наибольших значений ширины диаграммы направленности следует отметить, что в плоскости $\varphi = 0^\circ$ наибольшее влияние оказывает параметр y_2 , а в плоскости $\theta = 90^\circ$ наибольшее влияние оказывает параметр x^*_2 при этом параметр R принимал постоянные значения на всей траектории, как в области наименьших значений, так и в области наибольших значений, что можно наблюдать на рис. 4 и 5.

Из представленных на рис. 6 и 7 кривых зависимостей ширины диаграммы направленности и уравнений из табл.1 видно, что экспоненциальная зависимость ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны сохраняется за исключением некоторых случаев, когда параметр принимает постоянное значение на одной из частот (рис. 6в), но так же наблюдается случай, когда зависимость из прямой на частоте 3 ГГц переходит в обратную на частоте 24 ГГц, как видно из рис.7б, этот вопрос подробно раскрыт в предыдущих статьях [14, 15].

Следует отметить, что параметр топологии, отвечающий за изменение радиуса кривой лепестка антенны Вивальди R^* , можно выбирать произвольно в диапазоне от $-0,02$ до $0,07$.

Вывод. В результате получена общая графическая зависимость распределения значений ширины диаграммы направленности для различных параметров R , y_2 и x^*_2 .

Среди всего перечня данных выделена область наименьших значений ширины диаграммы направленности для частоты 3 ГГц и область наибольших значений ширины диаграммы направленности для частоты 24 ГГц.

Исследован переход от низких значений ширины диаграммы направленности к высоким и продемонстрирован один из возможных путей перехода для частот 3 и 24 ГГц.

Получены уравнения описывающие кривые зависимости ширины диаграммы направленности от параметров топологии антенны Вивальди. При проверке модели на адекватность средняя относительная погрешность не превышала 3%.

Полученная математическая модель дает возможность, подставляя в уравнения необходимое значение ширины диаграммы направленности Q , получить значения радиуса кривой, раскрыва и нижней высоты лепестков антенны для различных частот. В итоге подставив эти значения в уравнение (2) можно построить антенну Вивальди с нужной топологией.

Библиографический список:

1. C. Fairclough. Анализ конструкции антенны Вивальди [Электронный ресурс]. 2015 г. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Дата обращения 11.04.2018.
2. TSA, или антенна Вивальди [Электронный ресурс]. 2014 г. Режим доступа: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Дата обращения 13.04.2018.
3. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
4. Чернышев С.Л., Виленский А.Р., Сю С., Люй С., Лю Ю. Разработка и исследование модифицированной антенны Вивальди в составе плоской широкополосной антенной решётки X-диапазона [Электронный ресурс]. 2011 г. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Дата обращения 03.04.2018.
5. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2014. № 5. С. 139-154. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>
6. T. G. Aslanov and A. N. Zhukov, "Choice of geometry of directional lobes of Vivaldi, depending on the base width of the radiation pattern and a frequency band," 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odessa, 2013, pp. 352-354, doi: 10.1109/ICATT.2013.6650775.
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, "Complete dispersion analysis of vivaldi antenna for ultra wideband applications" Progress In Electromagnetics Research, PIER 77, 85–96, 2007.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, "Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology" Progress In Electromagnetics Research, PIER 90, 369–384, 2009.
9. E. Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna", IEE Proc., Vol.135, Pt.H, No.2, pp. 89-92, 1988
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" Front. Electr. Electron. Eng. China, 3(2): 136–144, 2008. DOI: 10.1007/s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, "A Novel Low RCS Design Method for X-Band Vivaldi Antenna" Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155/2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," Antennas and Propagation Society International Symposium, Volume 3, June 2004, pp. 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman "Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software" Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
14. Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А. Исследование топологии антенны вивальди с зеркальным расположением лепестков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(3):76-84. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84>
15. Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А. Исследование топологии антенны Вивальди. Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1. № 4. С. 28-35.

References:

1. C. Fairclough. Analysis of the design of the antenna Vivaldi [Electronic resource]. 2015 Access mode: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Date of circulation 04/11/2018.
2. TSA, or Vivaldi's antenna [Electronic resource]. 2014 г. Access mode: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Date of circulation 04/13/2018.
3. T. G. Aslanov and A. N. Zhukov, "Choice of geometry of directional lobes of Vivaldi, depending on the base width of the radiation pattern and a frequency band," 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odessa, 2013, pp. 352-354, doi: 10.1109/ICATT.2013.6650775.

4. Chernyshev S.L., Vilensky A.R., Syu S., Liu S., Liu Yu. Development and investigation of the modified Vivaldi antenna in the flat broadband X-band antenna array [Electronic resource]. 2011 Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Date of circulation 04/03/2018. (In Russ)
5. Vilensky A.R. A method for analyzing the space-time characteristics of propagation of printed slit antennas of a traveling wave. [Nauka i obrazovaniye] *Science and Education. MSTU them. N.E. Bauman. Electron. Jour.* 2014; 5:139-154. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html> (In Russ)
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, ASTRON Eindhoven University of Technology. 2003; 100.
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, "Comprehensive dispersion analysis of vivaldi antennas for ultra wideband applications". *Progress in Electromagnetics Research, PIER 77*, 2007; 85-96.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, "Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology". *Progress in Electromagnetics Research, PIER 90*, 2009: 369-384.
9. E.Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna", *IEE Proc.*, 1988; 135 (2): 89-92.
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" *Front. Electr. Electron. Eng. China*, 3 (2): 136-144, 2008. DOI: 10.1007 / s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, "A Novel Low RCS DesignMethod for X-Band Vivaldi Antenna" *Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume*, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155 / 2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004; 3(June): 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman "Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software" *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011; July 6 - 8, 2011, London, U.K.*
14. Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Study of the topology of the Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2018;45(3):76-84. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84> (In Russ)
15. Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Investigation of Vivaldi antenna topology. [Nauchnyye issledovaniya: itogi i perspektivy] *Scientific researches: results and prospects.* 2020; 1(4): 28-35. (In Russ)

Сведения об авторе:

Ибрагимов Султансаид Абдуллагаджиевич, аспирант, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; sult_992@mail.ru

Information about the author.

Sultansaid A. Ibragimov, Postgraduate student, Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems; sult_992@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.01.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 14.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 14.02.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.5

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Оригинальная статья / Original Paper

Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами

И.А. Магомедов, М.М. Мирзабеков, Т.Г. Айгунов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является решение задач построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления траекторным движением сложных динамических объектов. **Метод.** Для построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления использована теории нечётких множеств и алгоритмов Л.Заде. **Результат.** Приведён процесс построения логико-лингвистических (нечётких) моделей управления траекторным движением сложных динамических объектов с использованием теории нечётких множеств и нечётких алгоритмов. В качестве объекта управления в работе использован морской подвижный объект (МПО), функционирующий в неопределённой среде. Показано, что логико-лингвистические (нечёткие) модели управления МПО могут быть построены с учётом богатого практического опыта судоводителя, не имеющего специальных знаний, выраженного ими в качественной форме для построения нечётких моделей управления. **Вывод.** Логико-лингвистические модели управления позволяют обеспечивать движение морского подвижного объекта по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях различных внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта. Применение нечётких алгоритмов управления позволяет существенно сократить затраты машинного времени по сравнению с оптимальным поисковым алгоритмом при допустимом ухудшении качества процесса и обеспечить реализацию процесса управления в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: логико-лингвистические модели, нечёткие алгоритмы, теория нечётких множеств, заданная траектория, динамические объекты, неопределённая среда, адаптивные системы, динамические объекты, морской геофизический комплекс (МГК)

Для цитирования: И.А. Магомедов, М.М. Мирзабеков, Т.Г. Айгунов. Проблемы построения логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 59-78. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Problems of constructing logical-linguistic models of complex management dynamic objects

I.A. Magomedov, M.M. Mirzabekov, T.G. Aygunov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to solve the problems of constructing logical-linguistic (fuzzy) models for controlling the trajectory movement of complex dynamic objects. **Method.** To build logical-linguistic (fuzzy) control models, theories of fuzzy sets and algorithms of L. Zadeh were used. **Result.** The process of constructing logical-linguistic (fuzzy) models for controlling the trajectory movement of complex dynamic objects using the theory of fuzzy sets and fuzzy algorithms is given. A marine mobile object (MMO) operating in an uncertain environment was used as a control object in the work. It is shown that logical-linguistic (fuzzy) MPO control models can be built

taking into account the rich practical experience of a navigator who does not have special knowledge, expressed by them in a qualitative form for building fuzzy control models. **Conclusion.** Logical-linguistic control models make it possible to ensure the movement of a marine moving object along a given trajectory with a quality of the controlled process sufficient for practical purposes under conditions of various external disturbances and drift of the parameters of the controlled object. The use of fuzzy control algorithms can significantly reduce the cost of computer time compared to the optimal search algorithm with an acceptable deterioration in the quality of the process and ensure the implementation of the control process in real time.

Keywords: logical-linguistic models, fuzzy algorithms, fuzzy set theory, given trajectory, dynamic objects, uncertain environment, adaptive systems, dynamic objects, marine geophysical complex (MGC)

For citation: I.A. Magomedov, M.M. Mirzabekov, T.G. Aygumov. Problems of constructing logical-linguistic models of complex management dynamic objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 59-78. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-59-78

Введение. Способность человека - оператора технологического процесса принимать правильные решения в обстановке отсутствия полной информации об управляемом процессе вызывает удивление и приводит к размышлению о методах и средствах построения систем, которые опираются на опыте и знаниях специалистов по управлению. Поэтому, работы, посвящённые вопросам построения специализированных компьютерных систем управления неопределённым и/или сложными процессами на основе приближенных (нечётких) рассуждений представляет, сегодня одну из важнейших проблем науки.

Решение проблемы управления сложными динамическими объектами многие исследователи связывают с новым логико-лингвистическим подходом к анализу сложных систем. Опираясь на теорию нечетких множеств (НМ) и алгоритмов (НА), данный подход дает приближенные, но, в то же время, эффективные способы описания поведения систем, настолько сложных и/или плохо определенных, что они практически не поддаются точному математическому анализу [1-4].

В результате использования теории нечетких множеств, обычная задача управления оказывается погруженной в нечеткую среду, а для ее моделирования необходимо привлекать теорию нечетких множеств Л.А.Заде, позволяющую формализовать выраженный в нечеткой словесной форме опыт экспертов путем преобразования соответствующих описаний в нечеткие алгоритмы [5-7].

Способность человека принимать адекватные, сложившиеся в соответствии с обстановкой решения, при неполной и нечеткой информации является предметом изучения интеллектуальных способностей человека, как системы управления сложными технологическими процессами. Поэтому, проблема построения моделей принятия решений в системах управления, опираясь на приближенные рассуждения человека - оператора процесса и их использование в современных цифровых системах управления, представляет сегодня одну из важнейших проблем науки.

Применение нечеткого подхода к задачам управление сложными и/или плохо определёнными процессами в настоящее время является одной из самых результативных областей применения теории нечетких множеств и нечетких алгоритмов.

Такой подход оказывается полезным и в тех случаях, когда технологические процессы являются слишком сложными для анализа с помощью классических (количественных) методов управления, что приводит к сложным вычислительным процедурам, которые практически не поддаются анализу в реальном масштабе времени. В работах многих авторов [7-12, 15-17] показано, что использование нечетких систем управления даёт результаты не хуже чем результаты, получаемые при классических алгоритмах управления с меньшими вычислительными затратами.

Смещение центра исследований нечетких систем в сторону практических приложений привело к постановке целого ряда проблем, таких как: разработка нечетких микроконтроллеров и специализированных процессоров обработки нечеткой информации, а также элементная база их построения; аппаратно-программные средства разработки и отладки; инженерные методы разработки и настройки нечетких систем управления (НСУ); методы и средства проектирования и самообучения и многое другое.

Укажем на некоторые из причин, обусловивших необходимость перехода от классических моделей теории управления сложными динамическими объектами к логико-лингвистическим моделям управления:

1. Между параметрами, оказывающими влияние на процесс управления, не удастся установить точных количественных зависимостей.

2. Процесс управления является многошаговым, и содержание каждого шага не может быть априори однозначно определено.

3. Существующие способы описания объектов и протекающих в них процессов приводят к столь громоздким конструкциям, что их практическое использование встречает значительные вычислительные трудности.

4. Объект эволюционирует во времени, меняется его структура и функции, что приводит к эволюции самого процесса управления.

5. Не все цели управления объектом могут быть выражены в виде количественных соотношений.

Как видно из работ [15-17], морские геофизические комплексы (разновидность МПО) можно отнести к сложным объектам, функционирующим в неопределенной среде. Кроме рассмотренных выше причин перехода от классических моделей управления к логико-лингвистическим моделям можно указать на трудности реализации сложных моделей на бортовых ЭВМ, т.е. ограничения на ресурсы моделирования (временные, стоимостные), которые не позволяют получить решение в реальном масштабе времени. Это, пожалуй, основная причина, которая в данном случае заставила авторов воспользоваться опытом экспертов, который выражается ими в нечеткой словесной форме.

Первая попытка анализа, нечетких систем управления была сделана в [9], где авторы вводят понятие «оператора наблюдения», благодаря которому знание состояния управляемого процесса становится более точным, и определяют понятие «цели управления» G , как нечеткое множество в пространстве состояния X .

Описание процесса заключается в отображении следующего состояния $f: X \times U \rightarrow U$, операторе наблюдения O , таком, что $y = x \circ O$ (« $\circ$ » - знак операции композиции) и отображении управления $g: Y \rightarrow U$. Однако авторы не решили задачу управления для данной системы и цели, а ограничились определениями вида «... цель G достижима, когда имеется отображение управления g , такое, что $y(t) \in G$ для некоторого времени t », или «точная цель может быть достигнута с помощью довольно грубого регулирования и наблюдения при условии, что по мере приближения к цели наблюдения становятся точными; в противном случае невозможно установить, достижима цель или нет».

В [10] устанавливаются математические рамки, в которых можно анализировать нечеткие системы. В ней определяется отображение следующего состояния $f: F(X) \times F(U) \rightarrow F(X)$ и отображение выхода $g: F(X) \rightarrow F(Y)$, где $F(X)$, $F(U)$ и $F(Y)$ являются множествами всех нечетких подмножеств пространства состояния X , пространства входных величин U и пространства выходных величин Y . Здесь также рассматриваются определение достижимости, наблюдаемости, устойчивости и делается вывод: «система является достижимой, если f представляет собой отображение «*на*» наблюдаемой, если g относится к взаимно-однозначным отображениям и устойчивой, если траектория состояния может удерживаться в пределах данной области путем ограничения начального состояния внутри другой области».

Этот теоретический подход анализа нечетких систем управления открывает большие возможности, хотя в работе не приводятся результаты практического применения.

В работе [12] рассмотрен новый подход, основанный на использовании нечетких дискретных соотношений и идей конечных автоматов для анализа нечетких систем, который заключается в следующем. Простое сравнение текущего и желаемого состояний управляемого процесса в данный момент времени заменяется на более общую функцию ошибки, отображающую две нечеткие переменные в переменную нечеткой ошибки.

Формально это выглядит следующим образом: $e: X \times U \rightarrow U$, где X, U - пространства состояния и управления. Сам процесс описывается $p: X \times U \rightarrow X$ и совместно с фикцией $e(.)$ дает полное описание процесса.

Тогда, если пространства управления и состояния сделать дискретными и конечными, то функции $e(.)$ и $p(.)$ могут рассматриваться как **maxmin** композиции [1, 2] конечных дискретных нечетких соотношений R_e и R_p . Используя эти отношения, можно определить такие понятия, как состояния равновесия, стабильности и управляемости.

Несмотря на то, что имеются неполные ответы на некоторые вопросы, ясно, что для более полного использования концепции нечеткости, необходима теория нечетких систем управления. Тем не менее, отсутствие такой теории не является препятствием к успешным применением теории нечетких множеств к решению практических задач управления.

Первые сообщения о применении теории нечетких множеств к управлению динамическими процессами были сделаны в работах [9, 10]. Эти статьи являются очень значительными работами, за которыми последовали публикации исследований, осуществленных на практике другими авторами. Авторы указанных работ занимались управлением небольшого лабораторного парового двигателя. Трудности, связанные с процессом, заключались в том, что он нелинейный, с шумами, сильно связанный и довольно плохо поддается ручному управлению. Тем не менее, было обнаружено, что их алгоритм работал лучше, чем алгоритм хорошо настроенного регулятора с прямым цифровым отсчетом, и, по-видимому, был менее чувствителен к изменениям в условиях работы.

Независимо от этих работ в [10, 11] исследовали работу нечеткого алгоритма управления для экспериментальной станции по нагреву воды. Задача состояла в том, чтобы регулировать температуру воды, выходящей из бака при постоянном расходе, путем изменения расхода горячей воды в теплообменнике, содержащемся в баке. Второй задачей управления являлось обеспечение быстрого регулирования на ступенчатые изменения в заданном значении температуры вытекающей воды.

Основные трудности заключались в том, что процесс является нелинейным и с шумами, а также имеет асимметричные характеристики и чистое временное запаздывание. Работа нечеткого алгоритма, разработанного авторами, сравнивалась с работой оптимального ПИ-регулятора и показала более быстрое реагирование на скачки, устанавливающиеся, примерно, через 0,3 мин. (по сравнению с 0,7 мин. для ПИ-регулятора при изменении заданного значения на 10с).

Улучшенный вариант алгоритма также имел столь же устойчивые рабочие характеристики, что и у ПИ - регулятора. Успех этих работ привёл авторов [11] к попытке осуществить регулирование температуры в экспериментальном химическом реакторе периодического действия. Основными трудностями в управлении являются нелинейный изменяющийся во времени коэффициент усиления и чистое временное запаздывание.

Были достигнуты хорошие результаты (рис. 1), а последующая работа Kickert W.J.M. [12] показала, что нечеткий регулятор работает не хуже оператора - человека. Сложный современный ПИ-регулятора, с которым он сравнивался, работал лучше, но был более чувствителен к изменениям в процессе.

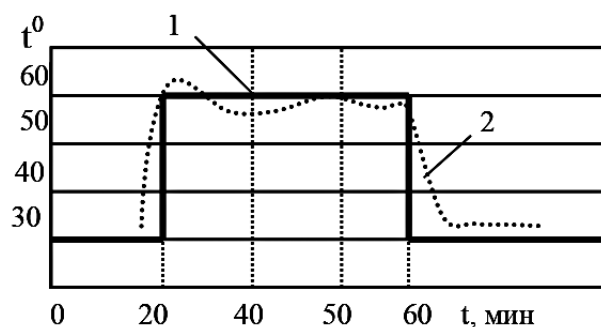


Рис. 1. Результаты моделирования, полученные в [10]:

1 – заданное значение; 2 – текущее значение

Fig. 1. Simulation results obtained in [10]:

1 - set value; 2 - current value

В [8] нечеткий алгоритм используется для управления проницаемостью сырой смеси на конвейере агломашины в промышленном исполнении. Это процесс с одним входом и одним выходом, в котором регулирующей величиной является расход воды, подводимой к установке. Здесь принципиальными трудностями являются нелинейный изменяющийся во времени коэффициент усиления и чистое временное запаздывание, а также наличие шумов.

Результаты показывают (рис. 2), что нечеткий алгоритм работает лучше, чем оператор процесса - человек, уменьшая стандартное отклонение проницаемости более чем на 40, и так же хорошо, как обычный ПИ-регулятор, но менее чувствителен к изменениям параметров процесса.

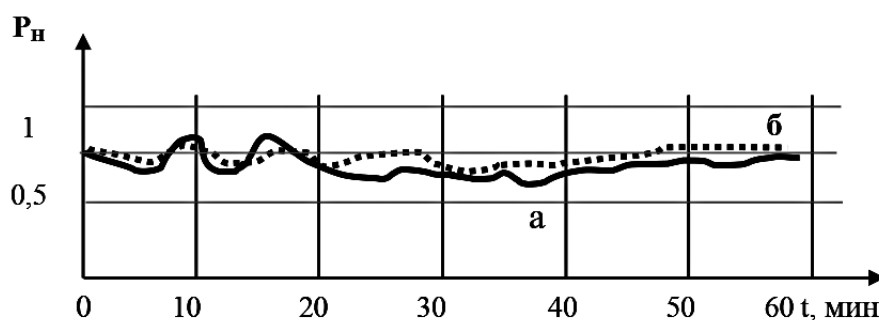


Рис. 2. Результаты, полученные в [8]:

а) - ручное управление, б) - нечёткое управление

Fig. 2. Results obtained in [8]:

a) - manual control, b) - fuzzy control

В работах [15-17, 21] рассматриваются вопросы построения нечетких систем автоматического управления траекторным движением морских геофизических комплексов (МГК). Проведенный в указанных работах анализ современных геолого-геофизических методов и технических средств изучения и освоения океана показывает, что морским геофизическим комплексам присущ ряд особенностей: наличие буксируемых устройств, в том числе большой протяженности, которые существенно влияют на динамические характеристики управляемого процесса; относительно малые скорости буксировки, что снижает эффективность действия руля и увеличивает относительный уровень внешних возмущений; существенные ограничения на переменные состояния и управления, обусловленные технологией проведения морских разведочных работ; необходимость точного управления движением судна-буксира по заданной траектории с целью обеспечения минимального отклонения буксируемых устройств от заданной линии профиля.

Известные системы управления подобными объектами, реализующие стационарные законы управления, не позволяют учитывать изменение динамических характеристик управляемого объекта, что приводит к ухудшению качества управления в меняющихся условиях плава-

ния, а построение адаптивных систем управления сложными процессами, к которым можно отнести и процесс управления движением морскими геофизическими комплексами (МГК), приводит к сложным вычислительным процедурам, реализация которых в реальном масштабе времени встречает значительные затруднения.

Например, адаптивные системы [6,7,18,19], наиболее полно учитывающие особенности морских геофизических комплексов (МГК) и требования к качеству управления, состоят из подсистем координатного оценивания и оперативной идентификации, а также подсистемы поиска оптимальных управляющих воздействий, в основу которой положен метод динамического программирования. Реализация подобных систем возможна только на базе мощных современных вычислительных машин, установка которых на борту требует их специального исполнения, экономически не оправдана и резко снижает надежность систем управления. Эти ограничения обуславливают недостаточное качество управления движением морскими геофизическими комплексами (МГК), что приводит к большим отклонениям буксируемой геофизической аппаратуры от заданной линии профиля и, как следствие, к снижению качества получаемой информации.

Указанные обстоятельства и привели авторов к идее использования логико-лингвистического (нечеткого) подхода к анализу сложных систем.

Большой интерес специалистов по управлению к таким моделям объясняется, в основном, следующими факторами: возможность использования богатого практического опыта специалистов, не имеющих специальных знаний, выраженного ими в качественной форме; простота реализации; функциональная устойчивость, как к внешним возмущениям, так и к изменениям параметров управляемого процесса в достаточно широких пределах изменения, что доказывается в работе [17] посредством математического моделирования управляемого процесса.

На рис. 3 приведены результаты математического моделирования [17, 21] процессов оптимального (рис. 3,а) и нечеткого (рис. 3,б) управлений движением МГК в режиме выхода на заданную траекторию при одинаковых внешних условиях.

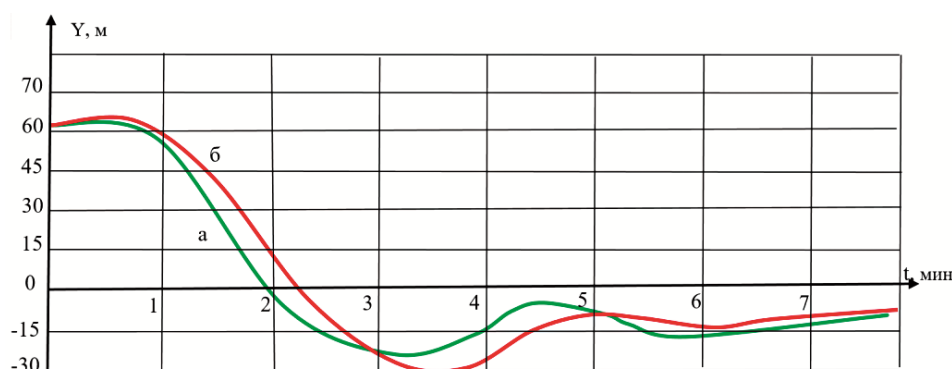


Рис. 3. Результаты моделирования процесса выхода МГК на траекторию:

а) при оптимальном и б) нечетком управлении

Fig. 3. Results of simulation of the process of reaching the trajectory:

a) under optimal and b) fuzzy controls

Результаты моделирования показывают, что нечеткие алгоритмы позволяют обеспечить движение морскими геофизическими комплексами (МГК) по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта с меньшими на два порядка временными затратами.

Как показывает приведённый анализ, все выше приведённые исследования имеют несколько общих черт, из которых наиболее характерным является то, что они не опираются на точную модель управляемого процесса и при этом получены достаточно хорошие результаты.

Второй общей чертой является то, что почти во всех алгоритмах, начальные множества

имеют наименования типа «положительное большое» или «отрицательное маленькое». Это естественный выбор, отражающий обычный путь, которому следуют при определении количественных характеристик, т.е. в зависимости от знака и величины.

Постановка задачи. В настоящее время, несмотря на то, что исследования в этой области в некотором смысле соответствуют друг другу, существуют различия как в структуре управляющего устройства, так и в его внедрении. Наиболее важным является вопрос «как обрабатывать наблюдаемые измеренные четкие величины?».

Во всех известных работах исследователи соглашались в том, что точно измеренные величины могут быть представлены как нечеткие множества с функцией принадлежности, равной нулю везде, кроме измеренного значения, где она равна единице. Однако, мнения расходятся в том, как выбрать отдельную управляющую величину из нечеткого множества выходных величин. В [9, 15] авторы считают, что для рассматриваемых систем эффективно такое воздействие, которое имеет наибольший уровень принадлежности. Это самый простой способ, но при достижении более одного пика или же при достижении пика с плоской вершиной он является спорным. Одним из очевидных методов в таких случаях может быть выбор по максимальному значению функции принадлежности с последующим усреднением. Другим очевидным способом является формирование среднего значения, основанного на форме, например, метод центра площади [9]. Нет явной причины для выбора того или иного метода, хотя в [9] автор продемонстрировал, что при использовании метода среднего значения максимумов работа алгоритма аналогична работе многоуровневого реле, в то время как метод центра площади дает результаты, аналогичные с обычным ПИ-регулятором.

Другим структурным отличием является то, что в [10, 12] использован алгоритм с правилами вида: «Если {ошибка заданного значения}, то если {изменение в ошибке заданного значения}, то {изменение в управляющем воздействии}». В [12] правила имеют вид: «Если ошибка заданного значения}, то если {сумма ошибки заданного значения}, то изменение в управлении}», Kickert W.J.M. [12], Tong R.M. [9], хотя и используют ошибку заданного значения и изменения в ошибке как входные величины, работают двояко. Если ошибки «большие», то алгоритм дает абсолютные значения управляющего воздействия, в то время как при «небольших» он дает значения приращения. В работе [17] автор полагает, что типичным правилом для управления траекторным движением морскими геофизическими комплексами (МГК) по заданной траектории, может быть правилом вида: «Если **отклонение** от заданной траектории положительно большое и **скорость изменения отклонения** отрицательно маленькая, то **угол перекладки руля** отрицательно большой», где «среднее» и «маленькое» нечеткие значения отклонения и скорости изменения отклонения, а «большое» - нечеткое значение угла перекладки руля, т.е. управляющего воздействия. Набор таких правил, связывающих наблюдаемые переменные с управляющим воздействием, образует нечеткий алгоритм управления и является логико-лингвистической (нечеткой) моделью управляемого процесса.

Следует отметить, что во всех работах число уровней дискретизации и число правил в алгоритме менялось в довольно большом диапазоне: от 10 правил до 64 правил, уровни - от 5 до 18.

Приведенный обзор теоретических исследований и практического применения теории нечетких множеств показывает, что в этом направлении достигнуты определённые успехи и уже известны системы управления, которые частично решают указанные задачи. Однако эти системы не позволяют учитывать изменение динамических характеристик управляемого объекта, что приводит к ухудшению качества управления в меняющихся условиях плавания, а построение адаптивных систем управления сложными процессами, к которым можно отнести и процесс управления МПО, приводит к сложным вычислительным процедурам, реализация которых в реальном и/или ускоренном масштабе времени встречает значительные затруднения, а в некоторых случаях вообще не возможно реализовать за приемлемое время. Именно эти обстоятельства побудили специалистов в области управления начать работы по изучению нечетких (логико-лингвистических) моделей управления, которые возникли, когда в сферу авто-

матизации оказались вовлечёнными объекты столь сложной природы, что традиционные методы теории управления оказались для них либо малоэффективными, либо просто непригодными.

Кроме того, *теория нечетких множеств и систем - единственная теория, которая математически оперируется со смысловым содержанием слов человека*. Это особенно важно в будущем, где обработка информации ориентирована на компьютеры, а языки программирования стремятся к естественному языкам.

Методы исследования. Построение нечетких логико-лингвистических моделей управления различными процессами проходит три фазы.

Первая предусматривает квантование пространств нечетких входных и управляющих переменных, определение первичных нечетких подмножеств, составление нечетких правил управления. Эта фаза в общем случае опирается на существенный объем априорной информации и носит явно субъективный характер.

Вторая фаза заключается в оценке правил принятия решений, составляющих нечеткий алгоритм управления.

Третья фаза построения модели заключается в оценке качества модели и коррекции параметров нечетких правил. Если задан класс, к которому принадлежит идентифицируемая модель, то можно выделить три подхода к составлению самих правил управления:

1. Использование качественного понимания управляемого процесса для непосредственной записи правил;
2. Интерпретацию в нечеткой форме математических уравнений, о которых известно, что они описывают динамику управляемого процесса;
3. Использование входных - выходных данных процесса, полученных путем математического моделирования.

Отметим, что в то время как подходы, рассмотренные в пп. 1) и 2) связаны с «инженерным» чутьем, подход п. 3) может быть автоматизирован с использованием моделей оптимального управления.

Исходя из сказанного, нечеткую модель M можно представить в виде пятикомпонентного кортежа

$$M = \langle A, Q, U, T, P \rangle, \quad (1)$$

где A - нечеткий алгоритм; Q - конечное дискретное пространство входных переменных; U - конечное дискретное пространство управления; T - множество всех первичных нечетких подмножеств, определенных на пространствах Q и U ; P - процедура принятия решения.

Будем говорить, что нечеткая логико-лингвистическая модель управления построена, если определены все компоненты кортежа M .

Определение первичных нечетких подмножеств. Основываясь на определении нечетких множеств [1-4], можно выделить две особенности процесса определения нечетких подмножеств:

- для каждого нечеткого понятия языка T_j необходимо определить конечное множество числовых данных $\{x_i\}$ из области его рассуждения
 - $X = \{x_i, i=1, \dots, I\}$;
- необходимо задать оценки из интервала $[0, 1]$ для установления степени принадлежности числовых данных к нечетким понятиям.

Таким образом, будем считать, что нечеткие подмножества являются определенными, если задана совокупность пар вида $(x_i, \mu_{T_j}(x_i))$, где $x_i \in X$, а $\mu_{T_j}(x_i)$ - функция $X \rightarrow [0, 1]$, называемая функцией принадлежности элемента x_i к нечеткому подмножеству T_j .

Поэтому вопрос построения функций принадлежности нечетких множеств по результатам опроса экспертов или путем анализа априорной информации о процессе управления является очень важным.

Первым шагом при определении функции принадлежности является определение количественного состава экспертов. Для каждой задачи этот вопрос решается, как правило, отдель-

но. В общем случае из-за сложности оцениваемых систем и трудности получения информации для решения задачи оценивания привлекаются люди, обладающие специальными знаниями и опытом работы с данной системой.

Число экспертов должно быть достаточно большим для того, чтобы они в совокупности могли учесть существенные свойства задачи и чтобы решение, найденное при их помощи, было достаточно обоснованным.

В 1970 году А.Н. Борисовым [22] была предложена следующая схема определения значений функции принадлежности $\mu_{T_j}(x_i)$ элементов $x_i \in X$ к нечеткому множеству T_j : имеется коллектив экспертов, часть экспертов которого на вопрос о принадлежности элемента x_i к подмножеству T_j отвечает положительно (обозначим их через K_1), а другая часть - отрицательно (K_2). Тогда считаем, что

$$\mu_{T_j}(x_i) = K_1 / (K_1 + K_2) \quad (2)$$

Из (2) можно заключить, что данная схема соответствует вероятностной интерпретации функции принадлежности.

Другая схема была предложена Д.А. Поспеловым, И.В. Ежковой в 1977 году [23]. Выделяется фиксированный набор термов лингвистической переменной ЧАСТОТА. Затем каждый эксперт разбивает её условную область рассуждения $X = [0, 100]$ на интервалы, соответствующие каждому из термов. Пусть число экспертов, отнёсших элемент $x_i \in X$ к терму T_j , равно

$$K_{T_j}(x_i), \text{ а } K_{T_j}^{\max} = \max_{x_i} K_{T_j}(x_i).$$

Тогда $\mu_{T_j}(x_i) = K_{T_j}(x_i) / K_{T_j}^{\max}(x_i)$, откуда можно сделать вывод, аналогичный, сформулированному выше при анализе (2).

В данной работе для определения функции принадлежности была принята следующая процедура:

1. Определялись границы областей рассуждения для всех переменных.
2. Производилось квантование этих областей на число точек, соответствующее значениям элементов данной области.
3. Определялись наименования $T_j \in T$ и количество J нечетких подмножеств.
4. Эксперты независимо друг от друга заполняли таблицу 1, где $\mu_{T_j}^l(x_i)$ - функция принадлежности $x_i \in X$ к нечеткому множеству T_j , данная l -ым экспертом.

На основании таких таблиц (табл. 1) определяется результирующая функция принадлежности x_i - ого элемента к нечеткому подмножеству T_j , данная всеми экспертами

$$\mu_{T_j}(x_i) = \sum_{l=1}^L \mu_{T_j}^l(x_i) / L, \text{ где } L - \text{число экспертов.}$$

Полученные значения функции принадлежности должны удовлетворять определенным требованиям.

Пусть $T = \{T_j\}$ базовое множество лингвистической переменной $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$; $\langle T_j, X, C_j \rangle$ нечеткая переменная, соответствующая терму $T_j \in T$; $C_j = \bigcup_{k \in X} \mu_{T_j}^k / X$; S_j - носитель C_j ; $T^0 = T$ - любое другое терм-множество лингвистической переменной β .

Будем считать, что $X \subseteq R'$. Обозначим $|T|$ через J , $\inf x$ - через x_1 , а $\sup x$ - через x_2 .

Таблица 1. Экспертная таблица
Table 1. Expert table

$X=\{x_i\}$ $T=\{T_j\}$	x_1	x_2	$\dots$	x_i	$\dots$	x_I
T_1	$\mu_{T_1}^1(x_1)$	$\mu_{T_1}^1(x_2)$	$\dots$	$\mu_{T_1}^1(x_i)$	$\dots$	$\mu_{T_1}^1(x_I)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
T_j	$\mu_{T_j}^1(x_1)$	$\mu_{T_j}^1(x_2)$	$\dots$	$\mu_{T_j}^1(x_i)$	$\dots$	$\mu_{T_j}^1(x_I)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
T_J	$\mu_{T_J}^1(x_1)$	$\mu_{T_J}^1(x_2)$	$\dots$	$\mu_{T_J}^1(x_i)$	$\dots$	$\mu_{T_J}^1(x_I)$

Упорядочим множество A в соответствии с выражением $(\forall T_j \in T)(\forall T_i \in T) j > i \Leftrightarrow [(\exists x \in S_j)(\forall y \in S_i)(x > y)]$, означающим, что терм, который имеет носитель, расположенный левее, получает меньший номер. Тогда любая лингвистическая переменная должна удовлетворять следующим условиям [22]:

$$\mu_{x_1}^1 = 1; \quad x_2^J = 1; \quad (3)$$

$$(\forall T_j \in T) \setminus \{T_J\} (0 < \max \mu_{C_j \cap C_{j+1}} < 1); \quad (4)$$

$$(\forall T_j \in T) (\exists x \in X) (\mu_X^j = 1); \quad (5)$$

$$(\forall \beta) (|x| < \infty) \vee (\exists x_1 \in R') (\exists x_2 \in R') (\forall x \in X) (x_1 < x < x_2) \quad (6)$$

$$(\forall T_j \in T) (\exists T_i \in T^0) (\exists x \in X) (\mu_X^j \neq \mu_X^i). \quad (7)$$

Используя (рис. 4), прокомментируем приведенные выражения. Условия (рис. 11) запрещают функциям принадлежности крайних термов иметь вид колоколообразных кривых, что обусловлено расположением этих термов в упорядоченном множестве T .

Условия (4) запрещают существование в базовом множестве T пар термов типа T_1, T_2 и T_3, T_4 поскольку в первом случае отсутствует естественная разграниченность понятий, аппроксимируемых термами, а во втором случае участку области определения не соответствует никакое понятие.

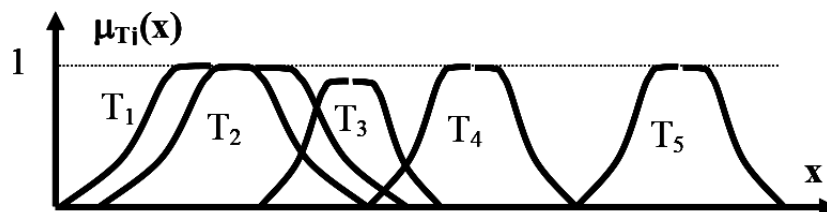


Рис. 4. Виды нечетких множеств
Fig. 4. Types of fuzzy sets

Поскольку каждое понятие имеет хотя бы один типичный объект, обозначаемый этим понятием, введено условие (5), запрещающее наличие в множестве термов типа T_5 . Выражения (6) ограничивают область определения конечным множеством точек. Данное условие констатирует имеющиеся в любой задаче управления физические ограничения на числовые значения параметров. Наконец, условие (7) указывает на то, что при изменении множества термов меняется и функция принадлежности нечетких множеств, описывающих семантику термов.

Следует отметить особенности построения начальных нечетких подмножеств по выходной переменной, т.к. она является входом исполнительных механизмов, которые обладают существенно нелинейными характеристиками. Нелинейности в системе могут быть учтены соответствующим выбором нечетких множеств. Так, для учета ограничений на управляющие воздействия необходимо наложить ограничения на универсальное множество, т.е. задают границы

изменения управляющего воздействия (рис. 5).

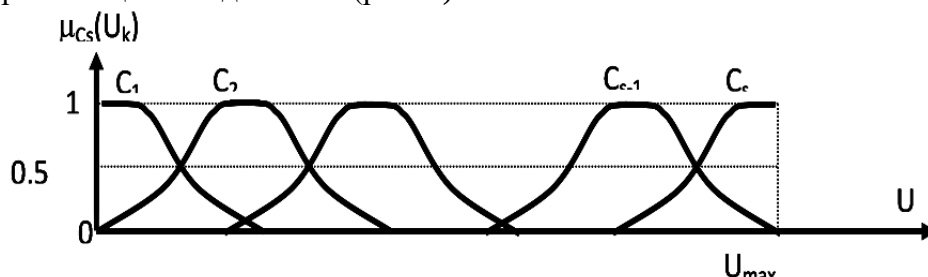


Рис. 5. Учет ограничения на управляющее воздействие
 Fig. 5. Accounting for the constraint on the control action

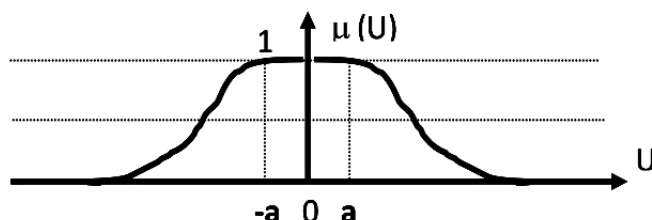


Рис. 6. Учет зоны нечувствительности
 Fig. 6. Accounting for the dead zone

Существенным аспектом нелинейности исполнительных механизмов помимо её асимметричности, является зона нечувствительности.

На рис. 6 графически изображено нечеткое подмножество, которое позволяет учитывать зоны нечувствительности (например, от $-a$ до a) исполнительного механизма.

Методы, рассмотренные для учета этих нелинейностей с помощью нечетких множеств, оказываются особенно пригодными для учета неизвестных нелинейностей.

Наименования термов T_j определяются с помощью семи основных нечетких подмножеств: 1. Положительное Большое (ПБ); 2. Положительное Среднее (ПС); 3. Положительное Маленькое (ПМ); 4. Нулевое (Н); 5. Отрицательное Маленькое (ОМ); 6. Отрицательное Среднее (ОС); 7. Отрицательное Большое (ОБ).

Это естественный выбор, отражающий обычный путь, которому следуют при определении количественных характеристик, т.е. в зависимости от их знака и величины. Эти первичные множества могут затем использоваться с тремя основными операциями объединения, пересечения и дополнения для вычисления таких значений, как «ПБ или ПС».

Анализ вопросов применения составных термов для описания элементов задач управления техническими системами показывает, что, во-первых, набор модификаторов (не, очень,), позволяющих с помощью процедуры $G \{G - \text{синтаксическое правило, порождающее название значений переменных}\}$ описывать имеющие смысл в задачах управления расширения множества $T_{до}T'$, не должен быть слишком большим; во-вторых, количество элементов в нем также не должно быть большим. Наконец, мощность множества $|T|$ согласно известной гипотезе о ёмкости памяти лица, принимающего решения [13] должна удовлетворять неравенству $|T| = 7 - 10$.

Построение нечетких правил принятия решений. Пусть задано непрерывное пространство P переменных X, Y , где $X, Y \subset P, X \cap Y = \emptyset$. Пусть также задано множество управлений U . Построим отображения $F: P \rightarrow U$ следующим образом:

1. Разобьём области изменения аргументов X и Y на J_0 и M_0 нечетких подмножеств. Для определенности множества этих нечетких подмножеств будем обозначать

$$A = \{A_{j0}, j_0 = 1, \dots, J_0\}, \quad B = \{B_{m0}, m_0 = 1, \dots, M_0\} \quad (8)$$

2. Введём в рассмотрение функции принадлежности $\mu_{A_{j0}}(x_i)$ и $\mu_{B_{m0}}(y_n)$, отражающие сте-

пень принадлежности элементов $x_i \in X$, $y_n \in Y$ к выделенным нечетким подмножествам соответственно. В этих обозначениях $i=1, \dots, I$; $n=1, \dots, N$ - число элементов в универсальных множествах X , Y , таких, что $X \cap Y = \emptyset$

3. Построим график функций $\mu_{A_{j0}}(x_i)$ и $\mu_{B_{m0}}(y_n)$ для всех $j_0 \in J_0$ и $m_0 \in M_0$ (рис.7 и 8), соответственно.
4. Аналогичные построения, описанные в пп. 1, 2 выполним и для области изменения аргумента управления U . При этом множество нечетких подмножеств обозначим $C = \{C_{s0}, s_0=1, \dots, S\}$
5. Построим также график (рис.9) функции принадлежности $\mu_{C_{s0}}(u_k)$, где $u_k \in U$, а $k=1, \dots, K$ - число элементов в универсальном множестве U .

Тогда будем считать, что нечеткие подмножества A_{j0} , B_{m0} , C_{s0} , определены, если задана совокупность пар вида $\{x_i / \mu_{A_{j0}}(x_i)\}$, $\forall x_i \in X$; $\{y_n / \mu_{B_{m0}}(y_n)\}$, $\forall y_n \in Y$ и $\{u_k / \mu_{C_{s0}}(u_k)\}$, $\forall u_k \in U$.

Эти нечеткие подмножества совместно с лингвистическими правилами принятия решения в дальнейшем могут быть использованы для построения нечетких алгоритмов управления (НАУ), описывающих стратегию управления оператора процесса.

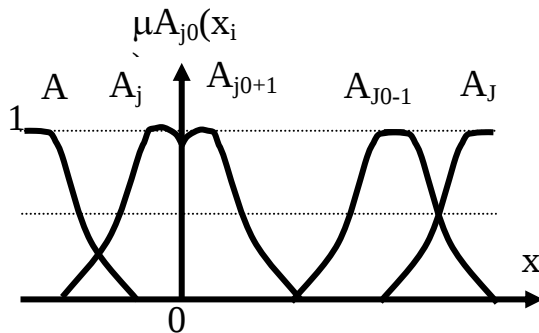


Рис. 7. График функции $\mu_{A_{j0}}(x_i)$
 Fig. 7. Graph of the function $\mu_{A_{j0}}(x_i)$

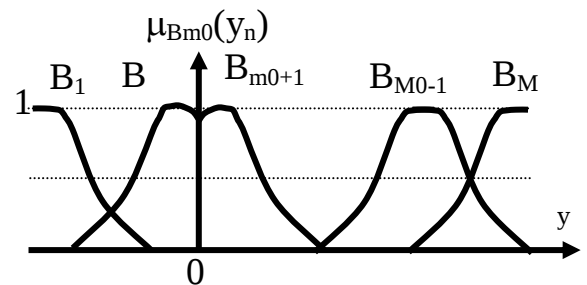


Рис. 8. График функции $\mu_{B_{m0}}(y_n)$
 Fig. 8. Graph of the function $\mu_{B_{m0}}(y_n)$

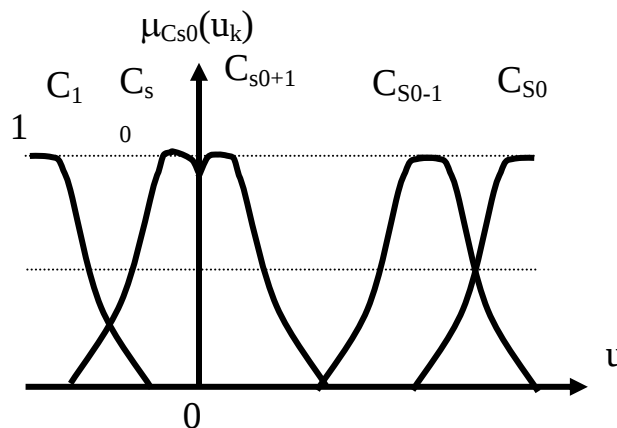


Рис. 9. График функции $\mu_{C_{s0}}(u_k)$
 Fig. 9. Graph of the function $\mu_{C_{s0}}(u_k)$

Пусть задана система лингвистических правил принятия решений, которая по терминологии [5] образует нечеткий алгоритм управления, представленный в матричной форме на рис. 10

	B_1		B_{m0}		B_{M0}
A_1	C_{11}		C_{1m0}		C_{1M0}
....					
A_{j0}	C_{j01}		C_{j0m0}		C_{j0M0}
....					
A_{J0}	C_{J01}		C_{J0m0}		C_{J0M0}

Рис. 10. Матричная форма представления нечеткого алгоритма управления

Fig. 10. Matrix form of representation of the fuzzy control algorithm

На рис. 10 исходными элементами являются нечеткие подмножества A_{j0} и B_{m0} , а элементами - нечеткие подмножества C_{s0} . Из рис. 11 видим, что нечеткий алгоритм управления является нечетким двухмерным многоуровневым реле: непрерывное пространство P делится на области из пространства Q с одинаковым нечетким выходом.

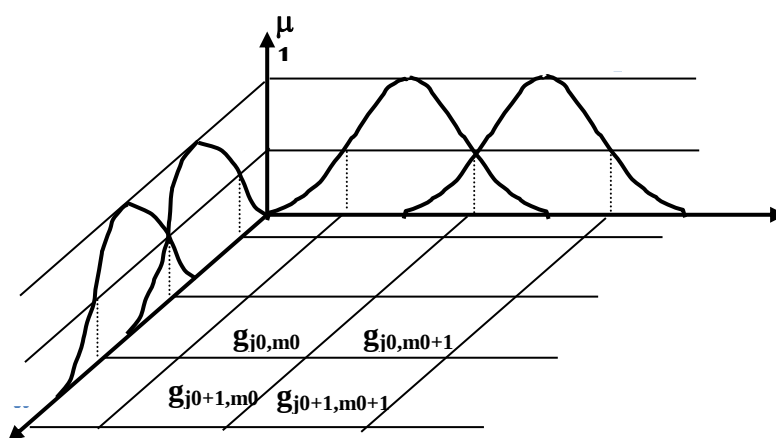


Рис. 11. Нечеткий алгоритм управления как нечеткое двухмерное многоуровневое реле

Fig. 11. Fuzzy control algorithm as a fuzzy two-dimensional multilevel relay

В случае нечеткого регулятора с двумя нечеткими входами и с одним нечетким выходом происходит следующее; нечеткие подмножества, определенные на входных универсальных множествах X и Y разбивают непрерывное пространство P на конечное число подпространств (рис.11), т.е. строится отображение $F_1: P \rightarrow Q$. Точки, где $\mu_{A_{j0}}(x_i) = \mu_{A_{j0+1}}(x_i)$ являются границами подмножеств A_{j0} и A_{j0+1} . Аналогично и для B_{m0} .

т.е. $u_t = \arg \max \mu_{C_{s0}}(u_k)$, что эквивалентно $F: U \rightarrow u_k$.

Тогда можем говорить, что каждому подпространству $g_{j0,m0} \in Q$, заданному лингвистическим правилом (рис.11), ставится в соответствие нечеткое подмножество C_{s0} из пространства U , что соответствует отображению $F_2: P \rightarrow Q$. И, наконец, определяется то конкретное управляющее воздействие $u_t \in U$, для которого функция принадлежности имеет максимальное значение. Следовательно, функцию вход-выход нечеткого регулятора можно представить как функцию многоуровневого двухмерного реле при условии, что выполнено одно из следующих достаточных условий:

$$\sup \mu_{A_{j0}}(x_i)=1; \quad \sup \mu_{B_{m0}}(y_n)=1; \quad \sup \mu_{C_{s0}}(u_k)=1; \quad x_i \in X, y_n \in Y, \quad u_k \in U \quad (9)$$

входные и выходные подмножества нормальны; график функции принадлежности выходного нечеткого подмножества $\mu_{C_{s0}}$ симметричен относительно своего максимума; алгоритм состоит из исчерпывающего множества лингвистических правил (существует правило для каждой возможной входной комбинации нечетких подмножеств A_{j0} и B_{m0}).

Обсуждение результатов. Процедура реализации нечетких алгоритмов управления. В настоящее время известны два способа реализации нечетких алгоритмов управления.

Первый способ. Основная идея первого способа, предложенного А.Н.Мелиховым в работе [20], заключается в классификации текущей ситуации, т.е. отнесении конкретной ситуации к одному из заранее определенных классов возможных ситуаций, при которых нужно принимать то или иное решение в данный момент времени подобно тому, как это делает оператор в процессе управления. При этом четкие множества признаков, описывающих текущую ситуацию, сравниваются с эталонными и с определенной точностью классифицируются. Как правило, это возможно в случаях, когда речь идет о системах с ограниченной сложностью с небольшим числом ситуаций и их признаков.

Однако в реальных системах число четких ситуаций чрезвычайно велико. Использование традиционных четких методов либо невозможно, либо приводит к очень сложным вычислительным структурам.

Исходя из этих соображений, авторами [20], предлагается для описания сложных ситуаций использовать лингвистические переменные [1-4], набор которых нечетко отображает все признаки ситуаций, а для представления текущей ситуации - использовать нечеткие подмножества, опирающиеся на те же универсальные множества, что и лингвистические переменные. Для принятия решения необходимо установить степень равенства нечеткой текущей ситуации S^T со всеми нечеткими эталонными ситуациями $S^3_l = \{s^3_l, l=1, L\}$, соответствующими нечетким значениям управляющих воздействий. Если имеет место нечеткое равенство, то в текущей ситуации принимается то решение, которое предписано нечетко равной эталонной ситуации.

Отнесение текущей нечеткой ситуации к тому или иному классу состоит в определении степени равенства, текущего нечеткого подмножества с каждым из нечетких подмножеств, определяющих значения лингвистических переменных в эталонных ситуациях заключается в следующем.

Пусть A и B - произвольные нечеткие подмножества в универсальном множестве X . Тогда по [20], степень равенства

$$\mu(A, B) = \min\{A(x_i) \leftrightarrow B(x_i)\}, \quad x_i \in X \quad (10)$$

где $i=1, \dots, I$ - число элементов в универсальном множестве; знак « $\leftrightarrow$ » - операция нечеткой эквивалентности, определяемая по формуле.

Если $\mu(A, B) \geq 0.5$, то $A \leftrightarrow B = \min\{\max(\bar{A}, B), \max(A, \bar{B})\}$ полагаем, что нечеткие подмножества A и B нечетко равны, и обозначим $A \approx B$. Если $\mu(A, B) < 0.5$, то считаем, что A и B нечетко неравны, и обозначаем $A \neq B$.

Второй способ, предложенный Л.А. Заде [1, 2] и названный им «составным правилом вывода», заключается в следующем: пусть задано правило вида «Если $\beta_1=A$, и если $\beta_2=B$, то $\beta_3=C$ ». Тогда подразумеваемое отношение между тремя нечеткими лингвистическими переменными β_1 , β_2 и β_3 выражается в терминах декартова произведения трех нечетких подмножеств A , B и C . Декартово произведение подмножеств A , B и C обозначается $R=A \times B \times C$ и определяется с помощью равенства:

$$\mu_R(x, y, u) = \min\{\mu(x), \mu(y), \mu(u)\}, \quad (11)$$

где $x \in X, y \in Y, u \in U$.

Выразив таким образом отношение между тремя переменными, теперь мы можем ответить на вопрос «Если $\beta_1=A'$, а $\beta_2=B'$, то каково значение β_3 ?», если задано нечеткое отношение R и заданы нечеткие подмножества A' и B' . Тогда отношение R используется для определения соответствующего значения C' с помощью составного правила вывода, которое записывается как $C' = A' \circ B' \circ (A \times B \times C)$, а функция принадлежности определяется выражением:

$$\mu_{C'}(U_k) = \max_k \max_{in} \max_{ink} \min\{\mu_{A'}(x_i), \mu_{B'}(y_n), \mu_R(x_i, y_n, u_k)\} \quad (12)$$

Результатом выполнения составного правила вывода является нечеткое подмножество, описывающее изменение управляющего воздействия β_3 , определяемого правилом для измеренных значений переменных. Для того, чтобы получить общее нечеткое управление, требуется результаты каждого отдельного правила объединить с использованием операции объединения.

Например, в случае трех правил нечеткое подмножество управления имеет такой вид, как на рис. 12 (толстая линия).

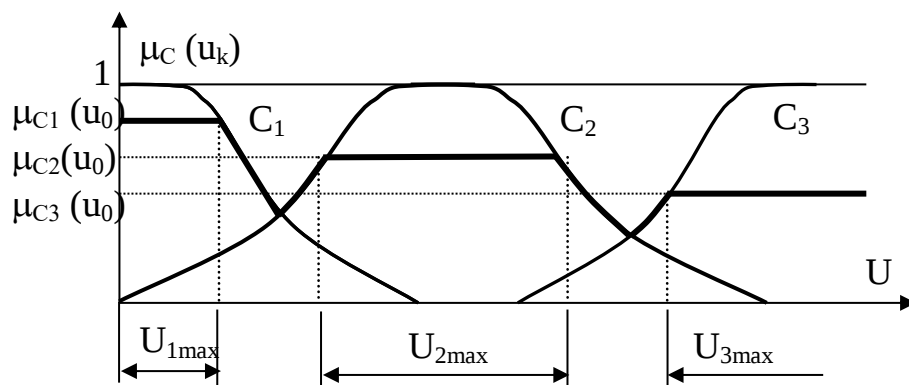


Рис. 12. Нечёткое управляющее воздействие

Fig. 12. Fuzzy control action

Управление, полученное в результате взятия максимума из подмножества, приведённого на рис. 12, совпадает с диапазоном $u_{1\max}$ и тем самым мы определим нечеткое управляющее воздействие для данных нечетких значений входных переменных. Тогда конкретное управляющее воздействие для данного примера определяется соотношением

$$U_t = \arg \max_k \mu_C(u_k). \quad (13)$$

Построение логико-лингвистической модели управления движением морского геофизического комплекса. Основной особенностью построения нечеткого алгоритма управления является использование нечетких понятий, содержащихся в естественном языке человека-оператора, на основании которых принимаются четкие или нечеткие решения, воплощаемые в конкретные действия. Каждое нечеткое понятие в дальнейшем формально представляется в виде нечеткого подмножества. Это позволяет выполнить эквивалентные преобразования нечетких понятий и образовать новые понятия с помощью различных операций над нечеткими множествами.

Например, типичным правилом для управления движением МПО по заданной траектории может быть: «Если **отклонение** от заданной траектории положительно среднее и **скорость изменения отклонения** отрицательно маленькая, то **угол перекладки руля** отрицательно большой, где «среднее» и «маленькое» нечеткие значения отклонения и скорости его изменения, а «большой» — нечеткое значение угла перекладки руля, т.е. управляющего воздействия. Набор таких правил, связывающих важные наблюдаемые переменные с управляющим воздействием, образует нечеткий алгоритм управления и является **логико-лингвистической (нечеткой)** моделью управляемого процесса. Реализация системы управления, использующей нечеткий алгоритм, должна быть в общем случае аналогична подходу оператора к процессу управления.

Так, состояние МПО при его движении по заданной траектории в каждый момент времени характеризуется двумя переменными: во-первых, величиной отклонения от заданной траектории β_1 и, во-вторых, скоростью изменения отклонения β_2 , которые зависят от величины управляющего воздействия β_3 , и от случайных внешних возмущений.

Можно сказать, что опытный судоводитель принимает оптимальное, с его точки зрения, решение именно на основе этих двух переменных, опираясь на свой опыт и интуицию, хотя ему неизвестны математические зависимости между наблюдаемыми переменными и величиной воздействия. При этом часто опытный оператор может управлять подобными процессами более эффективно, чем автоматическая система, а когда он испытывает затруднения, это можно объяснить за счет скорости и способности отображать информацию или за счет глубины, с которой он может оценить решения.

В работе представлены результаты применения логико-лингвистических моделей для управления движением МПО по заданной траектории. Обоснованием для этой работы является исследование того, могут ли быть методы, аналогичные тем, которые использует человек-оператор, применимы в системах автоматического управления МПО, которые с трудом управляются обычными методами.

Для достижения поставленной цели на основе анализа результатов математического моделирования процессов управления МПО [17] и с учетом протокола экспертного опроса руководителя построена система лингвистических решающих правил, приведённая в табл. 2.

Таблица 2. Логико-лингвистическая модель управления движением морского подвижного объекта по заданной траектории
Table 2. Logical-linguistic model for controlling the movement of a marine mobile object along a given trajectory

B_{m0} A_{j0}	ПБ	ПС	ПМ	ПН	ОН	ОМ	ОС	ОБ
ПБ	ПМ	Н	ОМ	ОМ	ОМ	ОС	ОБ	ОБ
ПС	ПС	Н	Н	ОМ	ОМ	ОМ	ОС	ОБ
ПМ	ПС	Н	Н	Н	Н	ОМ	ОС	ОБ
ПН	ПС	ПС	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ	ОС
ОН	ПС	ПМ	Н	Н	Н	ОМ	ОС	ОС
ОМ	ПС	ПМ	ПМ	Н	Н	ОМ	ОМ	ОС
ОС	ПБ	ПБ	ПС	ПМ	Н	Н	ОМ	ОС
ОБ	ПБ	ПБ	ПС	ПМ	ПМ	ПМ	Н	ОМ

Вид применяемых правил принятия решения зависит от управляемого процесса и используемой эвристики. В случае задач с двумя входами и одним выходом, которые являются предметом исследования данного параграфа, предполагается, что нечеткими входными переменными являются отклонения управляемого объекта от заданной траектории β_1 и скорость изменения величины отклонения β_2 , а управляющим воздействием - величина угла перекладки руля β_3 .

Нечеткая система управления разработана для функционирования в таких ситуациях, где имеющиеся источники информации неточны, с шумами, субъективно интерпретируются или ненадежны. В рассматриваемом примере имеются результаты измерения величины отклонения с точностью, определяемой РНС, и вычисляется скорость изменения отклонения. Для построения нечеткого алгоритма области определения $X, Y \subset Q$ переменных β_1, β_2 , характеризующие пространство состояния управляемого объекта, квантуются в 22-х точках с разделенным нулем и их значения определяются с помощью следующих множеств

$A = \{A_{j0}, j_0 = 1, \dots, J_0\}$, $B = \{B_{m0}, m_0 = 1, \dots, M_0\}$, где A_{j0}, B_{m0} - базовые нечеткие подмножества, определяемые в областях X, Y соответственно (в нашем примере $J_0 = M_0 = 8$). При этом содержательный смысл нечетких подмножеств A_{j0} , и B_{m0} определяется как ПБ, ПС, ПМ, ПН, ОН, ОМ, ОС, ОБ, где ПБ - Положительно Большое, ОБ - Отрицательно Большое, ПС - Положительно Среднее, ОС - отрицательно Среднее, ПМ - Положительно Маленькое, ОМ - Отрицательно Маленькое, ПН - Положительное Нулевое, ОН - Отрицательное Нулевое, а их субъективные численные значения, определены и приведены в табл. 3 и 4 соответственно. Заметим, что совпадение знаков переменных β_1 и β_2 , интерпретируется как движение управляемого объекта к заданной траектории, а несовпадение - от траектории. Управляющее воздействие β_3 , характеризующее пространство управлений U , квантуется в 21 точке, охватывая интервал от минимально допустимого и до максимально допустимого значения (табл. 5), без дальнейшего деления нуля.

Множество нечетких подмножеств управления обозначим через $C = \{C_{s0}, s_0 = 1, \dots, S_0\}$, где $S_0 = 7$ для нашего примера.

Таблица 5. Базовые нечеткие подмножества лингвистической переменной
«угол перекаладки пера руля»

Table 5. Basic fuzzy subsets of a linguistic variable "rudder angle"

k=1,...,K	U={u _k }	ПБ	ПС	ПМ	Н	ОМ	ОС	ОБ
1	-10	0	0	0	0	0	0.1	1
2	-9	0	0	0	0	0	0.2	1
3	-8	0	0	0	0	0.1	0.5	0.9
4	-7	0	0	0	0	0.2	0.7	0.8
5	-6	0	0	0	0	0.4	0.9	0.6
6	-5	0	0	0	0	0.6	1.0	0.4
7	-4	0	0	0	0	0.8	0.9	0.1
8	-3	0	0	0	0	0.9	0.7	0
9	-2	0	0	0	0	1.0	0.3	0
10	-1	0	0	0	0	0.9	0.1	0
11	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
12	1	0	0	0.1	0.9	0	0	0
13	2	0	0	0.2	1.0	0	0	0
14	3	0	0.1	0.6	0.9	0	0	0
15	4	0.1	0.2	0.9	0.8	0	0	0
16	5	0.2	0.4	1.0	0.6	0	0	0
17	6	0.4	0.6	0.9	0.4	0	0	0
18	7	0.6	0.8	0.7	0.2	0	0	0
19	8	0.7	0.9	0.5	0.1	0	0	0
20	9	0.9	1.0	0.2	0	0	0	0
21	10	1.0	1.0	0.1	0	0	0	0

Ограничение на величину управляющего воздействия учитывается заданием границ соответствующей области определения, т.е. U. Процедура принятия решения заключается в следующем:

1. Вычисление текущего отклонения и скорости его изменения;
2. Преобразование величин отклонения и скорости его изменения в нечеткие подмножества A_j и B_m соответственно;
3. Оценка правила принятия решения с использованием составных правил вывода и определения нечеткого подмножества управляющих воздействий C_s ;
4. Вычисление детерминированного управляющего воздействия, требуемого для реализации.

Оценка качества логико-лингвистической модели управления (ЛЛМУ). Исследование работы ЛЛМУ проводилось методом математического моделирования на цифровом моделирующем комплексе. Основной задачей моделирования является исследование логико-лингвистической модели управления движением МПО по заданной траектории (в том числе по траекториям, имеющим сложные формы; при случайных внешних воздействиях и дрейфе параметров управляемого объекта).

В качестве математической модели объекта управления были использованы уравнения движения МПО, приведённые в [23]. Моделирование информационных помех осуществлялось наложением на величину отклонения Гауссовского шума с различным среднеквадратичным отклонением. Для проверки функциональной устойчивости нечётких алгоритмов к случайным внешним возмущениям и к дрейфу параметров управляемого объекта эксперимент проводился при следующих условиях: начальное отклонение от заданной траектории - 60 м для режима вы-

хода на траекторию; скорость движения МПО - 2,5 м/сек; скорость течения - от 0 до ± 1 м/сек; волнение моря - до 6 баллов; изменение параметров управляемого объекта - до $\pm 30\%$.

Как показали результаты моделирования, качество нечеткого управления существенно зависит от частоты формирования нового значения управляющего воздействия, равной $1/T_B$, где T_B - интервал выборки управления.

Управление объектом обычно происходит с помощью изменения какого-либо параметра в соответствии с управляющим воздействием. Это может быть, к примеру, угол перекладки руля. Данные о состоянии объекта, необходимые для системы управления можно собирать с помощью различных датчиков. В данной работе судно полностью моделируется с использованием объектно-ориентированного подхода, поэтому получение данных и управление объектом происходит через методы объекта

Как видно из результатов моделирования (рис. 13), нечёткие алгоритмы позволяют решить задачу управления МПО по заданной траектории с достаточно хорошим качеством управления.

На первом графике изображаются две траектории: зеленая – требуемая траектория, синяя – траектория судна, полученная в результате моделирования.

На втором графике отображено значение управляющего воздействия.

Третий и четвертый график показывают значения, которыми руководствовалась САУ – отклонение от траектории и скорость изменения отклонения соответственно.

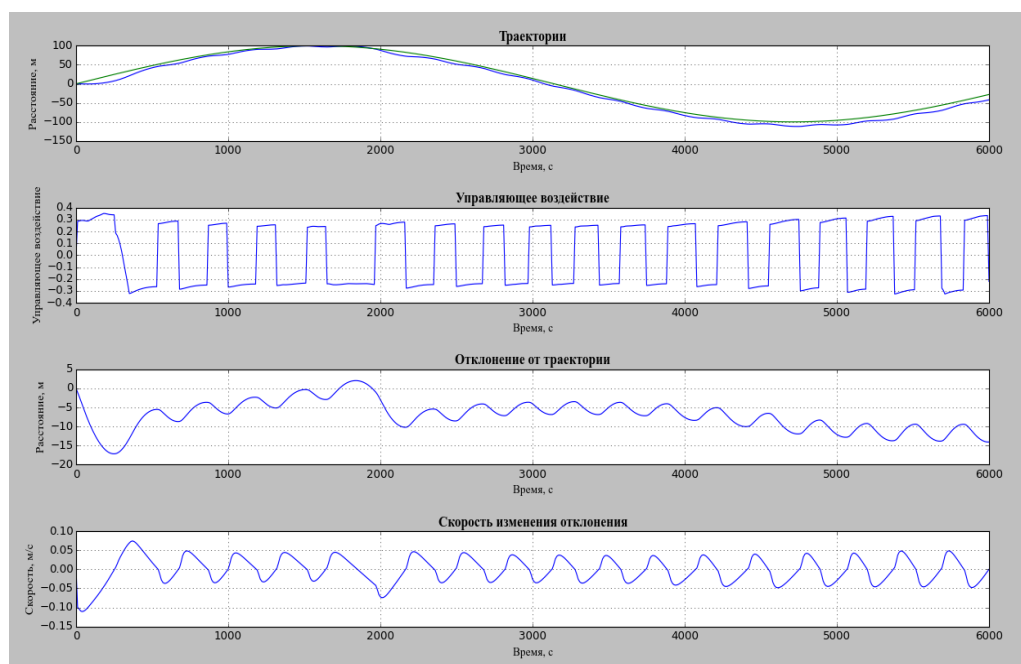


Рис. 13. Результаты моделирования движения МПО по криволинейной траектории при различных внешних возмущениях

Fig. 13. Simulation results of MPO movement along a curvilinear trajectory under various external disturbances

Вывод. В данной статье рассмотрены основные этапы построения ЛЛМУ морскими подвижными объектами, а также приведены результаты математического моделирования логико-лингвистических моделей управления траекторным движением морских подвижных объектов при различных внешних возмущениях и процесса выхода МПО (рис. 14) на траекторию при изменении параметров управляемого объекта на 30%.

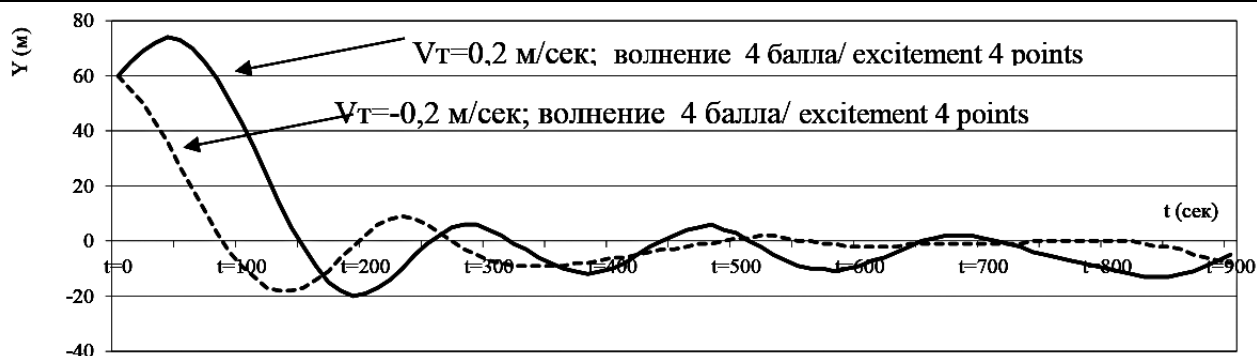


Рис. 14. Результаты моделирования процесса выхода МПО на траекторию при изменении параметров управляемого объекта на 30%

Fig. 14. The results of modeling the process of MPO exit to trajectory when changing the parameters of the controlled object by 30%

Результаты моделирования показали, что ЛЛМУ позволяют обеспечивать движение МПО по заданной траектории с достаточным для практических целей качеством управляемого процесса в условиях различных внешних возмущений и дрейфа параметров управляемого объекта. Применение нечётких алгоритмов управления позволяет существенно сократить затраты машинного времени по сравнению с оптимальным поисковым алгоритмом при допустимом ухудшении качества процесса и обеспечить реализацию процесса управления в реальном масштабе времени.

Библиографический список:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963, v. 8, p. 338-353.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистического переменного и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 168 с.
3. В.Я. Пивкин, Е. П. Бакулин, Д. И. Кореньков. Нечеткие множества в системах управления//Под редакцией доктора технических наук, профессора Ю.Н. Золотухина. <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=83618>
4. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва, 2001.
5. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б., Канаев М.М., Выбор величины управления при реализации нечетких управляющих алгоритмов//Электронное моделирование, 1989, №1-с. 97-99.
6. Магомедов И.А., Нечаев В.А. Алгоритм параметрической идентификации морского подвижного объекта. Известие СКНЦ №2, 1985.
7. Магомедов И.А. Построение оптимальных алгоритмов управления траекторным движением морского геофизического комплекса. Тезисы доклада на РНТК "Новые информационные технологии и их применение в медицине, образовании и технике", Махачкала, 1999г.
8. King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*. 1977;13:235-242.
9. Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. *inform. Control*, 1978; 27(3):431-440.
10. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEC*, 1974;212:1383-1389.
11. Lemke van H.R., Kickert W.J.M. The application of fuzzy set theory set control a warm water process. *J. Automatica*, 1976; 17: 8-18.
12. Kickert W.J.M., Lemke Van H.R. Application of fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*. 1976;12: 301-308.
13. Шрейдер Ю.А. Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 264 с.
14. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. и др. Принципы описания химико-технологических процессов с помощью нечетких множеств. Докл. АН СССР, т.243, № 1, 1978, с. 159-162.
15. Магомедов И.А., Рождественский Ю.В., Беляев Н.И. Нечеткая система управления морскими геофизическими комплексами на базе микро-ЭВМ 5-ая Всесоюзная НТК «Технические средства изучения и освоения океана» (Океанотехника-85), Ленинград, 1985.
16. Магомедов И.А., Кокаев О.Г. Применение теории нечетких множеств к задачам управления нестационарными процессами. В кн. «Методы и системы принятия решений». Рига, 1984г.
17. Магомедов И.А. Логико-лингвистические модели управления движением морского подвижного объекта//Известия Института инженерной физики. 2015. Т. 2. № 36. С. 52-59.
18. Кудряшов В.Е., Нечаев В.А., Антонов А.А. Синтез цифровой адаптивной системы управления сейсморазведочным комплексом. Изв. ЛЭТИ, 1980, вып. 269, 16-20 с.
19. Магомедов И.А., Нечаев В.А. Микропроцессорная система управления движением морского геофизического комплекса по заданной траектории, VIII научно-практическая конференция ученых Дагестана «Автоматизация производства и использование средств ВТ в народном хозяйстве», Махачкала, 1985.
20. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С. Расплывчатая логика - основа построения вычислительных структур для обработки расплывчатой информации. В сб. Однородные цифровые вычислительные и интегрирующие структуры. Вып. IX, Таганрог, 1978, с.4-8.
21. Магомедов И.А. Нечеткий алгоритм управления траекторным движением морского геофизического комплекса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №3, 1999г.

22. Борисов А.Н. Методика оценки функций принадлежности элементов размытого множества. - В кн.: Кибернетика и диагностика. Рига: Зинатне, 1970, вып. 4, с. 125-134.
23. Пospelов Д.А., Ежкова И.В. Принятие решений при нечетких основаниях: 1 Универсальная шкала. Изв.АН СССР. Сер. Техническая кибернетика, 1977, №6, с. 3-11.

References:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. inform. Control. 1963; 8: 338-353.
2. Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. Mir.1976;168.(In Russ)
3. V. Ya. Pivkin, E. P. Bakulin, D. I. Korenkov. Fuzzy sets in control systems//Edited by Doctor of Technical Sciences, Professor Yu.N. Zolotukhin <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=83618> (In Russ)
4. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. Fuzzy logic and artificial neural networks. Moscow, 2001 Publisher: Fizmatlit (In Russ)
5. L. S. Bershtein, V. B. Melekhin, M. M. Kanaev. Choice of control value in the implementation of fuzzy control algorithms. [Elektronnoye modelirovaniye] *Electronic modeling*, 1989; 1: 97-99 (In Russ)
6. Magomedov I.A., Nechaev V.A. Algorithm for parametric identification of a marine mobile object. News of the SKNTs 1985; 2. (In Russ)
7. Magomedov I.A. Construction of optimal algorithms for controlling the trajectory motion of a marine geophysical complex. Abstracts of the report at the RNTK "New information technologies and their application in medicine, education and technology", Makhachkala, 1999. (In Russ)
8. King R.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*. 1977;13:235-242.
9. Tong R.M. Analysis and Control of fuzzy systems using finite discrete relations. inform. Control, 1978; 27(3):431-440.
10. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEC, 1974;212:1383-1389.
11. Lemke Van H.R., Kickert W.J.M. The application of fuzzy set theory set control a warm water process. *Automatica*. 1976; 17: 8-18.
12. Kickert W.J.M., Lemke Van H.R. Application of fuzzy controller in a warm water plant. *Automatica*. 1976;12: 301-308.
13. Shreider Yu.A. Equality, similarity, order. M.[Nauka] Science, 1971;264. (In Russ)
14. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. etc. Principles of description of chemical-technological processes using fuzzy sets. -Report. USSR Academy of Sciences, 1978; 243 (1): 159-162. (In Russ)
15. Magomedov I.A., Rozhdestvensky Yu.V., Belyaev N.I. Fuzzy control system for marine geophysical complexes based on a micro-computer 5th All-Union Scientific and Technical Complex "Technical means for studying and developing the ocean" (Okeanotekhnika-85), Leningrad, 1985 (In Russ)
16. Magomedov I.A., Kokaev O.G. Application of the theory of fuzzy sets to control problems of non-stationary processes. In book. "Methods and systems of decision making". Riga, 1984.
17. Magomedov I.A. Logical-linguistic models of motion control of a marine moving object. Proceedings of the Institute of Engineering Physics. 2015.; 2(36): 52-59. (In Russ)
18. Kudryashov V.E., Nechaev V.A., Antonov A.A. Synthesis of a digital adaptive control system for a seismic complex. Izv. LETI, 1980; 269:16-20 p. (In Russ)
19. Magomedov I.A., Nechaev V.A. Microprocessor control system for the movement of a marine geophysical complex along a given trajectory, VIII scientific and practical conference of scientists from Dagestan "Automation of production and the use of VT in the national economy", Makhachkala, 1985 (In Russ)
20. Melikhov A.N., Bershtein L.S. Fuzzy logic is the basis for constructing computational structures for processing fuzzy information. On Sat. Homogeneous digital computing and integrating structures. Issue.IX, Taganrog, 1978;4-8.(In Russ)
21. Magomedov I.A. Fuzzy algorithm for controlling the trajectory motion of a marine geophysical complex. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 1999; 3 (In Russ)
22. Borisov A.N. A technique for estimating the membership functions of elements of a fuzzy set. In the book: Cybernetics and diagnostics. Riga: Zinatne, 1970; 4: 125-134.
23. Pospelov D.A., Ezhkova I.V. Decision making under fuzzy bases: 1 Universal scale. Izv.AN USSR. Ser. Technical Cybernetics, 1977; 6: 3-11. (In Russ)

Сведения об авторах:

Магомедов Иса Алигаджиевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; misa1949@mail.ru.

Мирзабеков Мурадхан Мевлюдинович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; mirzabekov_1994@bk.ru.

Айгумов Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; 915533@mail.ru

Information about the authors:

Isa A. Magomedov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; misa1949@mail.ru,

Muradkhan M. Mirzabekov, Postgraduate student, Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; mirzabekov_1994@bk.ru

Timur G. Aygumov, Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof., Head of the Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems; 915533@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.01.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 14.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 14.02.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

Оригинальная статья / Original Paper

**Определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением
скоростей сейсмических волн**
Ю.А. Сидоркина¹, Т.Г. Асланов²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

¹ 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

² 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скорости сейсмической волны. **Метод.** Исследование основано на использовании фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы, фигур второго порядка – эллипса и гиперболы и комбинированных методов, которые позволяют при заданных скоростях сейсмических волн по данным трех сейсмических датчиков, определить координаты гипоцентра землетрясения. При этом скорости считаются априорно известными. По показаниям четвертого сейсмического датчика, и для заданных скоростей сейсмических волн определяется расстояние от четвертого сейсмического датчика до гипоцентра. Повторно, по координатам четвертого сейсмического датчика и координатам гипоцентра, вычисленным по трем сейсмическим датчикам, рассчитывается расстояние между ними. В случае несоответствия скоростей сейсмических волн истинным между двумя расчетными значениями расстояний от гипоцентра до четвертого сейсмического датчика появится невязка. Варьируя скорости сейсмических волн при расчете координат гипоцентра, добиваемся минимума невязки. **Результат.** Решена задача определения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн. Получены плотности распределения ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения и скоростей сейсмических волн. **Вывод.** Предложенный метод позволяет увеличить точность определения координат очага землетрясения, а также уточнять значения скоростей сейсмических волн.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмология, сейсмический датчик, сейсмическая волна, скорость, распределение ошибок

Для цитирования: Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов. Определение координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1): 79-86. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

**Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous
determination of seismic wave velocities**

Yu.A. Sidorkina¹, T.G. Aslanov²

¹N.E. Bauman Moscow State Technical University (National research University),

¹ 5/1 Second Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia,

²Daghestan State Technical University,

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of the seismic wave velocity. **Method.** The study is based on the use of figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola, figures of the second order - ellipse and hyperbola and combined methods that allow, at given seismic

wave velocities, according to three seismic sensors, to determine the coordinates of the earthquake hypocenter. In this case, the velocities are assumed to be known a priori. According to the readings of the fourth seismic sensor, and for given seismic wave velocities, the distance from the fourth seismic sensor to the hypocenter is determined. Again, according to the coordinates of the fourth seismic sensor and the hypocenter coordinates calculated from the three seismic sensors, the distance between them is calculated. If the seismic wave velocities do not correspond to the true ones, a discrepancy will appear between the two calculated values of the distances from the hypocenter to the fourth seismic sensor. By varying the velocities of seismic waves when calculating the coordinates of the hypocenter, we achieve a minimum discrepancy. **Result.** The problem of determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of seismic wave velocities is solved. The error distribution densities in determining the coordinates of the earthquake hypocenter and seismic wave velocities are obtained. **Conclusion.** The proposed method makes it possible to increase the accuracy of determining the coordinates of the earthquake source, as well as to refine the values of seismic wave velocities.

For citation: Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov. Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with the simultaneous determination of seismic wave velocities. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 79-86. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-79-86

Введение. В настоящее время разработаны программы, позволяющие по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек, времени суток и т.д. оценить людские потери, что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов. Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности, в основном, из-за неверного определения глубины очага и эпицентра землетрясения [1, 4].

Геофизическими службами при расчете координат очага землетрясения скорости сейсмических для больших участков земли считаются одинаковыми и заранее известными, что приводит к значительным ошибкам. В рамках работы были разработаны математические модели и алгоритмы для определения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических [1-3].

Постановка задачи. Для нахождения координат гипоцентра землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн от очага землетрясения до сейсмических датчиков был использован метод сфер [5], а в качестве исходных данных рассматривались разности времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения до сейсмических датчиков.

Первоначально, для заданных минимально допустимых скоростей сейсмических волн, по данным трех сейсмических датчиков, определяются координаты гипоцентра землетрясения. По показаниям четвертого сейсмического датчика, и для минимальных скоростей сейсмических волн определяется расстояние от четвертого сейсмического датчика до гипоцентра. Повторно, по координатам четвертого сейсмического датчика и координатам гипоцентра, вычисленным по трем сейсмическим датчикам, рассчитывается расстояние между ними. В случае несоответствия скоростей сейсмических волн истинным между двумя расчетными значениями расстояний от гипоцентра до четвертого сейсмического датчика появится невязка. Изменяя скорости сейсмических волн от заданных минимальных до максимальных значений, можно определить скорости сейсмических волны, при которых невязка является минимальной.

Методы исследования. Для моделирования процесса определения координат гипоцентра землетрясения была задана область с размерами 160x160x160 километров, которая была разбита на 15625 равных участка. Считается, что скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков отличается. Были заданы координаты четырех сейсмических датчиков:

$$X_1 = 30; \quad X_2 = 120; \quad X_3 = 120; \quad X_4 = 30;$$

$$Y_1 = 30; \quad Y_2 = 30; \quad Y_3 = 120; \quad Y_4 = 120,$$

и гипоцентра землетрясения: $X = 70; \quad Y = 70; \quad Z = 20$.

Зная координаты гипоцентра землетрясения и сейсмических датчиков, найдем пересечение сейсмической волны с границами участков с одинаковой скоростью. При помощи найденных точек пересечения определяем расстояние, которое сейсмическая волна проходит через участок с постоянной скоростью и время, прохождения сейсмической волны через нее.

Сумма всех расчетных интервалов времени и расстояние, которое от очага землетрясения до сейсмического датчика позволяют определить средние скорости пробега сейсмической волн от гипоцентра до сейсмического датчика.

Примем, что отношение скоростей поперечной и продольной сейсмических волн равно 1,7. Тогда разность времен пробега поперечной и продольной сейсмических волн от гипоцентра землетрясения к сейсмическим датчикам может быть вычислена по выражению [6-8]:

$$\Delta t_i = R_i / (2.4 V_{si})$$

где Δt_i – разность времен прихода продольной и поперечной сейсмической волны к i -ому сейсмическому датчику;

R_i – расстояние от очага землетрясения до i -ого сейсмического датчика;

V_{si} – средняя скорость распространения поперечной сейсмической волны от очага землетрясения к i -ому сейсмическому датчику.

Для трех сейсмических датчиков в соответствии с пространственной теоремой Пифагора можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 = R_1^2 \\ (X - X_{2*})^2 + (Y - Y_{2*})^2 + Z^2 = R_2^2 \\ (X - X_{3*})^2 + (Y - Y_{3*})^2 + Z^2 = R_3^2 \end{cases}$$

где $X_{2*} = X_2 - X_1$, $Y_{2*} = Y_2 - Y_1$, $X_{3*} = X_3 - X_1$, $Y_{3*} = Y_3 - Y_1$ – соответственно, координаты второго и третьего сейсмических датчиков на плоскости с первым сейсмическим датчиком в начале координат.

После некоторых преобразований систему уравнений можно записать в виде:

$$\begin{cases} X = \frac{Y_{3*}(R_2^2 - X_{2*}^2 - Y_{2*}^2) - Y_{2*}(R_3^2 - X_{3*}^2 - Y_{3*}^2) + R_1^2(Y_{2*} - Y_{3*})}{2(Y_{2*}X_{3*} - Y_{3*}X_{2*})} \\ Y = \frac{X_{3*}(R_2^2 - Y_{2*}^2 - X_{2*}^2) - X_{2*}(R_3^2 - Y_{3*}^2 - X_{3*}^2) + R_1^2(X_{2*} - X_{3*})}{2(X_{2*}Y_{3*} - X_{3*}Y_{2*})} \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2} \end{cases} \quad (1)$$

где R_i могут быть вычислены по формуле:

$$R_i = \frac{\Delta t_i V_p V_s}{V_p - V_s}$$

где V_p и V_s – средние скорости продольной и поперечной сейсмических волн соответственно для всего сейсмоактивного региона.

С учетом принятого отношения продольной и поперечной сейсмических волн, получим:

$$R_i = 2.4 \Delta t_i V_s \quad (2)$$

При известных значениях скоростей продольных и поперечных сейсмических волн координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по выражениям (1) и (2). Однако, как отмечалось выше, для разных регионов, и даже в пределах региона по разным участкам и направлениям скорости волн отличаются друг от друга.

Поэтому, определение координат очага землетрясения нужно производить с одновременным определением скоростей сейсмических волн. При этом на скорости сейсмических волн накладываются ограничения. Для этого, сначала по выражениям (1) и (2), меняя скорость продольных волн от 2.3 до 4.4 км/с с шагом 0.01 определяем координаты очага землетрясения [9-14].

Следует отметить, что можно варьировать и отношение скоростей V_p/V_s . Однако в этом нет необходимости, так как это отношение даже между разными слоями земной коры меняется в пределах $\pm 3,7\%$ [15, 16]. При этом, для каждого значения поперечной скорости, для трех разностей времен прихода сейсмических волн мы будем иметь в пространстве единственную точку, которая с изменением скорости будет перемещаться в пространстве.

Для определения действительных значений скоростей сейсмических волн и глубины возьмем четвертый сейсмический датчик. Если рассчитанные по выражениям (1) и (2) скорости сейсмических волн и глубина не соответствуют истине, то расстояние от четвертого сейсмического датчика до очага землетрясения, найденная по формуле

$$R_4 = \sqrt{(X - X_{4*})^2 + (Y - Y_{4*})^2 + (Z - Z_4)^2} \quad (3)$$

не будет соответствовать расстоянию, вычисленному по формуле

$$R_4 = \frac{\Delta t_4 V_{p4} V_{s4}}{V_{p4} - V_{s4}} \quad (4)$$

При этом появится невязка, равная Δ_4 . И только при условии, когда скорости сейсмических волн будут соответствовать действительным, Δ_4 будет близко к нулю.

На рис. 1 приведены геометрические соотношения, поясняющие принцип нахождения невязки.

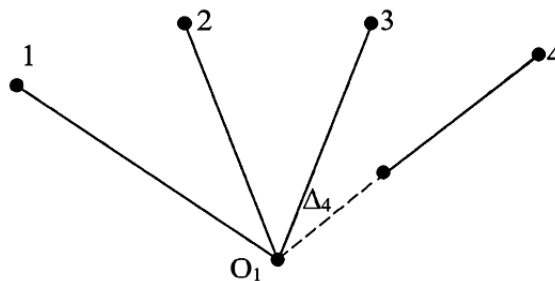


Рис. 1. Определение координат очага землетрясения (геометрические соотношения)

Fig. 1. Determining the coordinates of the earthquake source (geometric relations)

Для исследования адекватности работы предложенной модели были рассмотрены три случая:

- скорости сейсмических волн распределены случайным образом в интервале от 2.3 до 4.4 км/с для каждого участка земной коры (рис.2а);
- скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины очага землетрясения от 2.55 до 4.15 км/с, и при этом были введены случайные изменения скоростей от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2б);
- скорости сейсмических волн, по осям X и Y , изменяются по косинусоидальному закону таким образом, что максимум косинусоиды находится в центре исследуемого участка. При этом скорости сейсмических волн от центра краям участка меняются на 10 %. Как и в предыдущем случае, скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины от 2.55 до 4.15 км/с и к ним добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2в).
- по осям X и Y скорости сейсмических волн изменяются по синусоидальному закону с совершением полного периода колебания, за время пробега сейсмических волн от одного края

участка до другого. При этом скорость поперечной волны меняется в пределах $\pm 10\%$. Как и в предыдущих случаях, считается, что скорости сейсмических волн возрастают с увеличением глубины от 2.55 до 4.15 км/с и к ним добавляются случайные изменения в пределах от -0.25 км/с до 0.25 км/с (рис. 2г).

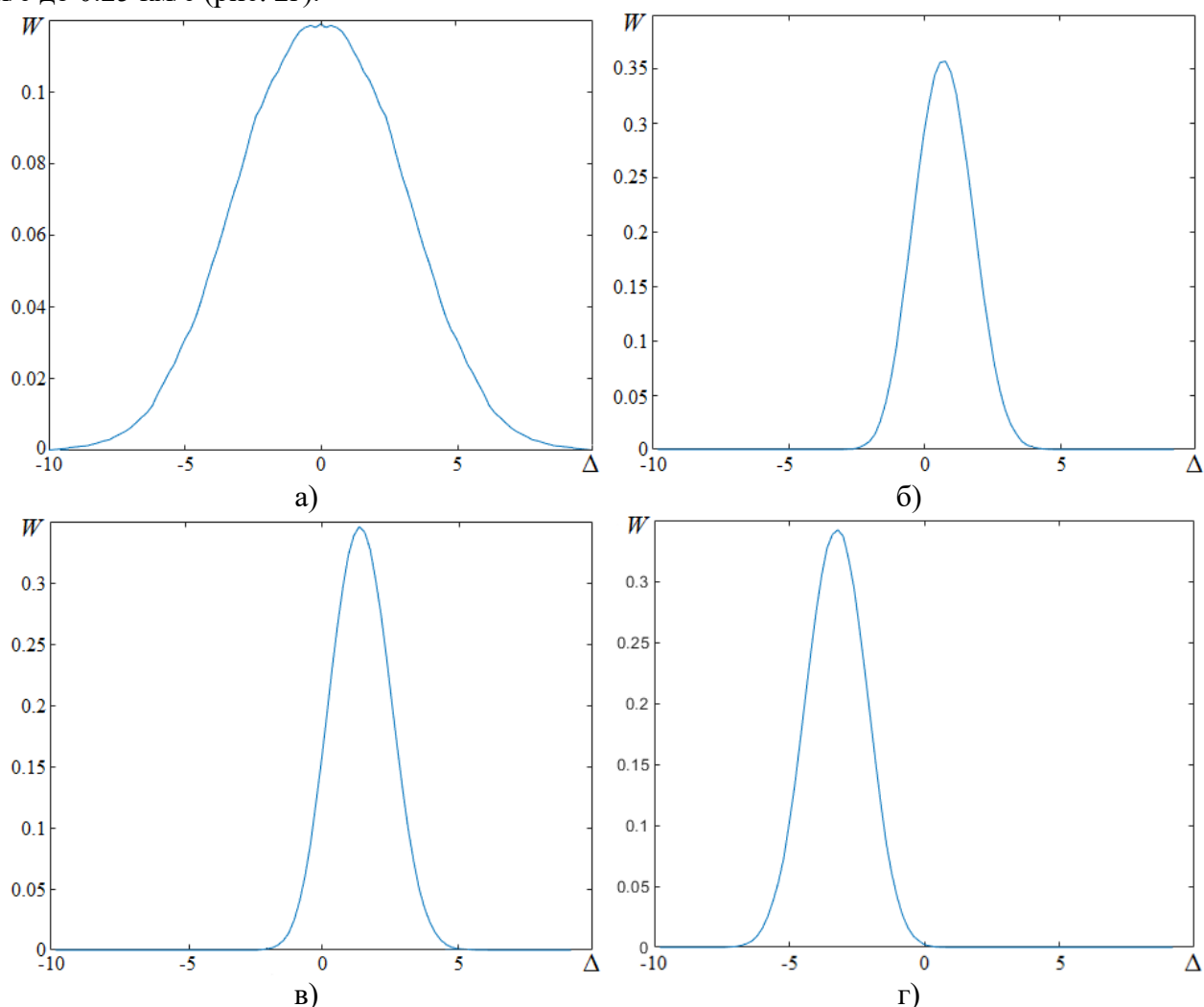


Рис. 2. Распределение ошибок при различных параметрах среды
Fig. 2. Distribution of errors for various environmental parameters

Обсуждение результатов.

1. Расположение плотной породы между сейсмическими датчиками (рис. 2в) приводит к появлению смещения расчетных координат (математического ожидания по оси ошибок) вправо от истинных, и наоборот.

2. Расположение менее плотной породы возле четвертого сейсмического датчика (рис. 2г) приводит к появлению смещения расчетных координат (математического ожидания по оси ошибок) влево от истинных, и наоборот.

3. На величину ошибки в определении координат эпицентра землетрясения значительное влияние оказывает горизонтальное изменение скоростей сейсмических волн на земной коре (сравнение рис. 2б с рис. 2в и 2г).

4. Большое удаление сейсмических датчиков от эпицентра землетрясения может привести к значительным ошибкам из-за большего разброса скоростей сейсмических волн (к большей дисперсии) на участках их распространения, что подтверждается сравнительным анализом рис. 2а по сравнению с остальными рисунками.

Вывод. Предложенный метод целесообразно применять в случаях, когда не определены экспериментально скорости распространения сейсмических волн на участках их распространения. Для увеличения точности определения координаты очага землетрясения, по предложенному методу, необходимо осуществить несколько итераций по выбору сейсмических датчиков на местности [17-23].

По координатам гипоцентра землетрясения, рассчитанным по показаниям четырех сейсмических датчиков, могут быть определены средние значения скоростей сейсмических волн для трасс распространения до сейсмических датчиков, показания которых не использовались при расчете, так как это могло бы дать худшие результаты.

При наличии двух комбинаций по четыре сейсмических датчика возможно определение скоростей сейсмических волн по каждой из комбинаций и их сверка.

При наличии значительных расхождений между результатами расчетов, по двум комбинациям сейсмических датчиков, это расхождение может быть использовано для оптимизации определения координат гипоцентра землетрясения. При учете параметров среды и размещения сейсмических датчиков в пространстве может быть дана математическая оценка смещения координат гипоцентра землетрясения.

Использование предложенной методики при расчетах позволит уменьшить ошибки в определении координат гипоцентра землетрясения

Библиографический список:

1. 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>
2. 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>
3. 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
4. Шахриманьян М.Л., Нигметов Г.М., Сосунов И.В. Математическое моделирование как способ поддержки принятия решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций // Каталог «Пожарная безопасность» — 2003. - С. 240-241.
5. Асланов Т.Г., Сеферов А.К., Садыки М.Р. Ошибки в определении координат очага землетрясения при использовании метода сфер / Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617047 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017611223; заявл. 13.02.17; опубл. 21.06.17.
6. Асланов Т.Г. Тагиров Х.Ю. Определение координат очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн / Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015» / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2015. — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Кудяев Д.А. Определение скоростей сейсмических волн по произошедшему землетрясению / XXXVI итоговая научно-техническая конференция ДГТУ: тезисы докладов. Махачкала, РИО ДГТУ, 2005. – С. 72-73
8. Даниялов М.Г., Магомедов Х.Д., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Об одном методе определения очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн / Труды института геологии Дагестанского научного центра РАН, Материалы. Издательство ДНЦ РАН. Махачкала 2010. – С. 54-59.
9. D'Amico S. (ed.) Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning In Tech. Janeza Trdine, 2012. 460 p.
10. Robert Garotta. Поперечные волны: от регистрации до интерпретации. Краткий курс лекций для высших учебных заведений, 2000 г. Серия №3.
11. Schuster G.T. Basics of Seismic Wave Theory / G.T. Schuster – University of Utah, 2007. – 154 p.
12. Kasahara K. Earthquake mechanics / K. Kasahara – Cambridge University Press, 1981. –272 p.
13. Kennett B. Seismic Wave Propagation in Stratified Media / B. Kennett – Australian National University Press, 2009. — 298 p.
14. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии: учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2008. - 222 с
15. Архангельский В.Т., Веденская И.А., Гайский В.Н. Руководство по производству и обработке. Издание Академии наук СССР. Москва, 1954г.
16. Быстрицкая Ю.В. Соотношение и сопоставление макросейсмических и инструментальных данных (дагестанские землетрясения). В сборнике «Сейсмичность и гидрогеогазохимия территории Дагестана. Вып. 2 (17).- Махачкала 1978.
17. 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>
18. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболоидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
19. Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчи-

- ков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (43), 2016 – Махачкала: ДГТУ, 2016. – С. 73-84
20. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения с использованием различных (комбинированных) методов / Материалы Международного молодежного научного форума "ЛОМОНОСОВ-2017" / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2017 — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2
 21. Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Тагиров Х.Ю. Исследование зависимости расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения от различных методов расчета координат / Неделя науки – 2017: материалы XXXVIII итоговой научно-технической конференции ДГТУ, 17-22 апреля 2017 г., Махачкала / Под ред. д.т.н., проф. Т.А. Исмаилова. – Махачкала, ДГТУ, 2017. – С.45-47.
 22. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. О некоторых вопросах выбора сейсмодатчиков с целью уменьшения ошибок при определении гипоцентра землетрясения с использованием различных методов / Материалы научно-практической конференции. ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова». 2017. С. 256-259.
 23. 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>

References:

1. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determining the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142> (In Russ)
2. Aslanov T.G. Determining the coordinates of the earthquake source using the combined method. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2017;44(2):118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125> (In Russ)
3. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determining the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - an ellipse and a hyperbola. *Automation. Modern technologies.* 2018; 11(72): 503-509 (In Russ)
4. Shakhrimanyan M.L., Nigmatov G.M., Sosunov I.V. Mathematical modeling as a way to support decision-making in case of emergencies. *Catalog "Fire Safety"* 2003; 240-241. (In Russ)
5. Aslanov T.G., Seferov A.K., Sadyki M.R. Errors in determining the coordinates of the earthquake source when using the method of spheres / Svid. about Mrs. reg. prog. Computer No. 2017617047 Ros. Federation / applicant and copyright holder VGUYu (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017611223; dec. 02/13/17; publ. 06/21/17. (In Russ)
6. Aslanov T.G. Tagirov Kh.Yu. Determining the coordinates of the earthquake focus with the simultaneous determination of seismic wave velocities / Proceedings of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2015" / Ed. ed. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] - M.: MAKSS Press, 2015. - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1 (In Russ)
7. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kudaev D.A. Determination of seismic wave velocities by the occurred earthquake / XXXVI final scientific and technical conference of DSTU: abstracts. Makhachkala, RIO DSTU, 2005; 72-73 (In Russ)
8. Daniyalov M.G., Magomedov Kh.D., Aslanov G.K., Aslanov T.G. On one method for determining the source of an earthquake with the simultaneous determination of seismic wave velocities / Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Materials. Publishing house DSC RAS. Makhachkala 2010; 54-59. (In Russ)
9. D'Amico S. (ed.) *Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning In Tech.* Janeza Trdine, 2012; 460.
10. Robert Garotta. *Transverse waves: from registration to interpretation. A short course of lectures for higher educational institutions*, 2000; 3.
11. Schuster G.T. *Basics of Seismic Wave Theory*. University of Utah, 2007; 154.
12. Kasahara K. *Earthquake mechanics*. Cambridge University Press. 1981; 272.
13. Kennett B. *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*. Australian National University Press, 2009; 298p.
14. Yanovskaya T.B. *Fundamentals of seismology: textbook*. - St. Petersburg, 2008; 222. (In Russ)
15. Arkhangelsky V.T., Vedenskaya I.A., Gaisky V.N. *Manufacturing and Processing Guide*. Publication of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow, 1954 (In Russ)
16. Bystritskaya Yu.V. Correlation and comparison of macroseismic and instrumental data (Dagestan earthquakes). In the collection "Seismicity and hydrogeogas chemistry of the territory of Daghestan. Issue. 2 (17) Makhachkala 1978. (In Russ)
17. Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the error distribution density in determining the coordinates of the earthquake source using the methods of spheres and ellipsoids. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2019;46(2):61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70> (In Russ)
18. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake focus on calculation methods (spheres and hyperboloids). [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2017; 44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98> (In Russ)
19. T. G. Aslanov, Kh. D. Magomedov, U. A. Musaeva, and Kh. Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* No. 4 (43), 2016 - Makhachkala: DSTU, 2016; 73-84 (In Russ)
20. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter using various (combined) methods / Materials of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2015" / Ed. ed. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov. [Electronic resource] - M.: MAKSS Press, 2015. - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-04946-1 (In Russ)

- OSOV-2017" / Ed. ed. I.A. Aleshkovsky, A.V. Andriya-nov, E.A. Antipov. [Electronic resource] M.: MAKS Press, 2017 - 1 electron. opt. disc (DVD-ROM). ISBN 978-5-317-05504-2(In Russ)
21. Aslanov G.K., Aslanov T.G. Tagirov Kh.Yu. Study of the dependence of the location of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter on various methods for calculating coordinates / Week of Science - 2017: materials of the XXXVIII final scientific and technical conference of the DSTU, April 17-22, 2017, Makhachkala / Ed. d.t.s., prof. T.A. Ismailov. - Makhachkala, DSTU, 2017; 45-47. (In Russ)
 22. Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. On some issues of choosing seismic sensors in order to reduce errors in determining the hypocenter of an earthquake using various methods. Proceedings of the scientific-practical conference. Center for Seismic Data Analysis of Moscow State University named after M.V. Lomonosov". 2017; 256-259. (In Russ)
 23. Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of the error distribution density in determining the coordinates of the earthquake source using the methods of spheres and ellipsoids. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2019; 46(2): 61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70> (In Russ)

Сведения об авторах:

Сидоркина Юлия Анатольевна, доктор технических наук, доцент, кафедра автономных информационных и управляющих систем; sidyulia5969@yandex.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, доцент, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; tabasik@gmail.com; orcid: 0000-0002-5594-3554

Information about the authors:

Yulia A. Sidorkina, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department Autonomous Information and Control Systems; sidyulia5969@yandex.ru

Tagirbek G.Aslanov, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Cand., Assoc. Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; tabasik@gmail.com; orcid: 0000-0002-5594-3554

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.02.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 10.03.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 10.03.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.048

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

Оригинальная статья / Original Paper

Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания

Э.К. Агаханов¹, Г.М. Кравченко², М.И. Кадомцев², Е.В. Труфанова², Н.А. Савельева²

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

²Донской государственный технический университет,

²344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. В статье обоснована необходимость цифрового моделирования аварийного воздействия при исследовании устойчивости здания к прогрессирующему обрушению путем создания имитатора локального разрушения. **Метод.** Для обеспечения уникального архитектурного облика проектируемого multifunctional высотного комплекса разработана сложная форма с выемками, в которых располагаются лифтовые шахты. Соблюдается принцип управления конструкции за счет притока внешней энергии. Преобразование энергии и необходимая защита обеспечивается наличием в пространственном каркасе здания уравнивающих связей около архитектурных выемок, позволяющих стабилизировать состояние сложной системы. Пространственная жесткость конструктивной схемы высотного здания обеспечивается применением симметрично расположенных диафрагм и ядер жесткости, жестких узлов для сопряжения с несущими конструкциями аутригерных систем. **Результат.** Алгоритм расчета на прогрессирующее обрушение включает расчет напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания при нормальной эксплуатации. Создается аналог аварийного воздействия путем исключения из расчетной модели несущего элемента, мгновенное удаление которого моделируется усилием с обратным знаком, определенное по результатам расчета в стадии нормальной эксплуатации. **Вывод.** Напряженно-деформированное состояние каркаса, возникающее при локальном разрушении, является критерием устойчивости к прогрессирующему обрушению. Исследован вопрос о необходимости и устанавливаемой форме аутригерных этажей применительно к конкретному зданию. Приведена зависимость динамических характеристик при изменении конструктивных решений каркаса уникального здания.

Ключевые слова: цифровое моделирование прогрессирующего обрушения, параметрическая архитектура, высотные здания, метод конечных элементов, формы колебаний, напряженно-деформированное состояние, конструкция, аутригерный этаж

Для цитирования: Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, М.И. Кадомцев, Е.В. Труфанова, Н.А. Савельева. Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1): 87-94. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

Digital modeling of progressive collapse for high-rise building

E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, M.I. Kadomtsev, E.V. Trufanova, N.A. Savelyeva

¹Daghestan State Technical University,

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

²Don State Technical University,

²1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The article substantiates the need for digital simulation of emergency impact in the study of the stability of a building to progressive collapse by creating a simulator of local destruction. **Method.** To ensure the unique architectural appearance of the projected multifunctional

high-rise complex, a complex shape has been developed with recesses in which elevator shafts are located. The principle of control of the structure due to the influx of external energy is observed. Energy conversion and the necessary protection is provided by the presence in the spatial frame of the building of balancing connections near architectural recesses, which allow stabilizing the state of a complex system. The spatial rigidity of the structural scheme of a high-rise building is ensured by the use of symmetrically located diaphragms and stiffening cores, rigid nodes for interfacing with the supporting structures of outrigger systems. **Result.** The calculation algorithm for progressive collapse includes the calculation of the stress-strain state of the building frame elements during normal operation. An analogue of the emergency action is created by excluding from the design model the bearing element, the instantaneous removal of which is modeled by a force with the opposite sign, determined by the results of the calculation in the normal operation stage. **Conclusion.** The stress-strain state of the frame, which occurs during local destruction, is a criterion for resistance to progressive collapse. The question of the need and the established form of outrigger floors in relation to a specific building has been investigated. The dependence of the dynamic characteristics when changing the structural solutions of the frame of a unique building is given.

Keywords: digital modeling of progressive collapse, parametric architecture, high-rise buildings, finite element method, vibration modes, stress-strain state, structure, outrigger floor

For citation: E.K. Agakhanov, G.M. Kravchenko, M.I. Kadomtsev, E.V. Trufanova, N.A. Savelyeva. Digital modeling of progressive collapse for high-rise building. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 87-94. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-87-94

Введение. В современном мире актуальной проблемой для развивающихся мегаполисов с миллионной агломерацией является нехватка офисных помещений в центральных районах города. Причинами становятся плотная городская застройка, которая исторически сложилась в центральной части города, а также большая стоимость земельных участков. Возможным решением данной проблемы является строительство высотных офисных зданий. Безусловными достоинствами такого решения становится более эффективное использование площадей дорогостоящего земельного участка и сохранение естественных природных зон квартальной застройки.

Таким образом, появляется возможность сохранить баланс между индустриализацией города и развитием «зеленых» зон рекреации. Преимуществом можно назвать и тот факт, что строительство высотного здания позволяет сократить расходы на строительство и эксплуатацию офисных площадей. Важно, что подобные здания могут стать достопримечательностью и культурным центром города.

Стремительное развитие высотного строительства обусловлено значительным рядом факторов. К таким факторам можно отнести научно-технологический прогресс как в отрасли разработки и усовершенствования строительных материалов, так и в методах и средствах их расчета. Немаловажную роль играет развитие социума. Социальные и экономические факторы обуславливают тенденцию к увеличению высотности зданий и сооружений.

Постановка задачи. Запрос общества, в том числе крупных инвесторов и девелоперов, находит отклик в развитии строительной отрасли. Разрабатываются современные методы информационного моделирования зданий, связь программ для передачи аналитической и архитектурной модели бесшовна. Необходимость проведения точных расчетов несущих конструкций здания влечёт за собой усовершенствование методик и расчета. Учет нелинейных свойств материала позволяет наиболее точно смоделировать работу строительных конструкций в реальной жизни. Таким образом обеспечивается высокий уровень эксплуатационных характеристик здания, снижаются затраты на его эксплуатацию. В современных зданиях и сооружениях необходимо обеспечить безопасное пребывание людей. Для этого предлагается исключить вероятность прогрессирующего обрушения зданий при аварийном воздействии и снизить последствия такого воздействия на конструкции до минимума.

Для решения поставленной задачи предлагается цифровое моделирование аварийного воздействия и проведение серии численных экспериментов по усилению элементов каркаса уникального высотного здания.

Методы исследования. В инженерных науках и опыте сложился ряд рекомендаций по рациональному формообразованию. Однако, общие закономерности в науке формообразования еще не выявлены и не установлены [1]. На сегодняшний день в проектировании используется ряд критериев процедуры формообразования объектов строительства, таких как функциональность объекта, энергетический подход, экономичность строительства, эстетичность и современность облика здания и другие.

Оптимальное проектирование не только позволит внедрить энергосберегающие технологии, но и уменьшить вредное воздействие на природную среду обитания человека. Наряду с энергетическими аспектами весомый вклад в активное формообразование вносят идеи пространственности и управления конструкциями, преодоления неопределенности, обеспечение живучести и безопасности объекта архитектуры [2].

Для обеспечения уникального архитектурного облика проектируемого multifunctional высотного комплекса разработана сложная в плане форма с выемками, в которых располагаются лифтовые шахты. Соблюдается принцип управления конструкции за счет притока внешней энергии. Пропускимость и преобразование энергии происходит при различных формах обратной связи в управляемой системе [3]. Преобразование энергии и необходимая защита обеспечивается наличием в пространственном каркасе здания уравнивающих связей около архитектурных выемок, позволяющих стабилизировать состояние сложной системы.

Объектом исследования является объект уникального высотного multifunctional комплекса, имеющего сложную архитектурную и пространственную конструктивную форму (рис. 1а).

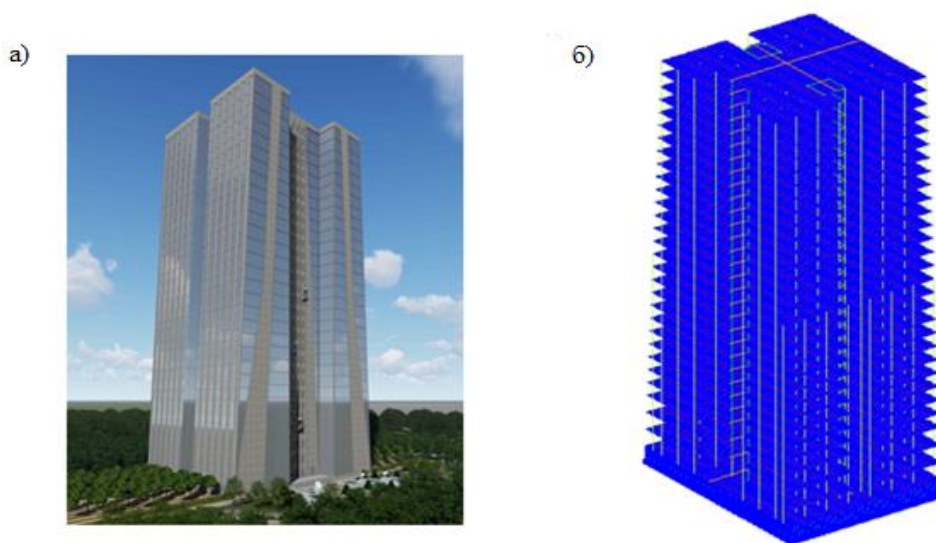


Рис. 1. Исследуемый объект:

а) визуализации здания; б) конечно-элементная модель

Fig. 1. Investigated object:

a) visualization of the building; b) finite element model

Моделирование каркаса уникального здания выполнено в программном комплексе Лира-САПР, основанном на методе конечных элементов. Программный комплекс реализует технологию информационного моделирования (BIM) и позволяет решать сложные задачи прочности и устойчивости конструкций [4].

Информационная модель выполнена с помощью стержневых элементов (колонны каркаса, горизонтальные элементы жесткости, элементы аутриггерных поясов) и оболочечных эле-

ментов (перекрытия, диафрагмы жесткости и стены подвала). В стадии нормальной эксплуатации материал несущих конструкций обладает линейно упругими свойствами (рис.1 б).

Для обеспечения общей горизонтальной жесткости модели здания, а также для усиления противодействия ветровым нагрузкам прямоугольных выемок по боковым фасадам здания предусмотрено устройство балок сечением 400х400мм по всей высоте здания (рис. 2).

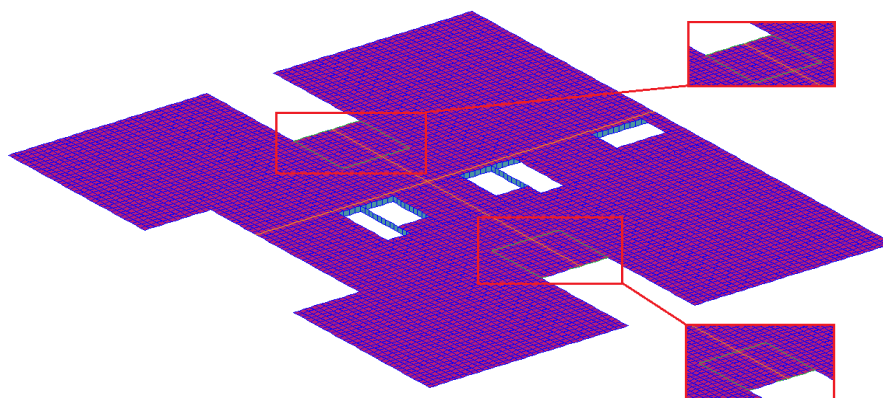


Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты перекрытия
Fig. 2. Finite element model of the floor slab

Для обеспечения пространственной жесткости каркаса высотного здания применена симметричная расстановка вертикальных несущих конструкций, жесткие узлы для сопряжения несущими конструкциями, аутригерные системы [5].

Алгоритм расчета на прогрессирующее обрушение состоит из следующих этапов:

- расчет напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания при нормальной эксплуатации;
- из расчетной модели исключается несущий элемент, мгновенное удаление которого моделируется усилием с обратным знаком, определенное по результатам расчета в стадии нормальной эксплуатации;
- определение напряженно-деформированного состояния каркаса, возникающее при локальном разрушении;
- анализ результатов расчета (проверка несущей способности элементов, критериев устойчивости, прогибов);
- при невыполнении условий проверки выполняется корректировка исходной расчетной схемы, и вновь выполняются расчет на прогрессирующее обрушение.

Места установки аутригерных этажей носят лишь рекомендательный характер, что позволяет исследовать вопрос о необходимости и устанавливаемой форме аутригерных этажей применительно к конкретному зданию [6].

Обсуждение результатов. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния каркаса уникального здания в стадии нормальной эксплуатации (рис. 3 а).

Определен самый нагруженный элемент расчетной модели - колонна первого этажа. На втором этапе выключен из работы самый нагруженный несущий элемент.

Таким образом, получена расчетная схема для имитационного моделирования прогрессирующего обрушения. Расчет выполнен шагово-итерационным методом с использованием нелинейного процессора. Шаг нагружения выбран автоматически с учетом его истории. Результаты расчета по вертикальным перемещениям с учетом цифрового моделирования аварийной ситуации по сценарию локального разрушения приведены на рис. 3б [7].

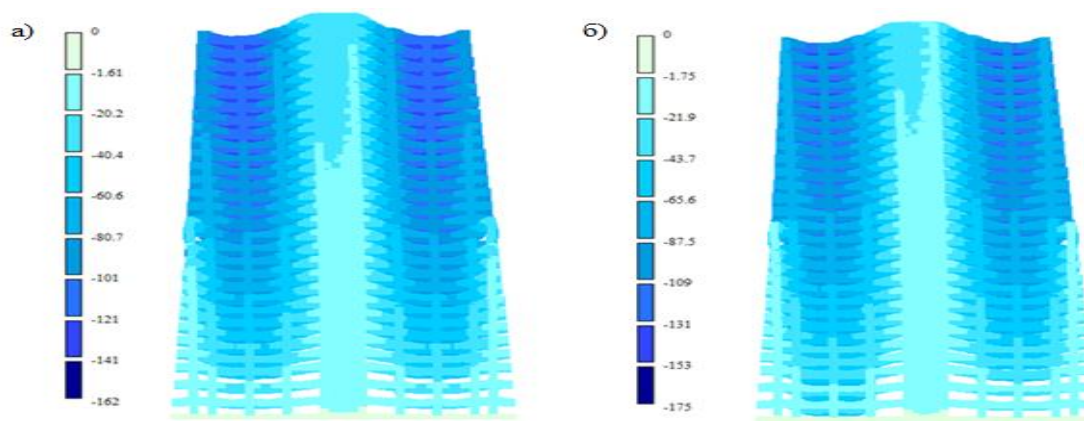


Рис. 3. Вертикальные перемещения: а) нормальная стадия эксплуатации 1 варианта каркаса; б) аварийное воздействие на 1 вариант каркаса
Fig. 3. Vertical movements: a) the normal stage of operation of the 1st frame option; b) emergency impact on frame variant 1

Анализ результатов расчета в стадии нормальной эксплуатации и аварийном воздействии показал, что вертикальные прогибы элементов каркаса превышают допустимые.

Для обеспечения общей устойчивости каркаса здания, а также как мероприятие для защиты от возможного обрушения, решено ввести аутригерные этажи в конструктивную схему [8, 9]. Аутригерные конструкции расположены на одном из нижних этажей, а также на этаже с предусмотренным уменьшением количества колонн. Для более рационального перераспределения напряжений к жесткому ядру здания и для облегчения веса аутригерных конструкций, обеспечения унификации элементов и уменьшения экономических затрат по их возведению принято решение выполнить аутригерные этажи в форме железобетонных ферм [10, 11]. В этом случае раскосы ферм передадут сжимающие усилия на последующие колонны в направлении жесткого ядра каркаса. Результаты расчета 2 варианта конструктивной схемы при моделировании аварийного воздействия приведены на рис. 4а.

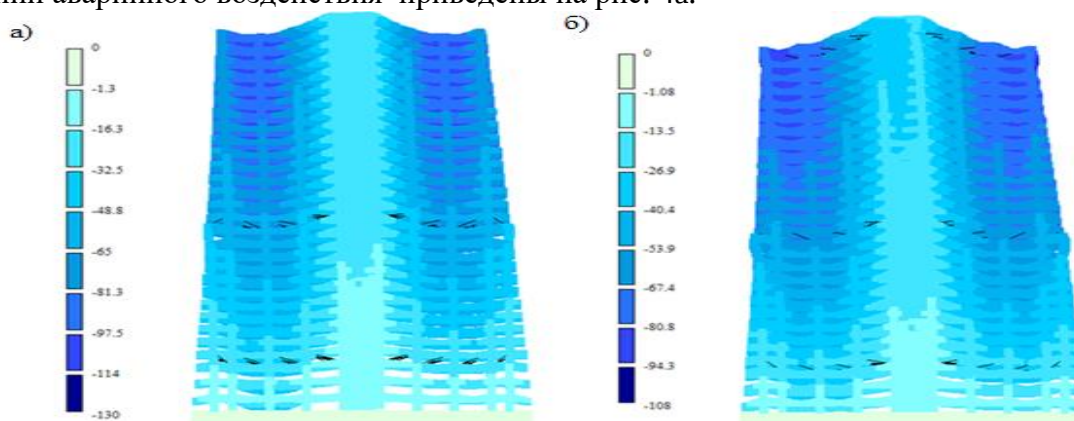


Рис. 4. Вертикальные перемещения: а) аварийное воздействие на 2 вариант каркаса; б) аварийное воздействие на 3 вариант каркаса

Fig. 4. Vertical movements: a) emergency action on the 2nd version of the frame; b) emergency action on frame option 3

Максимальный прогиб все еще больше установленного предельно допустимого значения $f/50$. Решено установить дополнительный аутригерный этаж в уровне верхнего технического этажа. Результаты расчета для третьего варианта конструктивной схемы каркаса с учетом имитатора аварийного воздействия показаны на рис. 4б. Результатом введения дополнительного аутригерного этажа явилось полное соблюдение критериев проверки несущей способности элементов конструктивной системы: прогиб изгибаемых элементов не превышает $1/50$ длины пролета; все элементы системы сохраняют устойчивость.

Выполнен модальный анализ расчетной схемы окончательного варианта каркаса здания [12-15]. Первые две формы колебаний носят поступательный характер, третья – изгибный, т.е. установка трех аутригерных этажей убрала из низших форм колебаний крутильный эффект (рис. 5).

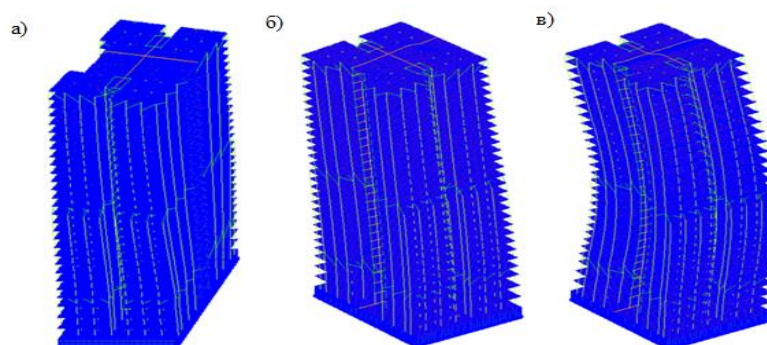


Рис. 5. Главные формы колебаний: а) 1 форма; б) 2 форма; в) 3 форма

Fig. 5. Main modes of oscillation: a) 1 form; b) 2 form; c) 3 form

Исследована зависимость частот колебаний при изменении конструктивных решений каркаса уникального здания [16-18].

Сравнение результатов динамических характеристик трех вариантов каркаса здания представлено в графическом виде (рис. 6).

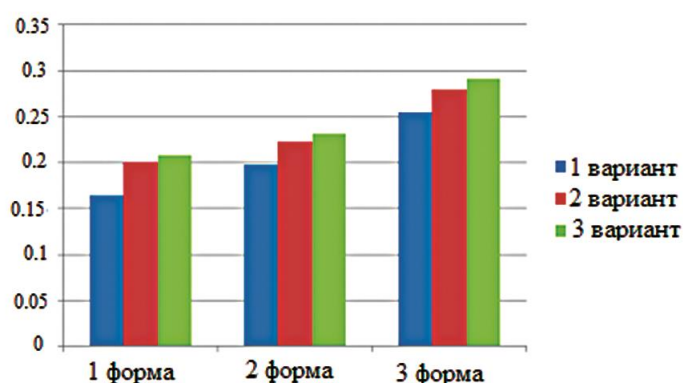


Рис. 6. Сравнение частот собственных колебаний по трем вариантам каркаса

Fig. 6. Comparison of natural vibration frequencies for three frame options

В результате рационального конструирования каркаса уникального здания удалось снизить частоты собственных колебаний на 10-26%

Вывод. Для предупреждения прогрессирующего обрушения высотного здания выполнено цифровое моделирование аварийного воздействия. Разработан имитатор локального разрушения несущего элемента каркаса здания [19, 20]. При проведении серии численных экспериментов на аварийное воздействие учтена нелинейная работа материала.

В результате исследования каркаса здания с учетом аварийного воздействия разработана конструктивная схема уникального здания с тремя аутригерными этажами на отметках +13.800, +52.300, +101.300 (4-й, 15-й, 29-й этажи надземной части).

Подтверждением необходимости включения в расчетную схему данных конструкций явилось уменьшение вертикальных перемещений элементов каркаса здания и обеспечение его устойчивости. Анализ нескольких вариантов конструктивного исполнения элементов каркаса позволил выполнить требования об обеспечении общей устойчивости здания многофункционального комплекса и обеспечить выполнение требований, предусмотренных нормативно-правовыми актами.

По результаты исследований также предлагаются следующие рекомендации:

- увеличение жесткости каркаса в отношении скручивающих форм деформаций;

- выполнение мероприятий по усилению наиболее нагруженных элементов: колонн и плит перекрытий в области сопряжения плиты с колонной;
- выполнение мероприятий по усилению консольных свесов плит перекрытий.

На основании принципа системности в соответствии с теорией формообразования конструкций предложено элементы здания частично выполнить из стеклянных панелей. Это позволило сгладить строгую угловатую форму здания и визуально увеличить угол наклона боковых фасадов относительно вертикальной оси ядра жесткости.

Благодаря полученному окончательному варианту процесса формообразования, здание приобрело строгий, монументальный, но в тоже время мягкий и современный минималистический вид. Проект многофункционального комплекса способен привлечь внимание инвесторов в процессе строительства, а в будущем стать символом делового района и города.

Библиографический список:

1. Ereemeeva A.A., Pomorov S.B., Pojdina T.V. (2014) Parametris in architecture. Searches and solution. Barnaul, 118–122.
2. Mamieva I (2020) Analytical surfaces for parametric architecture in contemporary buildings and structures, Academia. *Architecture and Construction* №1, 150–165
3. Kravchenko G, Trufanova E, Boldyrev A (2018) Evolution of objects of parametris Constr Archit 6(4):44–4
4. V. Talapov BIM technology: The essence and features of building information modeling implementation, DMK-press, 410 (2015)
5. N. V. Fedorova, S. Yu. Savin. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. – 2021. – No 3(95). – P. 76-108.
6. Kiakojour F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Eng. Struct. Elsevier*, 2020. Vol. 206, December 2019. P. 110061
7. Агаханов Г.Э. Решение задач механики деформируемого твердого тела с использованием фиктивных расчетных схем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - № 3. – 2015 с. 8-15.
8. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Панасюк Л.Н., Труфанова Е.В. Реализация метода кинематической декомпозиции для расчетов в нелинейной постановке. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014, Т. 35, №4.- с. 14-19..
9. Абдуразаков Г.М., Абакаров А.Д. Построение расчетных моделей оценки живучести рамных систем при сейсмическом воздействии в сборнике: вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2015. с. 58-61.
10. Adam J.M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Eng. Struct. Elsevier*, 2018. Vol. 173, № March. P. 122-14
11. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2013.с. 14-19.
12. Кравченко Г.М., Коробкин А.П., Труфанова Е.В., Лукьянов В.И. Критерии оценки динамических моделей железобетонного каркаса здания, *Science Time*, 2014, с. 255-260.
13. Муртазалиев Г.М., Акаев А.И., Пайзулаев М.М. Основные соотношения начального этапа послекритического деформирования конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 28. С. 90-93.
14. Муртазалиев Г.М., Дибиргаджиев А.М. Вариационные принципы механики конструкций. Сборник тезисов докладов XXXVI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Под ред. Т.А. Исмаилова. 2015. с. 118-119.
15. Агаханов Э.К. Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела, Материалы Международной научно-практической конференции, ФГБОУ ВПО "ГТНТУ", г. Грозный, 2015. с. 99-105.
16. G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, D. S. Kostenko, S. G. Tsurikov. Structural concepts of high-rise buildings resistant to progressive collapse. *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 931. – P. 54-59.
17. Труфанова Е.В., Панасюк Е.Л. Влияние упрощающих гипотез при моделировании объектов строительства на точность конструктивных результатов. *Наука и бизнес: пути развития*. 2013. № 8 (26). с. 11-18.
18. Bath K.-J. Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice Hall, 1996.с.95-97.
19. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1967. с.23-24.
20. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. *Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004*.с.98-99.

References:

1. Ereemeeva AA, Pomorov SB, Pojdina TV (2014) Parametris in architecture. Searches and solution. Barnaul, 118–122
2. Mamieva I. Analytical surfaces for parametric architecture in contemporary buildings and structures, Academia. *Architecture and Construction*. 2020; 1:150–165
3. Kravchenko G, Trufanova E, Boldyrev A. Evolution of objects of parametris Constr Archit.2018; 6(4):44–4
4. V. Talapov BIM technology: The essence and features of building information modeling implementation, DMK-press, 2015; 410.
5. N. V. Fedorova, S. Yu. Savin. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021; 3(95): 76-108.
6. Kiakojour F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Eng. Struct. Elsevier*, December 2019. 2020; 206: 110061.

7. Agaxanov G.E. Reshenie zadach mexaniki deformiruемого твердого тела s ispol'zovaniem fiktivny'x raschetny'x sxem / [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2015; 3: 8-15. (In Russ)
8. Agaxanov E.K., Kravchenko G.M., Panasyuk L.N., Trufanova E.V. Realizatsiya metoda kinematoicheskoy dekompozitsii dlya raschetov v nelinejnoj postanovke. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2014; 35(4):14-19 (In Russ)
9. Abdurazakov G.M., Abakarov A.D. Postroenie raschetny'x modelej ocenki zhivuchesti ramny'x sistem pri seismicheskom vozdeystvii v sbornike: voprosy` sovremenny'x texnicheskix nauk: svezhij vzglyad i novy'e resheniya. Sbornik nauchny'x trudov po itogam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2015; 58-61. (In Russ)
10. Adam J.M. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. Eng. Struct. Elsevier, 2018; 173 (March): 122-14
11. Agaxanov E.K. O razvitii kompleksny'x metodov resheniya zadach mexaniki deformiruемого твердого тела». [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki], 2013; 14-19. (In Russ)
12. Kravchenko G.M., Korobkin A.P., Trufanova E.V., Luk'yanov V.I. Kriterii ocenki dinamicheskix modelej zhelezobetonnoyo karkasa zdaniya, Science Time, 2014; 255-260. (In Russ)
13. Murtazaliev G.M., Akaev A.I., Pajzulaev M.M. Osnovny'e sootnosheniya nachal'nogo e'tapa poslekriticheskogo deformirovaniya konstrukcij. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Texnicheskie nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2013;28: 90-93. (In Russ)
14. Murtazaliev G.M., Dibirgadzhiyev A.M. Variatsionny'e principy` mexaniki konstrukcij. Sbornik tezisov dokladov XXXVI itogovoy nauchno-texnicheskoy konferentsii prepodavatelej, sotrudnikov, aspirantov i studentov FGBOU VO «Dagestanskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet». Pod red. T.A. Ismailova. 2015;118-119. (In Russ)
15. Agaxanov E.K. Razvitie kompleksny'x metodov v mexanike deformiruемого твердого тела, Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, FGBOU VPO "GGNTU", g. Grozny`j, 2015; 99-105. (In Russ)
16. G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, D. S. Kostenko, S. G. Tsurikov. Structural concepts of high-rise buildings resistant to progressive collapse. *Materials Science Forum*. 2018; 931: 54-59. (In Russ)
17. Trufanova E.V., Panasyuk E.L. Vliyanie uproshhayushhiy gipotez pri modelirovanii ob'ektov stroitel'stva na tochnost` konstruktivny'x rezul'tatov. [Nauka i biznes: puti razvitiya] Science and business: ways of development. 2013;8 (26): 11-18. (In Russ)
18. Bath K.-J. Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice Hall, 1996; 95-97.
19. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1967; 23-24.
20. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004; 98-99.

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы», Elifhan@bk.ru

Кравченко Галина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика», доцент, galina.907@mail.ru

Кадо́мцев Максим Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Медиа-технологии», kadomtsev@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика», el.trufanova@mail.ru

Савельева Нина Александровна, старший преподаватель кафедры «Техническая механика», ninasav86@mail.ru

Information about the authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Transport Facilities and Building Materials, Elifhan@bk.ru
Galina M. Kravchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics, Associate Professor, galina.907@mail.ru

Maksim I. Kadomtsev, Cand. Sci. (Phys. and Mathem.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Media Technologies, kadomtsev@mail.ru

Elena V. Trufanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics, el.trufanova@mail.ru

Nina A. Savelyeva, Senior Lecturer, Department of Technical Mechanics, ninasav86@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 24.01.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 05.02.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 05.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.048

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-95-103

Оригинальная статья / Original Paper

Основные категории экологической оценки территории строительства

А.Л. Большеротов

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб.Аф. Никитина, 22, Россия

Резюме. Цель. Целью данной работы является разработка методики объективной оценки экологической безопасности строительных объектов и территорий застройки. **Метод.** Исследование основано на концептуальном подходе к оценке экологической безопасности строительных объектов и территорий. **Результат.** Предложена методика оценки экологической безопасности объектов строительства; определены критерии оценки территории застройки; предложены методы решения проблем застройки территорий и их экологической безопасности. В качестве способа оценки разработан и принят коэффициент «степень концентрации недвижимости». Введены понятия «экологический резерв», «порог экологической безопасности», «диапазон устойчивого состояния», что позволяет достоверно оценить возможности территорий по размещению строительных объектов с различным техногенным потенциалом. **Вывод.** Необходимо законодательно закрепить, как обязательную, процедуру оценки «степени концентрации недвижимости» по административным территориям, особенно при планировании строительства жилого фонда по программе реновации, при землеотводе под новое строительство, при оценке воздействия на окружающую среду при проектировании и экспертизе проектов строительства.

Ключевые слова: концентрация строительства (недвижимости), критерии оценки степени концентрации строительства, экология, экспертиза строительства, экологический паспорт территорий, экологическая безопасность, степень концентрации недвижимости, экологический резерв, порог экологической безопасности

Для цитирования: А.Л. Большеротов. Основные категории экологической оценки территории строительства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 95-103 DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-95-103

Basic environmental assessment of the construction area

A.L. Bolsherotov

Tver State Technical University,
22 Af. Nikitina seafront, Tver 170026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this work is to develop a methodology for an objective assessment of the environmental safety of construction sites and development areas. **Method.** The study is based on a conceptual approach to assessing the environmental safety of construction sites and territories. **Result.** A methodology for assessing the environmental safety of construction objects is proposed; the criteria for assessing the development area are determined; methods for solving the problems of development of territories and their environmental safety are proposed. As a method of assessment, the coefficient "degree of real estate concentration" was developed and adopted. The concepts of "environmental reserve", "threshold of environmental safety", "sustainable state range" are introduced, which makes it possible to reliably assess the possibilities of territories for the placement of construction objects with different technogenic potential. **Conclusion.** It is necessary to legislate, as a mandatory procedure, the procedure for assessing the "degree of concentration of real estate" in administrative territories, especially when planning the construction of a housing stock under the renova-

tion program, when allocating land for new construction, when assessing the environmental impact in the design and examination of construction projects.

Keywords: construction (real estate) concentration, criteria for assessing the degree of construction concentration, ecology, construction expertise, environmental passport of territories, environmental safety, degree of real estate concentration, environmental reserve, environmental safety threshold

For citation: A.L. Bolsherotov. Basic environmental assessment of the construction area. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (1): 95-103 DOI: 10.21822 / 2073-6185-2022-49-1-95-103

Введение. Современные города отличаются достаточно высокой плотностью застройки из-за высокого спроса на землю. Плотность застройки одновременно с высокими темпами автомобилизации населения приводит, в свою очередь, к комплексу проблем экологической безопасности селитебных территорий. Решение экологических проблем особенно актуально именно для селитебных территорий.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка методики объективной оценки территорий согласно определению, данному ООН и Экологической доктриной РФ [1] - обеспечение экологической безопасности, это обеспечение качества жизни, здоровья населения и сохранение живой природы.

Методы исследования. Методики комплексной оценки территории до настоящих исследований не разрабатывалось. В работах Слесарева М.Ю., Бакаевой Н.Д. и других авторов даны некоторые локальные подходы к оценке отдельных объектов строительства, например, автозаправок, но эти подходы не отвечают на главный вопрос: каково экологическое состояние селитебной территории со всеми вместе объектами инфраструктуры.

В населённых пунктах, особенно в крупных городах, плотность застройки территорий – *степень концентрации недвижимости единицы площади территории* – и определяет уровень экологической безопасности, то есть качество жизни и здоровье населения.

Степень концентрации недвижимости – это универсальный показатель экологической безопасности, рассчитываемый по заданному критерию, именно решению этой задачи посвящена данная работа. В качестве критерия может быть выбрана наиболее актуальная проблема селитебной территории в каждом конкретном месте. Это может быть уровень загрязнения атмосферы, уровень шума, уровень электромагнитного излучения, криминогенность территории, обеспеченность социальной инфраструктурой, перенаселённость и т.д. Или это могут быть несколько важных в данном месте и в данное время критериев.

Степень концентрации – это численное значение выбранного критерия. По аналогии с ПДК (предельно допустимой концентрацией загрязняющих веществ) за безопасный уровень степени концентрации принято его значение ≤ 1 .

Для современных населённых пунктов, особенно крупных городов, наиболее актуальным критерием расчёта «степени концентрации» является переизбыток автомобилей и обеспеченность их парковочными местами.

Несколько десятилетий назад, когда разрабатывались первые градостроительные планы застройки территорий, действовали нормативы [2] обеспечения жителей придомовой территорией и обеспеченности жителей домов парковочными местами, которые появились в период массового жилищного строительства 50-60-х годов прошлого столетия по общесоюзной программе обеспечения каждого жителя отдельной квартирой. Застройка городов осуществлялась в те годы в основном панельными пятиэтажками. Так называемые Новые Черёмушки в Москве предусматривали для среднего 4-х подъездного дома, в котором проживало 180-250 жителей 10000м² придомовой территории с детскими площадками, скверами, клумбами, газонами, фонтанами. Это примерно 40-55м² придомовой территории на одного человека. Кроме того, предусматривалось по нормативу 30 парковочных мест для личного автотранспорта на 1000 жителей,

то есть 4-х подъездная пятиэтажка имела 7-8 парковочных мест. Этого вполне хватало при уровне автомобилизации населения тех времён.

В современной программе реновации абсолютно не предусмотрено решение проблемы парковки автомобилей жителей новых домов. Застройщику не вменено обременение в виде обязательного обеспечения жителей парковочными местами, строительство паркингов и пр. Эту проблему власти города оставляют для решения будущим поколениям, но проблема крайне актуальна уже сейчас. Это касается не только территорий застройки по программе реновации. Такая же проблема в любом другом районе Москвы. Из-за высокого спроса на землю и высокой стоимости земли в Москве и других столичных административных центрах ведётся практически повсеместно уплотнение существующей застройки. Это может быть вариант, так называемой, точечной застройки в уже сложившихся территориях, это может быть реконструкция существующей застройки с обязательным повышением этажности зданий.

Характерным примером непродуманности проектов застройки территорий является строительство высотного административного центра Москва-Сити на Краснопресненской набережной в Москве. Здесь на 1 (одном) квадратном километре территории построены офисные высотные здания высшей категории А на 350 тысяч рабочих мест в основном для крупных компаний. Парковочных мест на первых 5-10 этажах зданий построено только 16 тысяч [14]. Аналогичные проблемы возникали и возникают по всему миру и методы борьбы с переуплотнённой застройкой с транспортной проблемой, с проблемой парковок разные.

Так в Будапеште (Венгрия), в центре города, где характерна сплошная застройка без разрывов между зданиями, проблема парковки решена радикально – часть исторических зданий были превращены в многоэтажные парковки. Внешне здание осталось прежним и исторический вид города не изменился, но внутри вместо жилых помещений устроены парковочные пространства. Это трудоёмкий и дорогой путь. Фактически от здания остаются только внешние стены. Все внутренние межэтажные перекрытия демонтируются, так как они не выдерживают нагрузку от автомобилей, и возводятся новые. Высота этажей зданий позволяла сохранить этажность здания в целом. Доставка автомобилей на этажи осуществляется лифтами.

Японский опыт предусматривает в частности строительство рядом с квартирой гаража, куда жилец поднимается вместе с автомобилем. Есть технические решения в виде многоярусных каскадных парковок различной конструкции во дворах. Общий минус любого решения – высокая стоимость проекта. В Бразилии в 50-х годах прошлого века приняли наиболее радикальное решение транспортной проблемы столичного Рио-де-Жанейро. Столицу построили с нуля на новом месте на горном плато в 1160 километрах в глубине страны.

Испанский градостроитель-архитектор Лусио Коста спланировал новую столицу в виде большой бабочки или самолёта. Все правительственные учреждения размещены в центральной части – в фюзеляже (архитектор Оскар Нимейер) [15]. Правительственный квартал растянулся на несколько километров, к каждому ведомству ведут десятки дорог, что полностью решает проблему перегруженности правительственных дорог. В крыльях бабочки размещены жилые кварталы со всей инфраструктурой, причём этажность зданий не превышает 4-6 этажей и под каждым жилым домом построен двухэтажный гараж для каждого взрослого жителя дома. Наверху только зелёные парковые пространства. Город был рассчитан на 200 тыс. жителей. Но постепенно город стал разрастаться вопреки концепции Лусио Коста и сейчас город Бразилиа насчитывает более 2500 тыс. человек, там строятся высотные здания, увеличивается плотность застройки со всеми вытекающими транспортными проблемами, хотя не такими острыми, как были в Рио-де-Жанейро.

Избежать существующих проблем селитебных территорий, особенно транспортной, парковочной, экологической можно исключительно научно обоснованными подходами и методами.

Одним из эффективных оценочных инструментов селитебных территорий является методика расчёта «степени концентрации» недвижимости – основной показатель экологической безопасности. Расчёт показателя «степени концентрации» позволяет обоснованно принимать

решение о возможности нового строительства на уже застроенных территориях. Показатель «степени концентрации» в виде численного значения показывает насколько серьёзна проблема экологической безопасности территории. Показатель «степени концентрации» является основной экологического паспорта территории [16-18].

Для расчёта «степени концентрации» необходимо определить наиболее актуальный критерий оценки экологической безопасности в данном месте в данное время. В качестве приоритетных критериев рассматриваются, в первую очередь, показатель психосоматического здоровья населения и качество жизни, нормативы застройки территорий, экономический, экологический – это общие для всех территорий критерии. В качестве частных, дополнительных к основным критериями оценки, могут быть – культурологические, социальные, исторические, политические, национальные и пр.

Обсуждение результатов. Рассмотрим и оценим возможность принятия в качестве рабочего критерия основные критерии оценки.

1. *Показатель психосоматического здоровья населения и качества жизни.* Точечная застройка вызывает крайне негативную эмоциональную реакцию населения. Люди расценивают такую застройку, как вторжение в личное жизненное пространство. Учитывая это, проводятся общественные экологические слушания проекта застройки, выясняется мнение жителей. Однако общественные слушания не имеют юридической силы, но часто мнение людей субъективно, и не может отражать фактическое техногенное воздействие нового объекта строительства на качество жизни и здоровье людей. Поэтому данный критерий не может быть принят в качестве основного критерия при оценке «степени концентрации» из-за субъективизма.

2. *Нормативы застройки территории.* Существующие нормативы застройки территории должны основываться на показателе «степени концентрации», на экологических показателях, а не наоборот. Поэтому нормативы застройки нельзя принимать в качестве критерия оценки «степени концентрации».

3. *Экономический.* С экономической точки зрения высокая плотность застройки, является наиболее выгодной, но это и создаёт экологические проблемы. Экономика и экологическая безопасность это два антагонистических подхода, поэтому экономический критерий не может быть принят в качестве основного критерия оценки «степени концентрации».

4. *Экологический.* Данный критерий в наибольшей степени отвечает поставленной задаче, но расчёт «степени концентрации» по экологическому критерию усложняется прогнозированием экологических воздействий нового объекта строительства. Расчёт воздействий индивидуален для каждого объекта, показатели воздействия зависят от места проведения строительных работ, от этапа жизненного цикла объекта. На стадии строительства негативное техногенное воздействие одно, во время эксплуатации другое, особенно, если объект промышленного назначения. Кроме того, существует опосредованное воздействие, которое крайне трудно прогнозируется.

Прямое техногенное воздействие, это сумма воздействий разных видов и объёмов загрязнений.

$$\sum_{k=n}^m V_{sk} + \sum_{k=n}^m R_k > 0 \quad (1)$$

где, V – величина загрязнения; S_k – вид загрязнения; R_k – вид воздействия.

Основной объект строительства всегда имеет опосредованное воздействие на окружающую среду в виде, например, дополнительного транспортного потока к данному объекту. К основному воздействию следует добавить и опосредованное:

$$\sum_{k=n}^m V_{sk} + \sum_{k=n}^m R_k + \sum_{k=n}^m O_k > 0 \quad (2)$$

Опосредованное воздействие на урбанизированных территориях создаётся в основном автотранспортом (табл.1) [19, 20], его доля в общем загрязнении окружающей среды превышает 93%.

Таблица 1. Загрязнение атмосферы г. Москвы (тыс. тонн/год)
Table 1. Air pollution in Moscow (thousand tons/year)

Год/ Year Вид загрязнения Type of pollution	1991	1995	1997	1998	2000	2003	2005	2007	2017
Все источники All sources	1134	1828	1852	1601	1928	1971	2082	2190	2474
Промышленность Industry	307	186	152	141	164	166	171	178	164
Автотранспорт Motor transport	827	1642	1700	1460	1764	1805	1911	2012	2310
Доля автотранспорта в % Share of vehicles in %	72,9	89,8	91,8	91,2	91,5	91,6	91,8	91,9	93,4

Из табл. 1 видно, что основным техногенным фактором на урбанизированных территориях является транспорт, в первую очередь автомобильный. Высокая концентрация строительства, в свою очередь, является катализатором транспортной проблемы, а с ней и экологической. В табл. 2. приведены виды возможных загрязнений в искусственной экосистеме и основные источники загрязнений.

Таблица 2. Виды и основные источники загрязнения искусственных экосистем
Table 2. Types and main sources of pollution of artificial ecosystems

Вид загрязнения/ Type of pollution	Основной источник загрязнения/ Main source of pollution
Загрязнение атмосферы/ Air pollution	Транспорт свыше 91% Промышленность менее 9 % Transport over 91% Industry under 9%
Загрязнение поверхностных ливневых вод/ Surface storm water pollution	Транспорт Transport
Загрязнение почвы/ Soil pollution	Транспорт Transport
Шумовое загрязнение/ Noise pollution	Транспорт Transport
Тепловое загрязнение/Thermal pollution	Промышленность, транспорт Industry, Transport
Загрязнение и воздействие на городскую природу/Pollution and impact to urban nature	Транспорт, промышленность Transport, Industry
Электромагнитное загрязнение/ Electromagnetic pollution	Электротранспорт. Линии электропередач, трансформаторы, электроустановки, электротехника. Electric transport (ground and underground). Power lines, transformers, electrical installations, electrical engineering
Высокочастотное загрязнение/ High frequency pollution	Бытовые приборы, телефоны, средства связи, промышленные установки. Household appliances, telephones, communications equipment, industrial installations

Для города Москвы сегодня показатель обеспеченности населения автомобилями составляет в среднем около 500 автомобилей на 1000 жителей. Это не предельный показатель, в развитых странах эта цифра достигает 700. Если же исходить из статистики возрастной структуры населения по разным регионам мира [21], то количество населения в возрасте, в котором можно пользоваться автомобилем (в среднем с 18 лет) составляет (табл. 3.):

Таблица 3. Доля населения, имеющая право пользоваться автомобилями (в %)
Table 3. Proportion of the population with the right to use cars (in %)

Регион/ Region	Доля (в %) населения, имеющая право пользоваться автомобилями/ Proportion (in %) of the population with the right to use cars
Азия Asia	49
Европа Europe	69
Северная Америка North America	71
Южная Америка South America	58
Австралия и Океания Australia and Oceania	68
Африка Africa	55
Россия Russia	68

Поэтому в качестве показателя обеспеченности населения автомобилями следует принять максимальную цифру с расчётом на перспективу, равную доле населения, имеющего право водить автомобиль в России, а именно 68. Коэффициент k_l , учитывающий количество личного автотранспорта будет равен:

$$k_l = \frac{N}{1000}, \quad (3)$$

где N – количество автомобилей на 1000 жителей.

Количество личных автомобилей N_l данной территории будет равно:

$$N_l = Q_l k_l, \quad (4)$$

где Q_l – численность населения территории.

Величина N_{ml} устанавливается по фактическому состоянию движения производственного транспорта по данной территории.

Важное значение для экологического состояния территории имеет пропускная способность магистралей. Именно транзитных магистралей общего пользования данного района, по которым проезжает любой транзитный транспорт.

Из анализа вышеназванных критериев, можно сделать вывод, что увеличение плотности застройки ведёт к увеличению значения степени концентрации недвижимости и опосредованно увеличивает количество автотранспорта на территории, активно загрязняющего окружающую среду. Количество автотранспорта, размещённого на территории, пользующегося территорией временно или постоянно является, на сегодня главным критерием оценки степени концентрации строительства (недвижимости) административной единицы территории селитебной зоны.

Рассмотрим причины концентрации строительства (недвижимости) и пути решения проблемы. В качестве первой причины появления завышенного показателя степени концентрации (k_{sk}) строительства (недвижимости) [16], по сравнению с нормой равной ≥ 1 , можно назвать глобализацию мировой экономики, т.е. экономические интересы бизнеса и общества. Особенно этот фактор проявляется в Москве и других крупных городах, где высока стоимость земли и, соответственно, высока стоимость объектов недвижимости. Крупные города становятся очень притягательны для бизнеса. Коммерческие компании со всего мира стремятся или войти со своим бизнесом в крупные города или, хотя бы, открыть своё представительство как можно ближе к структурам, принимающим решения.

В крупных городах сохраняется высокий спрос на коммерческую и жилую недвижимость. Соответственно, застройщик стремиться «выжать» из арендованной под застройку площади земельного участка максимум прибыли. Отсюда стремление высотной застройки. А вот решение попутных социальных задач законодательно в нашей стране никак не оговорено. Местные власти оговаривают обременения для застройщика, если ведётся строительство крупных жилых микрорайонов, но только по строительству детских садов, школ и прочих социальных объектов. Как правило, никогда обременение не касается строительства парковочных мест.

В связи с этим любые дополнительные затраты, в том числе на защиту окружающей среды, на экологию, которые повышают себестоимость продукции и снижают рентабельность

строительного производства, ставят под угрозу проигрыша застройщика в конкурентной борьбе за рынок недвижимости. Это и приводит к вышеописанным проблемам высокой «степени концентрации» недвижимости.

Таким образом, можно сделать вывод, что второй причиной концентрации строительства (недвижимости) является конкурентная борьба за рынок, как одно из следствий глобализации экономики. Уйти от глобализации, от рынка возможно, но только при полной изоляции, что не в интересах страны и будущих поколений.

Помимо экономических причин концентрации ресурсов, в том числе и строительного производства, существуют также политические, социальные, культурологические, исторические, национальные и другие причины, также имеющие тенденцию притяжения к центру и концентрации в крупных городах. В связи с этим, третье причиной концентрации строительства (недвижимости) является централизация управления.

Четвёртой причиной повышения концентрации строительства (недвижимости) является существующее административное деление субъектов федерации. Например, Московская область и город Москва, Минск и Минская область – это разные административные единицы, но та же Москва не может решать свои проблемы с нехваткой территорий за счёт пустующих территорий области. Невозможность выселить из города, задыхающегося от переизбытка населения, нехватки территорий приводит к очередному витку концентрации недвижимости – город вынужден решать свои проблемы только на своей территории. Повышение концентрации недвижимости становится причиной и ведёт к ухудшению экологической обстановки в городе, в частности и в первую очередь за счёт транспорта, который даёт 93,4% загрязнения [16].

Вывод. Что можно сделать для снижения показателя «степени концентрации»?

В первую очередь, необходимо законодательно закрепить, как обязательную, процедуру оценки «степени концентрации недвижимости» по административным территориям, особенно при планировании строительства жилого фонда по программе реновации, при землеотводе под новое строительство, при проведении ОВОС (оценке воздействия на окружающую среду) при проектировании и экспертизе проектов строительства.

Проведённые в этом направлении исследования подтвердили верность предположения о взаимосвязи транспортной проблемы и проблемы экологической безопасности городов. Коэффициент степени концентрации, рассчитанный для г. Москвы, оказался выше нормативной единицы для всех без исключения округов города. В табл. 4 приведены сводные данные г. Москве.

Таблица 4. Коэффициента степени концентрации (k_{sk}) для округов г. Москвы

Table 4. Coefficient of degree of concentration (k_{sk}) for districts of Moscow

№ п/п	Наименование административной единицы/ Name of the administrative unit	k_{sk}	№ п/п	Наименование административной единицы/ Name of the administrative unit	k_{sk}
1	Центральный АО	5,06	6	Южный АО	4,59
2	Северный АО	6,21	7	Юго-Западный АО	5,28
3	Северо-Восточный АО	3,41	8	Западный АО	2,74
4	Восточный АО	6,28	9	Северо-Западный АО	5,11
5	Юго-Восточный АО	3,09	10	Зеленоградский АО	4,02
Итого по г. Москве		4,58			

Второй путь – освобождение центра городов от размещения некоторых органов государственного управления, которые могут осуществлять свои функции в другом месте без ущерба для качества дела. Освободить центр от размещения органов управления требует и радиально-кольцевая планировка городов таких как: Москва, Минск, Вильнюс, Рига, Харьков, Ташкент, Омск, Новокузнецк и других, когда все дороги ведут в одну точку [17].

Третий путь лежит в создании и соблюдении нормативов комфортной застройки территорий населённых пунктов, в частности, с учётом и соблюдением показателя «степени концентрации», объективно отражающим качество жизни жителей городов [22-26]. Принятие норма-

тивов может упорядочить выдачу землеотводов, застройку территорий, обеспечит высокое качество жизни и здоровье населения.

Библиографический список:

1. Экологическая доктрина Российской Федерации Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. N 1225-р. – М.: Российская газета. №7958. – 10.09. 2002г. С.3.
2. Новые районы Москвы : [Сборник статей] / Володин П. А., Журавлев А. М., Б. М. Иофан Б. М., Кадина И. Г., Пекарева Н. А., Стригалева А. А.; Академия строительства и архитектуры СССР, Институт теории и истории архитектуры и строительной техники. — Москва : Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. — 286 с., ил. — (Опыт советской архитектуры).
3. 9-ый квартал Новых Черёмушек, 1964г. [Электронный ресурс]. — 2019. — Режим доступа: <https://im0-tubby.yandex.net/?id=e2159314e96e0f72be1f2cd10626f062-l&n=13> - Дата доступа: 13.01.2020.
4. Фото дворов Черёмушек 60-х годов. [Электронный ресурс]. — 2019. — Режим доступа: [https://www.mos.ru/upload/newsfeed/newsfeed/2\(295179\).jpg](https://www.mos.ru/upload/newsfeed/newsfeed/2(295179).jpg) - Дата доступа: 13.01.2020.
5. Введенский Р.В. Гендлер С.Г. Титова Т.С. Влияние строительства тоннелей на окружающую среду // Инженерно-строительный журнал.- 2018. -№.3(79) – С.140-149.
6. Боголепов И.И., Лаптева Н.А. Шумовая карта городов и агломераций // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 6(16). С. 5-11.
7. Трофименко Ю.В., Чинова В.С. Обоснование мероприятий по снижению риска здоровью от загрязнения воздуха взвешенными частицами размером менее десяти микрон (PM10) на улично-дорожной сети городов// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 48-51.
8. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Шагидуллин А.Р., Валиев В.С., Морайш А. Методология оценки уровня территориального экологического риска для планового управления экологической безопасностью городской среды// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 10. С. 44-49.
9. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания- интегральный критерий качества жизни// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 50-54.
10. Минченок Е.Е., Пахомова Н.А. Оценка состояния городских водных экосистем по гидробиологическим показателям// Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 48-55.
11. Калашникова А.И., Ясовеев М.Г. Критерии оценки и территориальная дифференциация геоэкологических условий под воздействием фактора техногенеза//Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2018. № 4. С. 12-19.
12. Кириллова А.Н., Жихарев Д.Ф., Бижанов С.А. Реновационные модели в процессе жизненного цикла существующей жилой застройки //Недвижимость: экономика, управление. 2018. № 4. С. 13-17.
13. Киевский Л.В., Арсеньев С.В., Каргашин М.Е. Алгоритмы реновации //Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 36-43.
14. Евстратова Т.А., Карагодин А.А. Особенности стратегического управления ОАО "СИТИ"/ Материалы Ивановских чтений. 2017. № 1-2 (11). С. 104-112.
15. Надъярных М.Ф. Из истории одной «идеальной столицы»: Бразилиа и ARS INVENIENDI в Новом Свете //Соловьевские исследования. 2015. № 3 (47). С. 186-205.
16. Жарницкий В.Я., Большеротова Л.В. Теория управления недвижимостью – М.: БАРК-91. – 2015. – 198с.
17. Большеротова Л.В., Жарницкий В.Я., Андреев Е.В. Управление недвижимостью. Учебное пособие. – М.: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – 2016. – 137с.
18. Большеротов А.Л., Большеротова Л.В. Международные системы оценки экологической безопасности строительства / А.Л. Большеротов, Л.В. Большеротова//Жилищное строительство. 2012. № 10. С. 42-45.
19. Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие / Под общей ред. д.б.н. А.А.Минина. - М.: Изд-во «Пасва», 2001. – 192 с.
20. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль – Л.: Гидрометеиздат, - 1984. – 375с.
21. Француз Ю.А., Потемкин В.К. Теории рождаемости: аналитический обзор/ Ю. А. Француз, В. К. Потемкин;/ Рос. акад. естеств. наук, Секция "Экономика и социология", С.-Петерб. отд-ние. Санкт-Петербург, 2005. 243с.
22. Zemitis J., Borodinecs A., Lauberts A. Ventilation impact on voc concentration caused by building materials // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 8(84). С. 130-139.
23. Uhde E., Salthammer T. Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality-A review of recent advances in indoor chemistry // Atmospheric Environment. 2007. № 41(15). Pp. 3111-3128.
24. Kaunelienė V., Prasauskas T., Krugly E., Stasiulaitienė I., et al. Indoor air quality in low energy residential buildings in Lithuania // Building and Environment. 2006. Vol. 108. Pp 63-72.
25. Seung-Ho S. Wan-Kuen J. Volatile organic compound concentrations in newly built apartment buildings during pre- and post-occupancy stages // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2013. Vol. 94. pp. 356-369.
26. Dinh T.V., Kim SY., Son YS. et al. Emission characteristics of VOCs emitted from consumer and commercial products and their ozone formation potential // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. pp. 9345-9355.

References:

1. Environmental Doctrine of the Russian Federation Order of the Government of the Russian Federation of August 31, 2002 N 1225-r. Moscow: Russian newspaper. 2002; 7958 (10.09): 3. (In Russ)
2. New districts of Moscow: [Collection of articles]/Vladimir P. A., Zhuravlev A. M., B. M. Iofan B. M., Kadina I. G., Pekarev N. A., Strigalev A. A.; Academy of Construction and Architecture of the USSR, Institute of Theory and History of Architecture and Construction Engineering. - Moscow: State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Construction Materials, 1960; 286. (Experience of Soviet Architecture). (In Russ)

3. 9th quarter of Novaya Cheryomushki, 196. [Electronic resource]. 2019. Access mode: <https://im0-tub-by.yandex.net/i?id=e2159314e96e0f72be1f2cd10626f062-l&n=13> - Date of access: 13.01.2020. (In Russ)
4. Photo The yards of Cheryomushki of the 1960s. [Electronic resource]. 2019. Access mode: [https://www.mos.ru/upload/newsfeed/newsfeed/2_\(295179\).jpg](https://www.mos.ru/upload/newsfeed/newsfeed/2_(295179).jpg) is Date of access: 13.01.2020. (In Russ)
5. Introduced by R.V. Handler S.G. Titova T.S. Impact of tunnel construction on the environment. *Engineering and construction journal* 2018; 3 (79): 140-149. (In Russ)
6. Bogolepov I.I., Lapteva N.A. Noise map of cities and agglomerations//*Engineering and construction journal*. 2010; 6(16):5-11. (In Russ)
7. Trofimenko Yu.V., Chijova V.S. Justification of measures to reduce health risk from air pollution with suspended particles of less than ten micrometers (PM10) on the street-road network of cities. *Ecology and industry of Russia*. 2019; 23(7): 48-51. (In Russ)
8. Tunakov Yu.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S., Moraysh A. Methodology of assessment of the level of territorial environmental risk for planned management of environmental safety of the urban environment. *Ecology and industry of Russia*. 2019; 23(10): 44-49. (In Russ)
9. Kalner V.D. Ecologically Oriented Environment - Integral Criterion of Quality of Life. *Ecology and Industry of Russia*. 2019; 23(11): 50-54. (In Russ)
10. Minchenok E.E., Pakhomova N.A. Assessment of the state of urban aquatic ecosystems by hydrobiological indicators. *Theoretical and applied ecology*. 2016; 3: 48-55. (In Russ)
11. Kalashnikov A.I., Yasoveev M.G. Evaluation criteria and territorial differentiation of geoecological conditions under the influence of technogenesis factor. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2018; 4:12-19.
12. Kirillova A.N., Zhiharev D.F., Bijanov S.A. Renovation models during the life cycle of existing residential development. *Real estate: economics, management*. 2018; 4:13-17. (In Russ)
13. Kiyevskiy L.V., Arsenyev S.V., Kargashin M.E. Renovation algorithms. *Industrial and civil construction*. 2019; 8:36-43. (In Russ)
14. Evstratova T.A., Karagodin A.A. Peculiarities of strategic management of OJSC "CITY". *Materials of Ivanovskii readings*. 2017; 1-2 (11): 104-112. (In Russ)
15. Supranational M.F. From the history of one "ideal capital": Brasilia and ARS INVENIENDI in the New World. *Nightingale studies*. 2015; 3 (47): 186-205. (In Russ)
16. Zharnicki V.J., Bolsherotova L.V. Theory of Real Estate Management. M.: БАРК-91. 2015; 198. (In Russ)
17. Bolsherotova L.V., Zharnicki V.J., Andreev E.V. Real Estate Management. Tutorial. Moscow: Russian State Agrarian University. IMHA named after K.A. Timiryazeva. 2016; 137. (In Russ)
18. Bolsherotov A.L., Bolsherotova L.V. International Building Environmental Safety Assessment Systems / A.L. Bolsherotov, L.V. Bolsherotova. *Housing construction*. 2012; 10: 42-45. (In Russ)
19. Ecology of a large city (on the example of Moscow). Tutorial/Under the general edition of A.A.Minina. M.: Pasyva, 2001. 192 p. (In Russ)
20. Israel Yu. A. Ecology and Natural Environment Contro. *Hydrometeoisdats*, 1984; 375. (In Russ)
21. French Y.A., Potemkin V.K. Birth theories: analytical review/Y. A. French, V. K. Potemkin;/Ros. academician of natures. Sciences, Economics and Sociology Section, St. Petersburg. otd-ny. St. Petersburg, 2005; 243 (In Russ)
22. Zemitis J., Borodinecs A., Lauberts A. Ventilation impact on voc concentration caused by building materials. *Engineering and Construction Journal*. 2018; 8(84): 130-139.
23. Uhde E., Salthammer T. Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality-A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmospheric Environment*. 2007; 41(15): 3111-3128.
24. Kaunelienė V., Prasauskas T., Krugly E., Stasiulaitienė I., et al. Indoor air quality in low energy residential buildings in Lithuania. *Building and Environment*. 2006; 108: 63-72.
25. Seung-Ho S. Wan-Kuen J. Volatile organic compound concentrations in newly built apartment buildings during pre- and post-occupancy stages. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2013; 94: 356-369.
26. Dinh T.V., Kim S.Y., Son Y.S. et al. Emission characteristics of VOCs emitted from consumer and commercial products and their ozone formation potential. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22: 9345-9355.

Сведения об авторе:

Большеротов Аркадий Леонидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры конструкции и сооружения; bark1091@mail.ru

Information about the author:

Arkady L. Bolsherotov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Construction and Construction; bark1091@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.10.2021.

Одобрена после рецензирования Revised 12.01.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 504.3.054

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-104-111

Оригинальная статья/Original Paper

Экологический мониторинг металлических примесей в мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$) населенных пунктов
И.Ю. Глинянова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является выявление металлических примесей в мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$) в жилой зоне Средняя Ахтуба (Средне-ахтубинский район, Волгоградская область), подвергнутой действию антропогенного фактора (керамзитовые производства) в сравнительной характеристике с условно-чистой зоной (садовое некоммерческое товарищество (СНТ)) по показателям количества частиц (N_{ch} , %) и их массовой доли ($D(d_{ch})$, %). **Метод.** Отбор частиц ($PM_{2.5}$) с листьев абрикосовых деревьев и приготовление аэрозольных суспензий осуществлялись согласно международных методик. Выявление показателей количества и массовой доли частиц производилось на основании оптического метода по ГОСТу Р 56929-2016. **Результат.** Полученные значения по исследуемым показателям проверялись по Т-критерию Вилкоксона и находили на уровне значимости $p < 0.05$. В жилой зоне Средней Ахтубы установлено в 35 раз превышения по массовой доле ($D(d_{ch})$, % частиц ($PM_{2.5}$) по сравнению с условно-чистой зоной и незначительное превышение по количеству частиц (в 2 раза). **Вывод.** На основании полученных результатов прогнозируются металлические примеси в мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$) в жилой зоне Средней Ахтубы и экологические риски для проживающего там населения. Требуется совершенствование системы защиты городского хозяйства на предприятиях по производству керамзита и др., расположенных в промышленной зоне Средней Ахтубы.

Ключевые слова: $PM_{2.5}$, городское хозяйство, экологическая безопасность, экологический мониторинг, аэрозоли; экологические риски, металлические примеси

Для цитирования: И.Ю. Глинянова. Экологический мониторинг металлических примесей в мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$) населенных пунктов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 104-111. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-104-111

Environmental monitoring of metallic impurities in fine dust ($PM_{2.5}$) of settlements

I.Yu. Glinyanova

Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to identify metallic impurities in fine dust ($PM_{2.5}$) in the residential area of Srednyaya Akhtuba (Sredneakhtubinsky rayon, Volgogradskaya oblast) exposed to the anthropogenic factor (expanded clay production) in a comparative characteristic with a relatively clean zone (garden non-profit partnership (SNT)) by indicators the number of particles ($N_{PM_{2.5}}$, %) and their mass fraction ($D(d_{PM_{2.5}})$, %). **Method.** The selection of particles ($PM_{2.5}$) from the leaves of apricot trees and the preparation of aerosol suspensions was carried out according to international methods. The identification of the number and mass fraction of particles was carried out on the basis of the optical method according to GOST R 56929-2016. **Result.** The obtained values for the studied parameters were checked by the Wilcoxon T-test and were found at a significance level of $p < 0.05$. In the residential area of Srednyaya Akhtuba, 35 times the mass fraction ($D(d_{PM_{2.5}})$, % of

particles (PM_{2.5}) exceeded the conditionally clean zone) and a slight increase in the number of particles (2 times) were found. **Conclusion.** Based on the results obtained metal impurities in fine dust (PM_{2.5}) in the residential area of Srednyaya Akhtuba and environmental risks for the population living there are predicted. It is necessary to improve the system of protection of the urban economy at the enterprises for the production of expanded clay, etc., located in the industrial zone of Srednyaya Akhtuba.

Keywords: PM_{2.5}, urban economy, environmental safety, environmental monitoring, aerosols; environmental risks, metallic impurities

For citation: I.Yu. Glinyanova. Environmental monitoring of metallic impurities in fine dust (PM_{2.5}) of settlements. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):104-111. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-104-111

Введение. Мелкодисперсная пыль диаметром меньше 2.5 мкм способна аккумулировать в себе различные химические соединения, в том числе металлические примеси [3], [4] и оказывать негативное влияние на здоровье человека.

Так, известно, что в мелкодисперсной пыли (PM_{2.5}) могут содержаться, например, тяжелые металлы. Попадая в организм человека, они способны воздействовать на сигнальные системы головного мозга, на клетки органов и тканей, развивать онкологические и хронические заболевания [5]; увеличивать заболеваемость и смертность от сердечно-сосудистых, респираторных заболеваний, формировать злокачественные опухоли [6].

При этом тяжелые металлы считаются опасными в основном из-за их способности производить активные формы кислорода (АФК) в дыхательной системе человека [7]. Уровень АФК в клетках находится под контролем антиоксидантной системы, а его нарушение способствует дезадаптации клеток к новым условиям среды, нарушению течения метаболических реакций [8].

Поддержание на определенном уровне АФК тканей важно для регуляции нормальных физиологических процессов в организме: уровня неспецифической и специфической иммунной защиты, уровня периферического сосудистого тонуса, уровня самообновления мембран клетки и др. [9].

Такие тяжелые металлы, как Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Zn, Mn и Co в PM_{2.5} могут также влиять на патофизиологию многих сердечно-сосудистых заболеваний и являться токсичными для миокарда [10]. Тяжелые металлы в PM_{2.5} также способны разрушить целостность мембраны и способствовать проницаемости в эндотелиальных клетках сосудов, способствуя тем самым развитию сердечно - сосудистых заболеваний [11].

Никель (Ni), мышьяк (As) в мелкодисперсной пыли (PM_{2.5}) могут быть пусковым механизмом остановки сердца, резкого прекращения его механической активности, являться одной из наиболее частых причин смерти и влияют на патофизиологию многих других сердечно-сосудистых заболеваний [12].

Особую опасность в PM_{2.5} могут представлять токсичные металлы (Mn, Cd, Ni) в PM_{2.5}, которые могут быть значительно выше, чем в рекомендациях ВОЗ и быть связаны с хроническими обструктивными заболеваниями легких [13]. Хром (Cr) в PM_{2.5} может вызвать канцерогенный риск [14].

Приведенные примеры показывают актуальность и важность исследования металлических примесей в мелкодисперсной пыли, которые являются активаторами многочисленных заболеваний человека.

В последнее время большинство исследований посвящается исследованию мелкодисперсной пыли (PM_{2.5}) на листьях растений как эффективных пассивных мониторов загрязнений окружающей среды населенных пунктов.

Например, металлические примеси в PM_{2.5} обнаруживают на листьях груши (*Pyrus calleryana*) и липы европейской (*Tilia europaea Euchlora*) [15]; на листьях растения-паразита

(*Struthanthus flexicaulis*) [16]; на листьях тополя черного (*Populus nigra* L.) [17]; на иглах араукарии разнолистной (*Araucaria heterophylla*) [18] и др.

Автор в своем исследовании отбирал мелкодисперсную пыль на листьях абрикосовых деревьев (*Prunus armeniaca*) как наиболее популярном древесном растении Волгоградской области.

Постановка задачи. Целью данного исследования было изучение металлических примесей в мелкодисперсной пыли (PM_{2.5}) в жилой зоне рабочего поселка (рп) Средняя Ахтуба, подвергнутой действию антропогенного фактора (керамзитовые производства) в сравнительной характеристике с условно-чистой зоной (садовое некоммерческое товарищество (СНТ)) по показателям количества частиц ($N_q, \%$) и их массовой доли ($D(d_q), \%$).

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 120 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.

При осуществлении анализа диаметра частиц ($d_q, \text{мкм}$), их фракционного состава, все аэрозольные суспензии поочередно проходили через фильтры: АФА-ВП-10 и др.

До проведения анализа, фильтры сушили в течение 30 минут при 60°C в сушильной камере (низкотемпературная лабораторная печь), а затем оставляли в комнате для взвешивания для стабилизации их массы с предварительным взвешиванием на весах.

Таким образом, приготовленная аэрозольная суспензия первоначально фильтровалась через металлическое сито с диаметром ячеек 100 мкм для удаления частиц размером более 100 мкм.

Затем суспензию фильтровали через предварительно взвешенные стандартные фильтры АФА-ВП-10 или АФА-ВП-20, изготовленные из высокоэффективного гидрофобного фильтрующего материала ФПП-15, на которых впоследствии размещалась отобранная аэрозольная частица.

Фильтр модели АФА-ВП-20 или др. с аэрозольными частицами высушивался при комнатной температуре до постоянной массы. В результате чего получалась определенная масса пылевидных частиц (мг) 1 образца (общая площадь листовых пластинок $S=150 \text{ см}^2$).

Отфильтрованные аэрозольные частицы размещали далее на предметном стекле и впоследствии исследовались на оптическом микроскопе.

Исследование пыли осуществляли с разностороннего фотографирования образцов, увеличенных в 200–2000 раз под микроскопом с помощью микрофотоприставки и ПК. Количество необходимых фотографий зависело от полидисперсности пыли.

Снятие изображения с фотоаппарата и последующая обработка производилась с помощью графического пакета Adobe PhotoShop, для сохранения изображения; в формате Windows Bitmap (bmp) в черно-белом режиме (1 bit/pixel) с последующим расчетом количества частиц на единицу площади ($N_q, \%$) и их массовой доли ($D(d_q), \%$) [19].

Обсуждение результатов. В табл. 1 представлены описательные статистики показателя массовой доли аэрозольных частиц ($D(d_{PM_{2.5}}), \%$) из рабочего поселка Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) и СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона), 2018 год.

Таблица 1. Описательные статистики показателя массовой доли аэрозольных частиц ($D(d_{PM2.5})$, %) из рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) и СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона), 2018 год

Table 1. Descriptive statistics of the indicator of the mass fraction of aerosol particles ($D(d_{PM2.5})$, %) from the Middle Akhtubay region (experimental territory) and SNT "Oroshenets", "Shelf" (a (relatively) clean location), 2018

$D(d_{PM2.5})$, %, 2018 год		
Описательные статистики Descriptive statistics	СНТ «Орошенец», «Шельф» SNT "Oroshenets", "Shelf"	Средняя Ахтуба Srednyaya Akhtubay
Среднее The average	0,050367	1,779083
Стандартная ошибка Standard error	0,006497	0,35792
Медиана Median	0,03	0,675
Мода Fashion	0,02	0,45
Стандартное отклонение Standard deviation	0,050322	2,772438
Дисперсия выборки Sample variance	0,002532	7,686414
Экцесс Excess	3,084032	9,454009
Асимметричность Asymmetry	1,86409	2,944236
Интервал Interval	0,207	14,72
Минимум Minimum	0,003	0
Максимум Maximum	0,21	14,72
Сумма Sum	3,022	106,745
Счет Check	60	60

В табл. 2 представлены описательные статистики показателя количества аэрозольных частиц ($N_{PM2.5}$, %) из рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) и СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона), 2018 год.

Измеренные значения исследуемых показателей проверялись на однородность и установления достоверности в них различий.

Верификация достоверности различий была реализована посредством использования аппарата проверки гипотез об однородности выборок с использованием критерия Т-Вилкоксона.

При проведении исследования значений показателя массовой доли частиц ($D(d_p)$, %), первой принята была выборка, содержащая измерения показателя массовой доли частиц ($D(d_{PM2.5})$, %) на экспериментальной территории (рп Средняя Ахтуба). Объем этой выборки: $n_1=60$.

Второй выборкой являлись измерения показателя массовой доли аэрозольных частиц ($D(d_{PM2.5})$, %) из условно-чистой зоны («Орошенец», СНТ «Шельф»). Объем этой выборки: $n_2=60$.

Таблица 2. Описательные статистики показателя массовой доли аэрозольных частиц ($N_{PM2.5}$), %) из рп Средняя Ахтуба (экспериментальная территория) и СНТ «Орошенец», «Шельф» (условно-чистая зона), 2018 год

Table 2. Descriptive statistics for the mass fraction of aerosol particles ($N_{PM2.5}$), (%) from Srednyaya Akhtuba (experimental area) and SNT "Oroshenets", "Shelf" (a (relatively) clean location), 2018

(N _{PM2.5}), %, 2018 год		
Описательные статистики Descriptive statistics	СНТ «Орошенец», «Шельф» SNT "Oroshenets", "Shelf"	Средняя Ахтуба Srednyaya Akhtuba
Среднее The average	25,17783	44,37033
Стандартная ошибка Standard error	1,225989	2,362025
Медиана Median	24,55	41,995
Мода Fashion	39,58	22
Стандартное отклонение Standard deviation	9,496472	18,29617
Дисперсия выборки Sample variance	90,18298	334,7497
Экссесс Excess	-0,99621	0,51152
Асимметричность Asymmetry	0,172048	0,102698
Интервал Interval	34,24	91,57
Минимум Minimum	8,62	0
Максимум Maximum	42,86	91,57
Сумма Sum	1510,67	2662,22
Счет Check	60	60

Значение нижней критической точки:

$$w_{н.кр.}(Q, n_1, n_2) = \frac{(n_1 + n_2 + 1) \cdot n_1 - 1}{2} - z_{кр} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 + 1)}{12}}$$

$$w_{н.кр.}(0,025; 60; 60) = \frac{(60 + 60 + 1) \cdot 60 - 1}{2} - 1,96 \cdot \sqrt{\frac{60 \cdot 60 \cdot (60 + 60 + 1)}{12}} = 3256,1$$

Значение верхней критической точки:

$$w_{в.кр.} = (n_1 + n_2 + 1) \cdot n_1 - w_{н.кр.} = (60 + 60 + 1) \cdot 60 - 3256,1 = 4003,9$$

Наблюдаемое значение статистики (рассчитанное по эмпирическим данным) по Т-критерию Вилкоксона: $W_{набл.} = 5269,5$.

$W_{набл.} = 5269,5 > w_{в.кр.} = 4003,9$, поэтому нулевая гипотеза об однородности анализируемых выборок отвергалась и принималась конкурирующая гипотеза: $F(X) \neq G(Y)$ о неоднородности анализируемых выборок, содержащих данные измерений показателя массовой доли аэрозольных частиц ($D(d_{PM2.5})$, %) в жилой зоне рп Средняя Ахтуба (при проведении расчетов эти данные образовывали первую выборку) и результаты измерений показателя массовой доли аэрозольных частиц ($D(d_{PM2.5})$, %) условно-чистой зоны СНТ «Орошенец» (при проведении рас-

четов данные условно-чистой зоны образуют вторую выборку). При проведении исследования значений показателя количества частиц (N_q , %), первой принималась выборка, содержащая измерения показателя количества аэрозольных частиц ($N_{PM_{2.5}}$, %) на экспериментальной территории (рп Средняя Ахтуба). Объем этой выборки: $n_1=60$.

Второй выборкой являлись измерения показателя количества аэрозольных частиц ($N_{PM_{2.5}}$, %) из условно-чистой зоны («Орошенец», СНТ «Шельф»).

Объем этой выборки: $n_2=60$.

Значение нижней критической точки рассчитывалось аналогично выборкам массовой доли частиц и составляло: 3256,1.

Значение верхней критической точки:

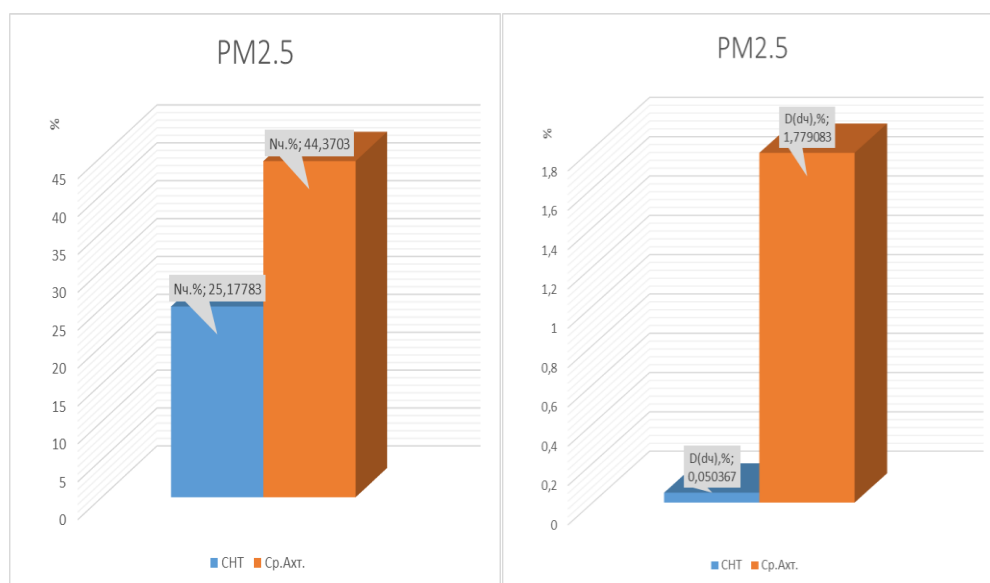
$$w_{в.кр.} = (n_1 + n_2 + 1) \cdot n_1 - w_{н.кр.} = (60 + 60 + 1) \cdot 60 - 3256,1 = 4003,9$$

Наблюдаемое значение статистики (рассчитанное по эмпирическим данным) Т-критерия Вилкоксона: $W_{набл.} = 4845$.

$W_{набл.} = 4845 > w_{в.кр.} = 4003,9$, поэтому нулевая гипотеза об однородности анализируемых выборок отвергалась и принималась конкурирующая гипотеза: $F(X) \neq G(Y)$ о неоднородности анализируемых выборок, содержащих данные измерений показателя количества аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ ($N_{PM_{2.5}}$, %) экспериментальной зоны рп Средняя Ахтуба (при проведении расчетов эти данные образуют первую выборку) и результаты измерений показателя количества аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ ($N_{PM_{2.5}}$, %) условно-чистой зоны СНТ «Орошенец», «Шельф» (при проведении расчетов данные условно-чистой зоны образовывали вторую выборку).

а)

б)



**Рис.1. Количество ($N_{PM_{2.5}}$, %), (а) и массовая доля ($D(d_{PM_{2.5}})$, %), (б) частиц
 Fig.1 Amount ($N_{PM_{2.5}}$, %), (a) and mass fraction ($D(d_{PM_{2.5}})$, %), (b) fine dust**

Установленные статистически значимые различия между значениями показателей в условно-чистой зоне и экспериментальной территории позволили сравнить их значения.

На рис. 1 продемонстрированы диаграммы по количеству частиц ($N_{PM_{2.5}}$, %) (а) и их массовой доли ($D(d_q)$, %) (б) в условно-чистой зоне по сравнению с экспериментальной территорией (Средняя Ахтуба).

Как видно из рис.1 установлено превышение в 35 раз по массовой доле мелкодисперсной пыли ($D(d_{PM_{2.5}})$, %) в жилой зоне рп Средняя Ахтуба по сравнению с условно-чистой зоной и незначительное превышение по количеству частиц ($N_{PM_{2.5}}$, %) (в 2 раза).

Вывод. Полученные данные свидетельствуют о наличии металлических примесей в мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$) в жилой зоне рп Средняя Ахтуба и возможных экологических рисках для населения.

В этой связи необходимо установить долгосрочный мониторинг аэрозольных частиц в жилой зоне рп Средняя Ахтуба Среднеахтубинского района Волгоградской области; совершенствовать систему защиты атмосферного воздуха в индустриальном секторе рп Средняя Ахтуба, в котором действуют предприятия стройиндустрии и др.; осуществлять озеленение санитарно-защитных зон промышленных предприятий.

Библиографический список:

1. Dzierzanowski K, Popek R, Gawronska H, Saebo A, Gawronski S.W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International Journal of Phytoremediation* 2011; 13: 1037-1046.
2. Lukowski A, Popek R, Karolewski P Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology. *Environmental Science and Pollution Research* 2020; 27: 10296-10307
3. Pastuszka JS [etс] Characterization of PM10 and PM2.5 and associated heavy metals at the crossroads and urban back ground site in Zabrze, Upper Silesia, Poland, during the smog episodes// *Environmental monitoring and assessment*.2010;168 (1-4): 613-627.DOI10.1007/s10661-009-1138-8
4. Chen PF [etс] Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM2.5 in Tianjin, China//*Particuology*.2015; 20:104-109.DOI10.1016/j.partic.2014.04.020
5. Abu-Elmagd M. [etс] Evaluation of the Effects of Airborne Particulate Matter on Bone Marrow-Mesenchymal Stem Cells (BM-MSCs): Cellular, Molecular and Systems Biological Approaches//*International journal of environmental research and public health*.2017;14(4).DOI10.3390/ijerph14040440
6. Garrison VH [etс] Inhalable desert dust, urban emissions, and potentially biotoxic metals in urban Saharan-Sahelian air//*Science of the total environment*.2014;500:383-394.DOI10.1016/j.scitotenv.2014.08.106
7. Lawrence AJ Quantification of Airborne Particulate and Associated Toxic Heavy Metals in Urban Indoor Environment and Allied Health Effects//*Measurement, analysis and remediation of environmental pollutants*.2020.DOI10.1007/978-981-15-0540-9_2
8. Улащик В. С. Активные формы кислорода, антиоксиданты и действие лечебных физических факторов. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2013. № 90 (1). С.60-69.
9. Донцов В.И. и др. Активные формы кислорода как система: значение в физиологии, патологии и естественном старении// Труды ИСА РАН 2006. Т. 19
10. Zhang YY [etс] Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: A study based on myocardial toxicity. *Environmental pollution*.2016;216:380-390.DOI10.1016/j.envpol.2016.05.072
11. Dai JW [etс] Exposure to concentrated ambient fine particulate matter disrupts vascular endothelial cell barrier function via the IL-6/HIF-1 alpha signaling pathway//*Febs open bio*.2016; 6(7):720-728.DOI10.1002/2211-5463.12077
12. Sielski J. [etс] The influence of air pollution by PM2.5, PM10 and associated heavy metals on the parameters of out-of-hospital cardiac arrest//*Science of the total environment*.2021.V.788.DOI10.1016/j.scitotenv.2021.147541
13. Nasir ZA [etс] Automotive related exposure to particulate air pollution in developing countries cities//*Journal of animal and plant sciences*.2015; 25(3):713-718.
14. Li YP [etс] Characteristics, sources and health risk assessment of toxic heavy metals in PM2.5 at a megacity of southwest China//*Environmental geochemistry and health*.38 (2):353-362.DOI10.1007/s10653-015-9722-z
15. Jouraeva V.A. [etс] Differences in accumulation of PAHs and metals on the leaves of *Tilia x euchlora* and *Pyrus calleryana*//*Environmental pollution*.2002; 120(2):331-338.DOI10.1016/S0269-7491(02)00121-5
16. de Paula PHM [etс] Biomonitoring of metals for air pollution assessment using a hemiepiphyte herb (*Struthanthus flexicaulis*)//*Chemosphere*.2015;138:429-437.DOI10.1016/j.chemosphere.2015.06.060
17. Levei L. [etс] Use of Black Poplar Leaves for the Biomonitoring of Air Pollution in an Urban Agglomeration//*Plants-basel*.2021;10(3).DOI10.3390/plants10030548
18. Mancheno T. Assessment of metals in PM10 filters and *Araucaria heterophylla* needles in two areas of Quito, Ecuador//*HELIYON*.2021.V.7.issue1.DOI10.1016/j.heliyon.2021.e05966
19. ГОСТ Р 56929-2016 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха

Reference:

1. Dzierzanowski K, Popek R, Gawronska H, Saebo A, Gawronski S.W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International Journal of Phytoremediation* 2011; 13:1037-1046.
2. Lukowski A, Popek R, Karolewski P Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology. *Environmental Science and Pollution Research* 2020; 27: 10296-10307
3. Pastuszka JS [etс] Characterization of PM10 and PM2.5 and associated heavy metals at the crossroads and urban back ground site in Zabrze, Upper Silesia, Poland, during the smog episodes. *Environmental monitoring and assessment*.2010;168 (1-4): 613-627.DOI10.1007/s10661-009-1138-8
4. Chen PF [etс] Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM2.5 in Tianjin, China. *Particuology*.2015; 20:104-109.DOI10.1016/j.partic.2014.04.020
5. Abu-Elmagd M. [etс] Evaluation of the Effects of Airborne Particulate Matter on Bone Marrow-Mesenchymal Stem Cells (BM-MSCs): Cellular, Molecular and Systems Biological Approaches *International journal of environmental research and public health* 2017;14(4).DOI10.3390/ijerph14040440
6. Garrison VH [etс] Inhalable desert dust, urban emissions, and potentially biotoxic metals in urban Saharan-Sahelian air//*Science of the total environment*.2014;500:383-394.DOI10.1016/j.scitotenv.2014.08. 106

7. Lawrence AJ Quantification of Airborne Particulate and Associated Toxic Heavy Metals in Urban Indoor Environment and Allied Health Effects. *Measurement, analysis and remediation of environmental pollutants*.2020.DOI10.1007/978-981-15-0540-9_2
8. Ulashchik V. S. Reactive oxygen species, antioxidants and the effect of therapeutic physical factors. *Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture*. 2013; 90 (1): 60-69. (In Russ).
9. Dontsov V.I. and others. Reactive oxygen species as a system: importance in physiology, pathology and natural aging. *Proceedings of the ISA RAS* 2006; 19 (In Russ).
10. Zhang YY [etс] Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: A study based on myocardial toxicity. *Environmental pollution*. 2016;216:380-390.DOI10.1016/j.envpol.2016.05.072
11. Dai JW [etс] Exposure to concentrated ambient fine particulate matter disrupts vascular endothelial cell barrier function via the IL-6/HIF-1 alpha signaling pathway//*Febs open bio*.2016; 6(7):720-728.DOI10.1002/2211-5463.12077
12. Sielski J. [etс] The influence of air pollution by PM2.5, PM10 and associated heavy metals on the parameters of out-of-hospital cardiac arrest//*Science of the total environment*.2021.V.788.DOI10. 1016/j.scitotenv.2021.147541
13. Nasir ZA [etс] Automotive related exposure to particulate air pollution in developing countries cities. *journal of Animal and plant sciences*.2015; 25(3):713-718.
14. Li YP [etс] Characteristics, sources and health risk assessment of toxic heavy metals in PM2.5 at a megacity of southwest China. *Environmental geochemistry and health*.38(2):353-362.DOI10.1007/s10653-015-9722-z
15. Jouraeva V.A. [etс] Differences in accumulations of PAHs and metals on the leaves of *Tilia x euchlora* and *Pyrus calleryana*. *Environmental pollution*.2002; 120(2):331-338.DOI10.1016/S0269-7491(02)00121-5
16. de Paula PHM [etс] Biomonitoring of metals for air pollution assessment using a hemiepiphyte herb (*Struthanthus flexicaulis*). *Chemosphere*.2015;138:429-437.DOI10.1016/j.chemosphere.2015.06.060
17. Levei L. [etс] Use of Black Poplar Leaves for the Biomonitoring of Air Pollution in an Urban Agglomeration. *Plants-basel*.2021;10(3).DOI10.3390/plants10030548
18. Mancheno T. Assessment of metals in PM10 filters and *Araucaria heterophylla* needles in two areas of Quito, Ecuador//*HELIYON*.2021;7(1).DOI10.1016/j.heliyon.2021.e05966
19. GOST R 56929-2016 Emissions of pollutants into the atmosphere. Investigation of the fractional composition of dust by the optical method when normalizing the quality of atmospheric air. (In Russ).

Сведения об авторе:

Глинянова Ирина Юрьевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; ecoris@yandex.ru, ORCID 0000-0003-1388-1233

Irina Yu. Glinyanova, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Life Safety in Construction and Urban Economy; 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 13.01.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 05.02.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 05.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.074.43

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-112-121

Оригинальная статья /Original Paper

Напряженно-деформированное состояние двухслойных армоцементных
оболочек в условиях пожара

А.В. Журтов¹, Т.А. Хежев¹, Г.Н. Хаджишалапов², А.А. Карданов¹, М.А. Шогенцуков¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет,

¹360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

² Дагестанский государственный технический университет,

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики расчета несущей способности двухслойных армоцементных оболочек на силовые и температурные воздействия в условиях пожара. Указанные конструкции состоят из огнезащитного слоя, выполненного из вермикулитобетона, а также несущего слоя из мелкозернистого бетона, армированного сеткой. **Метод.** Решение выполняется в физически нелинейной постановке с использованием деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева. При получении разрешающих уравнений применяется теория пологих оболочек В.З. Власова. Физически нелинейная задача сводится к последовательному решению упругих задач для конструкции, физико механические параметры которой являются функциями координат x, y, z . Решение выполняется методом конечных элементов в сочетании с методом Ньютона-Рафсона. Учитывается зависимость характеристик материалов конструкции от температуры. Температурное поле предполагается функцией только одной координаты z , и для его определения используется метод конечных разностей. **Результат.** Представлены результаты численного моделирования натурных экспериментов в огневой камере для однослойных и двухслойных оболочек. Выявлены некоторые отклонения, обусловленные с одной стороны неточностями эксперимента и погрешностями теории с другой стороны. **Вывод.** Обнаружено существенное влияние граничных условий на процесс деформирования конструкции. При закреплении опорного контура по x и y наблюдался выгиб оболочки, что согласовалось с экспериментальными данными, а в случае свободно скользящего опорного контура точки конструкции перемещались исключительно вниз. В целом, совпадение результатов с экспериментальными данными достаточно хорошее, что позволяет использовать методику для расчета реальных конструкций.

Ключевые слова: армоцементная оболочка, стандартный пожар, несущая способность, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Для цитирования: А.В. Журтов, Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, А.А. Карданов, М.А. Шогенцуков. Напряженно-деформированное состояние двухслойных армоцементных оболочек в условиях пожара. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 112-121. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-112-121

Stress strain state of double-layered ferrocement shells under the fire condition

A.V. Zhurtov¹, T.A.Khezhev¹, G.N.Khadzhishalapov², A.A.Kardanov¹, M.A.Shogentsukov¹

¹H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

¹173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Development of a method for calculating the bearing capacity of two-layer reinforced cement shells for force and temperature effects in a fire. These structures consist of a fire-retardant layer made of vermiculite concrete, as well as a carrier layer of fine-grained concrete

reinforced with mesh. **Method.** The solution is carried out in a physically nonlinear formulation using the deformation theory of concrete plasticity by G.A. Geniev. In obtaining the resolving equations, the theory of shallow shells by V.Z. Vlasov is used. The physically nonlinear problem reduces to the sequential solution of elastic problems for a structure whose physicomaterial parameters are functions of the x, y, z coordinates. The solution is carried out by the finite element method in combination with the Newton-Raphson method. The dependence of the characteristics of construction materials on temperature is taken into account. The temperature field is assumed to be a function of only one z coordinate, and the finite difference method is used to determine it. **Result.** the results of numerical simulation of full-scale experiments in a fire chamber for single-layer and two-layer shells are presented. Some deviations are revealed, caused on the one hand by inaccuracies of the experiment and errors of the theory on the other hand. **Conclusion.** A significant influence of the boundary conditions on the process of deformation of the structure was found. When the support contour was fixed along x and y , a shell bend up was observed, which was consistent with experimental data, and in the case of a freely sliding support contour, the structural points moved exclusively downward. In general, the agreement between the results and experimental data is quite good, which allows us to use the methodology for calculating real structures.

Keywords: ferrocement shell, standard fire, bearing capacity, stress-strain state, finite element method

For citation: A.V. Zhurтов, T.A. Khezhev, G.N. Khadzhishalapov, A.A. Kardanov, M.A. Shogentsukov. Stress-strain state of two-layer reinforced cement shells under fire conditions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):112-121. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-112-121

Введение. Проблема определения предела огнестойкости строительных конструкций является весьма актуальной задачей. В качестве одного из методов ее решения выступает натурное испытание моделей конструкций в условиях стандартного пожара. Однако такой метод достаточно дорог и для некоторых конструкций практически неосуществим вследствие ограниченности размеров имеющихся огневых камер.

Альтернативой натурным испытаниям может служить численный эксперимент. Задача определения предела огнестойкости включает в себя 2 подзадачи: определение нестационарного температурного поля, а также расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в каждый момент времени. При этом указанные подзадачи, как правило, решаются несвязно, то есть предполагается, что изменение напряженно-деформированного состояния конструкции не приводит к изменению температурного поля.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния двухслойных армоцементных оболочек на силовые и температурные воздействия в условиях пожара.

Двухслойные армоцементные оболочки представляют собой строительные тонкостенные пространственные конструкции с высокой степенью огнестойкости. Их можно применять в зданиях первой степени огнестойкости. Такие конструкции включают конструктивный слой толщиной 20-50 мм из армоцемента и огнезащитный слой толщиной 15-25 мм из вермикулитобетона. Каждый из слоев в процессе бетонирования армируется тканой сеткой. Предел огнестойкости двухслойных конструкций по сравнению с однослойными повышается за счет интенсивной теплоотдачи с необогреваемой поверхности.

Методы исследования. Вопросам расчета температурного поля в условиях пожара посвящено большое количество публикаций, в том числе [1-10]. Наиболее часто для решения данной задачи применяется метод конечных элементов (МКЭ) и программный комплекс ANSYS [1-2]. Помимо МКЭ для расчета распределения температуры используется метод конечных разностей [6-9] и метод Рунге-Кутты [3-5]. Имеются также публикации по аналитическому решению нестационарной задачи теплопроводности [10].

Что касается второй подзадачи – расчета НДС конструкций в условиях пожара, в данном направлении публикаций относительно немного. В работе К.Р. Айдемирова [11] для подверженной нестационарному температурному полю оболочки рассматривается построение кинематических уравнений теории тонких оболочек в квадратичном приближении, физических соотношений для нелинейно-упругого материала, а также уравнений равновесия и краевых условий. Используется вариационный принцип Лагранжа, а также соотношения теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина.

В работе О.В. Мкртычева и Д.С. Сидорова [12] с использованием программного комплекса ANSYS производится расчет монолитного железобетонного здания на действие силовых эксплуатационных нагрузок и высоких температур в условиях пожара. Предварительно для верификации расчетных моделей выполняется сравнение с результатами натурных экспериментов для железобетонных плит, проведенных в НИИЖБ. Аналогичная задача решается при помощи конечно-элементного моделирования в программном комплексе ЛИРА в работе Н. Руколлах [13].

Необходимо отметить, что при нагреве конструкции, вследствие зависимости физико-механических характеристик материала от температуры, возникает так называемая косвенная неоднородность, которая может существенно влиять на напряженно-деформированное состояние. Учет этого явления в существующих программных комплексах весьма затруднен. Влияние неоднородности на НДС строительных конструкций исследовалось в работах В.И. Андреева, Б.М. Языева, А.С. Чепурненко [14-18], однако в указанных публикациях не рассматривались условия пожара.

В статьях [19-20] приводятся методики расчета температурного поля в двухслойных армоцементных конструкциях. Однако вопросы определения напряженно-деформированного состояния в указанных публикациях остаются незатронутыми.

При определении напряженно-деформированного состояния двухслойных оболочек мы будем опираться на деформационную теорию пластичности бетона Г.А. Гениева [21]. Касательный модуль при использовании этой теории, определяется как функция интенсивности сдвиговых деформаций:

$$E(\Gamma) = E_0 \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_s} \right), \quad (1)$$

где E_0 – начальный модуль упругости бетона, $\Gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2)}$ – интенсивность сдвиговых деформаций, ε_1 и ε_2 – главные деформации, Γ_s – предельная интенсивность сдвиговых деформаций, которая зависит от характера напряженного состояния:

$$\Gamma_s = \Gamma_c k(\lambda, \delta). \quad (2)$$

В формуле (3) Γ_c представляет предельную интенсивность сдвиговых деформаций при чистом сдвиге, параметр k определяется по формуле:

$$k(\lambda, \delta) = \frac{\lambda(1+\delta)}{2} + \sqrt{\frac{\lambda^2(1+\delta)^2}{4} + (1+\delta)}, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{f \sigma_{cp}}{T}$, $T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}$ – интенсивность касательных напряжений, $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2)/3$ – среднее напряжение, параметр f определяется по формуле:

$$f = \frac{3T_c(R_b - R_{bt})}{R_b R_{bt}}, \quad (4)$$

где R_b и R_{bt} – соответственно прочность бетона на сжатие и растяжение, T_c – предельная интенсивность касательных напряжений.

Параметр δ в формуле (3) при двухосном напряженном состоянии определяется как:

$$\delta = e \frac{3\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_{cp})(\sigma_2 - \sigma_{cp})(-\sigma_{cp})}{2T^3}, \quad (5)$$

где $e = \frac{R_b R_{bt}}{3T_c^2} - 1$.

Деформации бетона представляются как сумма упругих и вынужденных деформаций $\varepsilon_{b,\theta}$, которые включают деформации температурного расширения и усадки:

$$\varepsilon_{bx} = \frac{1}{E_b}(\sigma_{bx} - \nu\sigma_{by}) + \varepsilon_{b,\theta}; \varepsilon_{by} = \frac{1}{E_b}(\sigma_{by} - \nu\sigma_{bx}) + \varepsilon_{b,\theta}; \gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E_b}\tau_{bxy}. \quad (6)$$

В формулах (6) модуль деформации бетона E_b , а также коэффициент Пуассона предполагаются функциями координат x, y, z , а также времени t .

Изгибающие моменты и продольные силы представляют сумму усилий, воспринимаемых арматурой и бетоном:

$$M_x = M_{bx} + M_{sx}; M_y = M_{by} + M_{sy}; N_x = N_{bx} + N_{sx}; N_y = N_{by} + N_{sy}. \quad (7)$$

Моменты и продольные силы, воспринимаемые бетоном, определяются как:

$$M_{bx} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{bx} z dz; M_{by} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{by} z dz; N_{bx} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{bx} dz; N_{by} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{by} dz. \quad (8)$$

Усилия, воспринимаемые арматурой, записываются в виде:

$$N_{sx} = \sum_{i=1}^n \sigma_{sx,i} A_{sx,i}; N_{sy} = \sum_{i=1}^n \sigma_{sy,i} A_{sy,i}; M_{sx} = \sum_{i=1}^n \sigma_{sx,i} A_{sx,i} z_{sx,i}; M_{sy} = \sum_{i=1}^n \sigma_{sy,i} A_{sy,i} z_{sy,i}, \quad (9)$$

где $A_{sx,i}$ и $A_{sy,i}$ – площади поперечного сечения стержней i -го слоя на 1 погонный метр длины, $z_{sx,i}$ и $z_{sy,i}$ – расстояния от срединной поверхности оболочки до i -го слоя армирования.

Армирующие стержни предполагаются расположенными вдоль главных направлений кривизн, совпадающих с осями x и y .

В качестве геометрических уравнений будем использовать соотношения теории пологих оболочек В.З. Власова.

Полные деформации бетона представляют собой сумму деформаций средней поверхности и деформаций, вызванных изменением кривизны:

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_x^0 + z\chi_x; \varepsilon_{by} = \varepsilon_y^0 + z\chi_y; \gamma_{bxy} = \gamma^0 + 2z\chi_{xy}. \quad (10)$$

Деформации срединной поверхности определяются по формулам:

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u}{\partial x} + k_x w; \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v}{\partial y} + k_y w; \gamma^0 = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (11)$$

где u и v – перемещения срединной поверхности, w – прогиб, k_x и k_y – главные кривизны.

Изменения кривизн определяются по формулам:

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \chi_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (12)$$

Величины $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma^0, \chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ назовем обобщенными деформациями.

На основе соотношений (6)-(10) могут быть получены следующие соотношения между внутренними усилиями и обобщенными деформациями в матричном виде:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ S \\ M_x \\ M_y \\ H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & 0 & 0 & C_{33} \\ C_{11} & C_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \\ \chi_x \\ \chi_y \\ 2\chi_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_{x,\varepsilon} \\ N_{y,\varepsilon} \\ 0 \\ M_{x,\varepsilon} \\ M_{y,\varepsilon} \\ 0 \end{Bmatrix} = [D]\{\varepsilon\} - \{N_\varepsilon\}. \quad (13)$$

где $N_{x,\varepsilon}, N_{y,\varepsilon}, M_{x,\varepsilon}, M_{y,\varepsilon}$ – дополнительные фиктивные силы, обусловленные вынужденными деформациями, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij} – интегральные жесткостные характеристики оболочки.

Для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния оболочки, геометрические и физические уравнения должны быть дополнены уравнениями равновесия или вариационным принципом.

Чтобы использовать вариационный принцип Лагранжа, необходимо записать выражение потенциальной энергии упругой деформации, которое с учетом вынужденных деформаций принимает вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_A \{\varepsilon\}^T (\{N\} - \{N_\varepsilon\}) dA, \quad (14)$$

где A – площадь поверхности оболочки.

При использовании метода конечных элементов задача сводится к системе уравнений, имеющей вид:

$$[K]\{U\} = \{F\} + \{F_\varepsilon\}, \quad (15)$$

где $[K]$ – матрица жесткости, $\{U\}$ – вектор узловых перемещений, $\{F_\varepsilon\}$ – вектор дополнительных фиктивных сил, вызванных вынужденными деформациями.

Элементы матрицы $[K]$ нелинейно зависят от перемещений, поэтому для расчета используются пошаговые алгоритмы.

Обсуждение результатов. В работе [19] представлены результаты экспериментальных исследований прочности однослойных и двухслойных армированных оболочек двоякой кривизны в условиях пожара.

На рис. 1 показаны сечения испытываемых оболочек. Армирование выполнялось при помощи двух слоев тканой сетки № 8 с диаметром проволоки 0,7 мм, а также продольной арматуры из обыкновенной проволоки В-I диаметром 5 мм (14 штук), расположенной между сетками.

Для обеспечения совместной работы вермикулитобетонного и армированного слоя на их стыке также располагалась тканая сетка.

Для однослойных оболочек использовался класс бетона В30, а для двухслойных – В20. Для вермикулитобетонного слоя двухслойных оболочек прочности на сжатие и изгиб соответственно $R_{сж} = 2,3$ МПа, $R_{изг} = 1,3$ МПа.

На момент испытаний возраст бетона однослойных армированных оболочек составлял 12 лет. Двухслойные оболочки испытывались в возрасте 6 месяцев.

Испытания проводились на совместное действие температурных и силовых нагрузок. Температурный режим соответствовал условиям «стандартного пожара» регламентированного ГОСТ 30247.0–94.

Силовые нагрузки были представлены тремя вариантами: равномерно распределенная по всей площади оболочки нагрузка – 100 кгс/м² и 200 кгс/м², а также сосредоточенная сила в середине пролета – 1600 кгс.

Экспериментальные кривые изменения перемещений во времени для однослойных и двухслойных оболочек представлены соответственно на рис. 2-3. Знаку «+» на указанных графиках соответствует перемещение вверх.

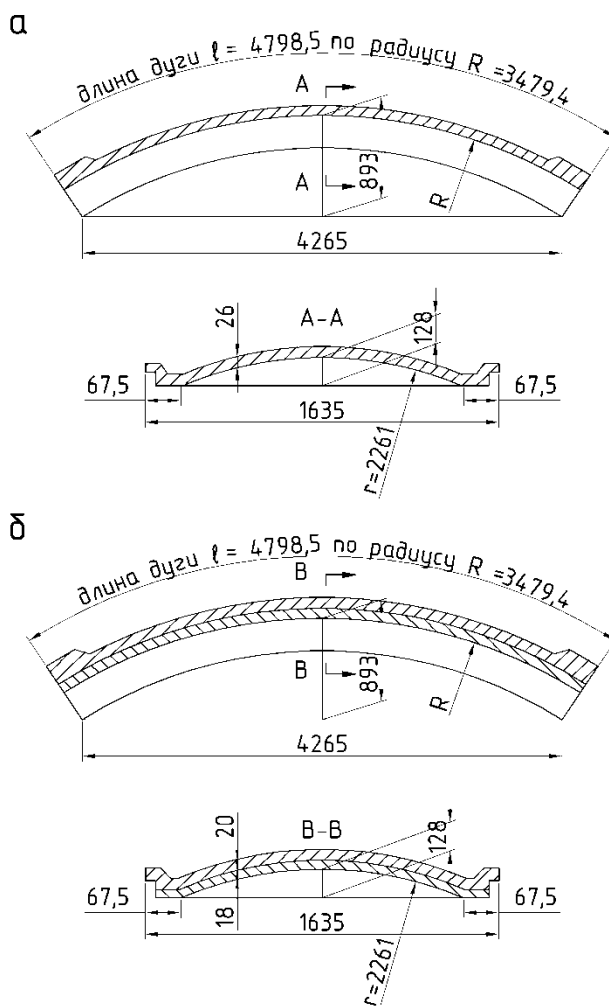


Рис. 1. Сечения однослойной (а) и двухслойной (б) оболочки
Fig. 1. Sections of a single-layer (a) and two-layer (b) shell

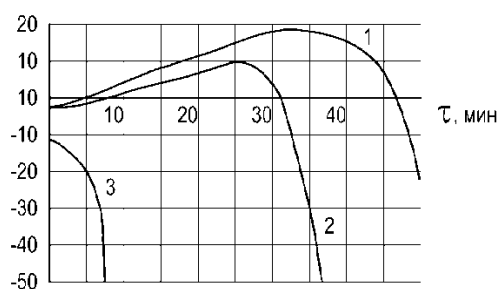


Рис. 2. Изменение перемещений (в мм) во времени для однослойных оболочек:

1 – $q = 100 \text{ кгс/м}^2$, 2 – $q = 200 \text{ кгс/м}^2$,
3 – $F = 1600 \text{ кгс}$

Fig. 2. Change of displacements (in mm) in time for single-layer shells: 1 – $q = 100 \text{ kgf / m}^2$, 2 – $q = 200 \text{ kgf / m}^2$,
3 – $F = 1600 \text{ kgf}$

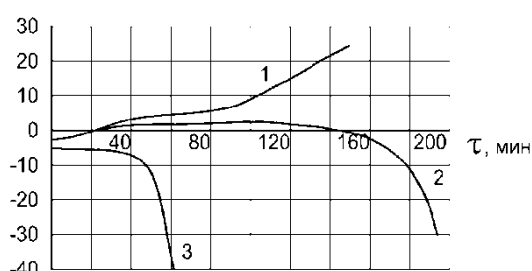


Рис. 3. Изменение перемещений (в мм) во времени для двухслойных оболочек:

1 – $q = 100 \text{ кгс/м}^2$, 2 – $q = 200 \text{ кгс/м}^2$, 3 –
 $F = 1600 \text{ кгс}$

Fig. 3. Change of displacements (in mm) in time for two-layer shells: 1 – $q = 100 \text{ kgf / m}^2$, 2 – $q = 200 \text{ kgf / m}^2$,
3 – $F = 1600 \text{ kgf}$

При расчете нами принимались следующие допущения:

1. Температура конструкции является функцией только координаты z . Расчет температурного поля выполнялся методом конечных разностей.
2. Форма оболочки – эллиптический параболоид.

Соответствующее уравнение поверхности имеет вид:

$$z = f \left[\frac{f_1}{f} \left(2 \frac{x}{a} - 1 \right)^2 + \frac{f_2}{f} \left(2 \frac{y}{b} - 1 \right)^2 - 1 \right], \quad (16)$$

где $f = f_1 + f_2$.

Использованные в уравнении (16) обозначения приведены на рис. 4.

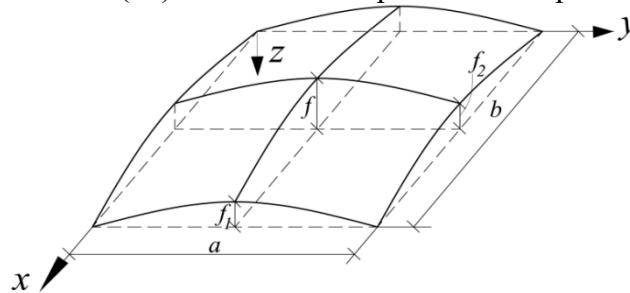


Рис. 4. Поверхность в форме эллиптического параболоида
Fig. 4. Elliptical Paraboloid Surface

Для представленных на рис. 1 оболочек: $a = 1.635$ м, $b = 4.265$ м, $f_1 = 0.128$ м, $f_2 = 0.765$ м.

На рис. 5 показан полученный в результате расчета график изменения во времени перемещений в середине пролета для однослойной оболочки при $q = 200$ кгс/м².

Правило знаков такое же, как на рис. 2 и рис. 3. При расчете принимали, что оболочка по контуру закреплена по z , края $x = 0$ и $x = a$ также закреплены по x , а края $y = 0$ и $y = b$ – по y .

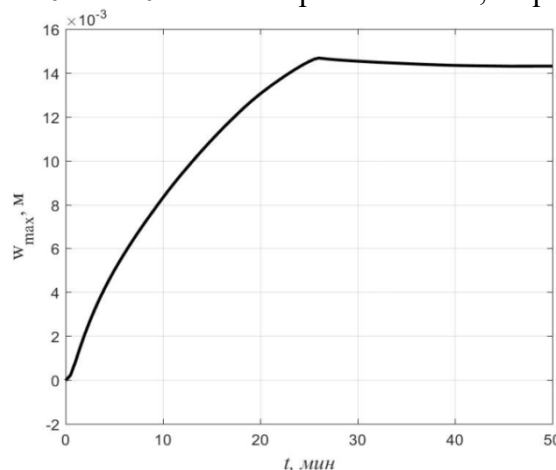


Рис. 5. Изменение во времени перемещений в середине пролета для однослойной оболочки при $q = 200$ кгс/м²

Fig. 5. Change in time of displacements in the middle of the span for a single-layer shell at $q = 200$ kgf/m²

Как и в эксперименте, на начальном этапе происходит перемещение оболочки вверх, однако расчетное значение прогиба при $t = 0$ существенно отличается от экспериментального. По результатам расчета величина $w_{\max}$ при $t = 0$ составила 0.0205 мм, а исходя из рис. 2, экспериментальное значение примерно равно 3 мм. Такое значительное отклонение может быть объяснено смещением опорного контура в момент приложения нагрузки. Максимальная теоретическая величина перемещения $w_{\max} = 14.7$ мм хорошо согласуется с экспериментальным значением (с учетом осадки опорного контура $w_{\text{эксп}} = 10 + 3 = 13$ мм). На теоретической кривой при $t = 25$ мин наблюдается излом. Начиная с этого момента времени, матрица жесткости конструкции была близка к вырожденной, что свидетельствует о начале разрушения оболочки. Точка экстремума на кривой 2 рис. 2 также наблюдается при времени, равном 25 мин. Для случая действия нагрузки $q = 100$ кгс/м² существенной разницы во времени разрушения автором при расчете не было выявлено.

Объяснить это можно тем, что основным фактором, влияющим на несущую способность оболочки, является высокая температура. Напряжения и перемещения в начальный момент времени от приложенных в эксперименте силовых воздействий на несколько порядков ниже напряжений и перемещений, возникающих в условиях стандартного пожара. Необходимо отметить, что существенное влияние на результат расчета оказывают граничные условия. В эксперименте оболочка свободно лежала над огневой камерой, однако вследствие наличия сил трения, перемещения краев $x = 0$ и $x = a$ в направлении оси x , как и перемещения краев $y = 0$ и $y = b$ по направлению оси y были ограничены.

Нами также моделировался случай, когда все точки опорного контура могут свободно перемещаться в направлении x и y . В этом случае выгиб оболочки не наблюдался, конструкция перемещалась только вниз.

Кроме того, возможными причинами отклонения теоретических результатов от экспериментальных данных могут быть:

1. Разброс физико-механических характеристик материалов в испытываемых конструкциях и неточность их определения;
2. Возраст оболочек на момент испытания (могло иметь место изменение свойств во времени);
3. Отклонение температуры в огневой камере от условий стандартного пожара (в эксперименте температура не замерялась);
4. Введенное допущение о форме поверхности оболочки;
5. Погрешности деформационной теории пластичности Г.А. Гениева;
6. Погрешности теории пологих оболочек.

На рис. 6 представлены результаты расчета двухслойной оболочки при действии нагрузки $q = 100 \text{ кгс/м}^2$. Разрушение оболочки в течение 200 мин, как и в эксперименте, не происходит. В отличие от экспериментальных данных, существенной разницы с результатами при $q = 200 \text{ кгс/м}^2$, как и в случае однослойной конструкции, не выявлено. Также на рис. 3 в отличие от рис. 6 обращает на себя внимание заметная величина начального прогиба, вероятно, связанная со смещением опорного контура.

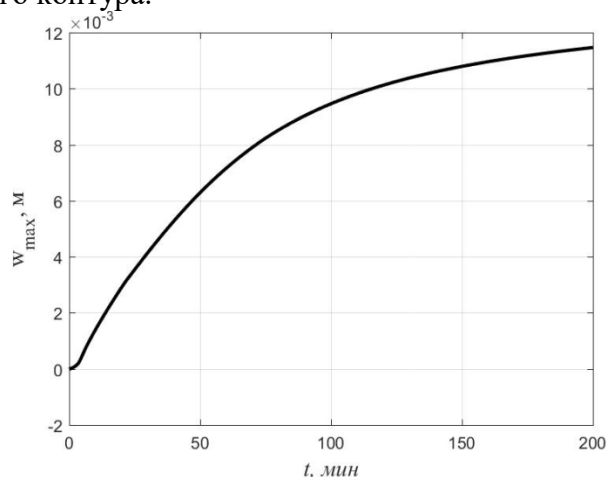


Рис. 6. Изменение во времени перемещений в середине пролета для двухслойной оболочки при $q = 100 \text{ кгс/м}^2$

Fig. 6. Change in time of displacements in the middle of the span for a two-layer shell at $q = 100 \text{ kgf/m}^2$

Вывод. Разработана методика расчета двухслойных армоцементных оболочек на термодинамические воздействия в условиях пожара с учетом физической нелинейности. В основу положена деформационная теория пластичности бетона Г.А. Гениева.

Установлено существенное влияние граничных условий на характер деформирования оболочки. При ограничении перемещений краев оболочки по x и y под действием температуры

наблюдается выгиб конструкции. При наличии возможности свободного перемещения точек опорного контура по x и y выгиб оболочки не наблюдался.

Выполнена апробация разработанной методики на имеющихся экспериментальных данных. В целом, совпадение результатов достаточно хорошее, указаны возможные причины отклонения теории от эксперимента.

Библиографический список:

1. Белостоцкий А. М., Дубинский С. И., Щербина С. В. Численное моделирование нестационарных полей температур в строительных конструкциях при пожарах // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. №. 3. С.65-80.
2. Гапонова Л. В., Резник П. А. Исследование огнестойкости плиты архитектурно-строительной системы Монофант // *Коммунальное хозяйство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2017. №. 135. С. 18-22.
3. Хабибулин Р. Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков пожара горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом : дис. канд. ... тех. наук. М. : Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2010. 162 с.
4. Хабибулин Р. Ш., Сучков В. П., Швырков С. А. Устойчивость наземных горизонтальных стальных резервуаров к воздействию тепловых потоков пожара разлива нефтепродуктов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2009. №. 4. С. 39-42.
5. Хабибулин Р. Ш. Валидность компьютерной модели теплового воздействия очага пожара на резервуар с горючей жидкостью // *Технологии техносферной безопасности*. 2008. №. 1. С. 6-16.
6. Рудзинский В. П., Гаращенко А. Н., Гаращенко Н. А. Теплотехнические расчеты двумерных температурных полей в конструкциях из полимерных композитов со вспучивающимся огнезащитным покрытием // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. №. 8. С. 42-47.
7. Гаращенко А.Н., Суханов А.В., Гаращенко Н.А., Рудзинский В.П., Мараховский С.С. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности // *Пожаровзрывобезопасность*. 2009. №5. С. 15-24.
8. Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П., Каледин В. О. Обеспечение требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью огнезащиты // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. №8 (145). С. 143-149.
9. Эль Мутассим Л. К расчету огнестойкости монолитных железобетонных конструкций зданий // *Коммунальное хозяйство городов*. 2000. №. 25. С. 98-102.
10. Зайцев А. М. Методика расчета прогрева огнезащищенных стальных конструкций в условиях воздействия экстремального температурного режима пожара // *Пожаровзрывобезопасность*. 2006. Т. 15. №. 6. С. 15-21.
11. Айдемиров К. Р. Задача нестационарной термopрочности оболочки // *Современные строительные материалы, технологии и конструкции*. Грозный, 2015. С. 436-443.
12. Мкртычев О. В., Сидоров Д. С. Расчет железобетонного здания на температурное воздействие // *Вестник МГСУ*. 2012. №. 5. С. 50-55.
13. Рухоллах Н. Огнестойкость монолитных каркасных зданий с учетом пространственной работы // *Современные наукоемкие технологии*. 2011. №. 1. С. 21-24.
14. Языев Б.М. и др. Построение модели равнопрочного толстостенного цилиндра при силовых и температурных воздействиях // *Научное обозрение*. 2014. №9, ч.3. С. 863-866.
15. Чепурненко А.С., Андреев В.И., Языев Б.М. Построение модели равнонапряженного цилиндра на основе теории прочности Мора // *Вестник МГСУ*. 2013. №5. С. 56-61.
16. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Model of equal-stressed cylinder based on the mohr failure criterion // *Advanced Materials Research*. 2014. Т. 887-888. С. 869-872.
17. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816>. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Никора Н.И. Плоская осесимметричная задача термовязкоупругости для полимерного цилиндра // *Инженерный вестник Дона*. 2015. №1-2.
18. Дудник А.Е., Никора Н.И., Чепурненко А.С. Обратная задача для осесимметрично нагруженного толстостенного цилиндра // *Научное обозрение*. 2015. № 11. С. 74-78.
19. Хежев Т.А. Технология изготовления и огнестойкость армоцементных конструкций со слоем вермикулитобетона // *Бетон и железобетон*. 2005. № 5. С 15 – 18.
20. Хежев Т. А., Культербаев Х. П. Теплотехнический расчет огнестойкости многослойных строительных конструкций // *Вестник Кабардино-Балкарского гос. ун-та. (Сер. «Технические науки», вып. 4)*. Нальчик: КБГУ. 2000. С. 9-11.
21. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.Стройиздат, 1974.316 с.

References:

1. Belostockij A. M., Dubinskij S. I., Shherbina S. V. Numerical simulation of unsteady temperature fields in building structures during fires. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012; 3:65-80. (In Russ)
2. Gaponova L. V., Reznik P. A. Investigation of the fire resistance of the slab of the architectural and construction system Monofant. [Komunal'ne gospodarstvo mist. Serija: Tehnichni nauki ta arhitektura]. *Communal state of the city. Series: Technical sciences and architecture*. 2017; 135: 18-22.
3. Habibulin R. Sh. Ustojchivost' k vozdejstviyu teplovyh potokov pozhara gorizont'al'nyh rezervuarov s nefteproduktom : dis. kand. ... teh. nauk. [Resistance to the effects of heat fluxes of fire of horizontal tanks with oil: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. M. : Akademija Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii, 2010;162. (In Russ)
4. Habibulin R. Sh., Suchkov V. P., Shvyrkov S. A. Stability of ground horizontal steel tanks to the effects of heat fluxes from a fire spill of oil product.[Zashhita okruzhajushhej sredy v neftegazovom komplekse] *Environmental protection in the oil and gas industry* 2009; 4 39-42. (In Russ)

5. Habibulin R. Sh. Validity of a computer model of the thermal effect of a fire source on a tank with a combustible liquid [Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti]. *Technologies of technosphere safety* 2008; 1: 6-16. (In Russ)
6. Rudzinskij V. P., Garashhenko A. N., Garashhenko N. A. Thermotechnical calculations of two-dimensional temperature fields in structures made of polymer composites with intumescent fire retardant coating // [Pozharovzryvbezopasnost']. *Fire and explosion safety* 2013; 22(8): 42-47. (In Russ)
7. Garashhenko A.N., Suhanov A.V., Garashhenko N.A., Rudzinskij V.P., Marahovskij S.S. Fire protection of structures made of polymer composites and assessment of its effectiveness. [Pozharovzryvbezopasnost']. *Fire and explosion safety* 2009; 5: 15-24. (In Russ)
8. Garashhenko A. N., Rudzinskij V. P., Kaledin V. O. Providing the required fire safety indicators for structures made of polymer composite materials using fire protection. [Izvestiya JuFU. Tehnicheskie nauki]. *Izvestiya SFedU. Technical science*. 2013; 8 (145): 143-149. (In Russ)
9. Jel' Mutassim L. To the calculation of fire resistance of monolithic reinforced concrete structures of buildings. [Kommunal'noe hozjajstvo gorodov]. *Utilities of cities* 2000; 25: 98-102. (In Russ)
10. Zajcev A. M. Method of calculating the heating of fire-protected steel structures under the influence of extreme temperature conditions of the fire [Pozharovzryvbezopasnost']. *Fire and explosion safety* 2006; 15(6): 15-21. (In Russ)
11. Ajdemirov K. R. The problem of unsteady heat resistance of the shell. [Sovremennye stroitel'nye materialy, tehnologii i konstrukcii]. *Modern building materials, technologies and designs*. Groznyj, 2015; 436-443. (In Russ)
12. Mkrtychev O. V., Sidorov D. S. Calculation of a reinforced concrete building on the temperature effect. [Vestnik MGSU] *Bulletin of MGSU*. 2012; 5: 50-55. (In Russ)
13. Ruhollah N. Fire resistance of monolithic frame buildings taking into account spatial work. [Sovremennye naukoemkie tehnologii]. *Modern high technologies*. 2011; 1: 21-24. (In Russ)
14. Jazyev B.M. et al. Construction of a model of an equally strong thick-walled cylinder under power and temperature influences [Nauchnoe obozrenie]. *Scientific review*. 2014; 9(3): 863-866. (In Russ)
15. Chepurmenko A.S., Andreev V.I., Jazyev B.M. The construction of a model of an equally stressed cylinder based on the Mohr failure criterion [Vestnik MGSU]. *Bulletin of MGSU*. 2013; 5: 56-61. (In Russ)
16. Andreev V.I., Chepurmenko A.S., Jazyev B.M. Model of equal-stressed cylinder based on the mohr failure criterion. *Advanced Materials Research*. 2014; 887-888: 869-872.
17. Dudnik A.E., Chepurmenko A.S., Nikora N.I. The plane axisymmetric thermo-viscoelasticity problem for a polymer cylinder. [Inzhenernyj vestnik Dona]. *Don Engineering Bulletin*. 2015; 1-2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816>. (In Russ)
18. Dudnik A.E., Nikora N.I., Chepurmenko A.S. The inverse problem for an axisymmetrically loaded thick-walled cylinder [Nauchnoe obozrenie]. *Scientific review*. 2015; 11: 74-78. (In Russ)
19. Hezhev T.A. Manufacturing technology and fire resistance of reinforced cement structures with a layer of vermiculite concrete [Beton i zhelezobeton]. *Concrete and reinforced concrete*. 2005; 5: 15-18. (In Russ)
20. Hezhev T. A., Kul'terbaev H. P. Thermotechnical calculation of fire resistance of multilayer building structures [Vestnik Kabardino-Balkarskogo gos. un-ta. (Ser. «Tehnicheskie nauki»). *Bulletin of the Kabardino-Balkarian state. un-ta. (Ser. "Technical Sciences"*, Nal'chik: KBGU. 2000; 4: 9-11. (In Russ)
21. Geniev G. A., Kissjuk V.N., Tjupin G.A. Teorija plastichnosti betona i zhelezobetona [The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. M.: Strojizdat, 1974; 316. (In Russ)

Сведения об авторах:

Журтов Артур Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительного производства; zhurtovartur@mail.ru

Хежев Толя Амирович, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и дизайна, заведующий кафедрой строительного производства; hejev_tolya@mail.ru

Хаджишалапов Гаджимогомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; yarus-x@mail.ru

Карданов Аслан Адамович, аспирант кафедры строительного производства; aslan_kardanov_95@mail.ru

Шогенцуков Мартин Анзорович, магистрант кафедры строительного производства; zhurtovartur@mail.ru

Information about the authors:

Artur V Zhurtov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Construction Production; zhurtovartur@mail.ru

Tolya A. Khezhev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Architecture, Construction and Design, Head of the Department of Construction Production; hejev_tolya@mail.ru

Gadzhimagomed N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Aslan A. Kardanov, Post-graduate Student, Department of Building production; aslan_kardanov_95@mail.ru

Martin A. Shogentsukov, Master Student, Department of Building production; zhurtovartur@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 17.01.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 15.02.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 15.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.042

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Оригинальная статья /Original Paper

Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом

А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. Целью данного исследования является обоснование методики статического расчета легких покрытий сооружений больших пролетов с линзообразными мембранно-пневматическими линзами, включающими стойки в отдельных точках пролета, шагово-итерационным методом приращений параметров. **Метод.** Исследование предполагает поэтапное применение метода конечных элементов (МКЭ), универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши с учетом геометрической нелинейности систем и физической нелинейности упругой работы воздуха в линзах и с учетом последствия избыточного давления воздуха. **Результат.** Производится сравнение по жесткости и несущей способности мембранно-пневматических линз, усиленных отдельными стойками, с соответствующими гибкими мембранно-пневматическими линзами классического типа. **Вывод.** При наличии стоек наблюдается эффект значительного усиления жесткости и несущей способности линзообразных мембранно-пневматических систем при больших пролетах. Расстояние между стойками вдоль здания можно при проектировании корректировать и тем самым, регулировать эффект усиления системы. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы значительно меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки первого и второго предельного состояния.

Ключевые слова: шагово - итерационный метод приращений параметров, усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши, учет геометрической и физической нелинейности упругой свойств воздуха в пневмополости, мембранно-пневматические линзы классического типа

Для цитирования: А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1):122-132. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method

A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnikeskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to substantiate the methodology for static calculation of light coatings for large-span structures with lenticular membrane-pneumatic lenses, including racks at individual points of the span, using the step-iterative method of parameter increments. **Method.** The study involves the phased application of the finite element method (FEM), the universal equation of state of gas and the improved Euler-Cauchy numerical procedure, taking into account the geometric nonlinearity of systems and the physical nonlinearity of the elastic work of air in lenses and

taking into account the aftereffect of excess air pressure. Result. A comparison is made in terms of rigidity and load-bearing capacity of membrane-pneumatic lenses, reinforced with individual posts, with the corresponding flexible membrane-pneumatic lenses of the classical type. **Conclusion.** In the presence of racks, the effect of a significant increase in the rigidity and bearing capacity of lenticular membrane-pneumatic systems is observed for large spans. The distance between the posts along the building can be adjusted during the design and thereby regulate the effect of strengthening the system. The maximum deflections of the lenticular-shaped membrane-pneumatic system reinforced with struts are much less than the maximum deflections of the lenticular membrane-pneumatic system of the classical type under the action of the calculated snow load of the first and second limit states.

Keywords: step - an iterative method of parameter increments, an improved numerical Euler-Cauchy procedure, taking into account the geometric and physical nonlinearity of the elastic properties of air in the pneumatic cavity, membrane-pneumatic lenses of the classical type

For citation: A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):122-132. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Введение. В Саратове строительство спортивных объектов началось в начале шестидесятых годов прошлого столетия, были построены и несколько стадионов и плавательный бассейн и несколько других спортивных объектов [1-3]. Второй этап массового строительства спортивных сооружений начался в современной капиталистической России в конце девяностых годов прошлого столетия. За последние двадцать лет в Саратовской области построено более двадцати ФОК, практически они есть во всех районах города Саратова и крупных городах региона.

Постановка задачи. Авторы данного исследования предлагают возводить большепролетные линзообразные мембранно-пневматические сооружения универсального назначения. Данные сооружения монтируются на площадке из конструкций заводского изготовления и на готовом фундаменте, могут быть полностью возведены за два месяца, еще несколько месяцев потребуется на оснащение данного сооружения специальным оборудованием в зависимости от его назначения. В таких сооружениях легко можно разместить легкоатлетический манеж, ледовый каток, бадминтонный центр и другие спортивные объекты. Эти сооружения являются экономическими эффективными, архитектурно-выразительными и могут украсить собой тот уголок населенного пункта, где они размещены (рис. 1.)

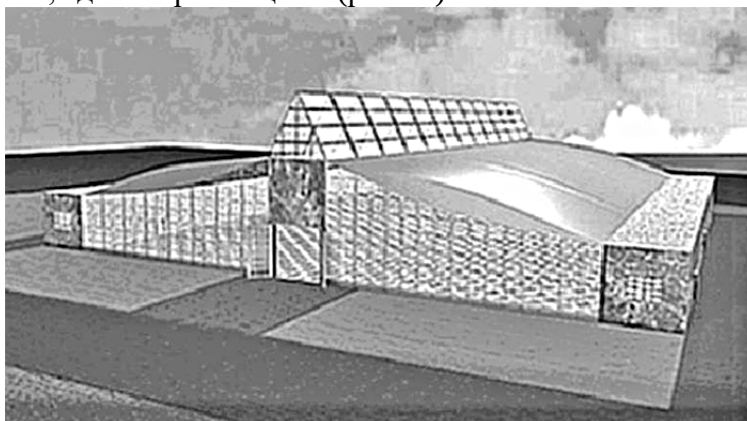


Рис. 1. Большепролетное мембранно-пневматическое сооружение
(составлено авторами)

Fig 1. Long-span membrane-pneumatic structure
(Compiled by the authors)

Однако данные сооружения достаточно сложные при расчете, требуются учесть не только традиционные нагрузки на сооружения, но и пневматические нагрузки, т.е. утечку и подкачку воздуха внутри герметичных пневмолинз.

Ранее расчет линзообразной мембранно-пневматической системы сводился к условному расчету предельного состояния ее несущего и напрягающего поясов в отдельности. Авторы данной статьи рассчитали пневматическую систему в целом, т.е. с учетом упругих свойств воздуха пневмолинзы и изменения давления воздуха в ней от совокупности всех параметров. Такой расчет позволяет очень точно описать реальную работу системы при действии как статических, так и динамических нагрузок. С учетом нелинейных факторов, так как данные системы сугубо нелинейные, геометрическая нелинейность в них в некоторых случаях достигает до 40 % [4, 6, 7].

Методы исследования. В начале двадцать первого века был разработан метод расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем средних пролетов (до 24 м) с учетом упругих свойств воздуха [4,5]. При этом развитием известного метода приращений параметров первого или второго порядка точности явился итерационный метод приращений параметров с поэтапным применением на шаге численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Этот метод включает в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений параметров первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в с-том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right), \text{ где } 2 \leq c \leq 4. \quad (1)$$

Приращения функций накоплений Δy_n осредняются численной процедурой Рунге-Кутты в пределах шага при $c = 2$. При $c = 4$ расчетная формула (1) итерационного метода приращений параметров дает на шаге результаты третьего порядка точности.

Геометрическую нелинейность системы удавалось полностью учесть, так как она достигала (10-15) %, но невозможно было достаточно точно учесть физическую нелинейность, обусловленную нелинейно-упругими свойствами воздуха и составляющую (30-40)% и более [4,5].

Требовалось более точно смоделировать процесс изменения избыточного давления воздуха в линзе под действием нагрузок. Для этого нужен был такой итерационный процесс, который рассматривал бы физическую нелинейность пневмолинзы как процесс последовательного изменения избыточного давления воздуха в герметичной полости линзы и учитывал бы различное влияние его на расчетные параметры системы.

Если для учета геометрической нелинейности пневматической линзы в итерационном методе Эйлера-Коши достаточно было 4 итерации, то для учета физической нелинейности работы воздуха и описания процесса изменения параметров пневмолинзы при нагружении, как показали исследования, иногда требуется 25-30 итераций и более. Сходимость итераций численной процедуры Эйлера-Коши доказана проф. Коши, но скорость итерационного процесса может быть различной.

К функциям накоплений относятся температурные, кинематические и пневматические нагрузки. Но только пневматические нагрузки относятся к нагрузкам, которые являются следящими и после приложения на итерации шага нагружения системы обладают сильным по сравнению с другими нагрузками последствием, т.е. последующей релаксацией системы, напряженной дополнительным давлением воздуха [6,11].

Авторы статьи совершенствуют прежде разработанную методику, развивая её для расчета геометрически и физически нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем

покрытий больших пролетов итерационным методом приращений параметров с поэтапным применением метода конечных элементов, универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности и с учетом последствий [4].

По новой методике расчета проведено численное исследование на ЭВМ новых линзообразных мембранно-пневматических систем, усиленных стойками, соединяющими мембраны в отдельных точках [5, 19].

Полученные результаты расчета сопоставлены с результатами расчета гибких линзообразных систем классического типа, дана оценка влияния геометрической нелинейности систем и физической нелинейности работы воздуха герметичных полостей покрытия, показана целесообразность расчета линзообразных покрытий при двух шагах нагружения и большом числе итераций, учитывающих последствие избыточного давления воздуха.

Результаты численного исследования усиленных стойками линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений позволили определить несущую способность и материалоемкость покрытия повышенной жесткости и оценить эффективность новых пневматических систем.

Для точного учета «последствия» на каждой итерации авторы применяют формулу, корректирующую величину прикладываемой к системе внешней пневматической нагрузки:

$$P^{(c+1)} = P^{(c)} - \Delta P^{(c)}. \quad (2)$$

Здесь под P подразумевается пневматическая нагрузка, возникающая при накачке воздуха в пневматическую линзу или при утечке воздуха из линзы. Отметим, что по формуле (3) на текущей итерации производится корректировка пневматической нагрузки P , которая будет действовать на следующей итерации. Применяемое при этом правило знаков: при увеличении давления в линзе приращение давления считается положительным, а при убывании - отрицательным.

Если приращение пневматической нагрузки положительное, то в процессе последствия избыточное давление в линзе уменьшается. Но поскольку величина задаваемой пневматической нагрузки P на каждой итерации должна быть величиной постоянной и равной заданной проектировщиком величине пневматической нагрузки, то знак в корректирующей формуле (2) должен быть «минус». Нагрузка P возрастет на $\Delta P^{(c)}$, останется постоянной и равной $P^{(c+1)} = P - \Delta P^{(c)}$.

Численная процедура предлагаемого варианта итерационного метода приращений параметров с поэтапным применением усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности, будет включать в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в s -том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu} \left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2} \right), \text{ где } 2 \leq c \leq C_k. \quad (3)$$

$$P^{(c+1)} = P - \Delta P^{(c)}.$$

Здесь C_k – конечная итерация, на которой процесс сходимости решения по достижении заданной точности завершается.

При этом хорда, отражающая собой процесс нагружения системы, при увеличении числа итераций постепенно наклоняется к истинной кривой решения задачи и при достижении заданной точности на последней итерации расчет завершается. Этот процесс, при достаточно большом начальном избыточном давлении воздуха в линзе большого пролета, сходится довольно быстро, что можно видеть по результатам, выведенным на печать в конце каждой итерации

расчета.

К функциям накоплений, влияющим на жесткость системы, относятся температурные, кинематические и пневматические нагрузки. Но только пневматические нагрузки относятся к нагрузкам, которые являются следящими и после приложения нагрузки на итерации шага нагружения системы обладают первичным последствием, т.е. следующей за нагружением системы релаксацией системы, напряженной, созданным пневматической нагрузкой избыточным давлением воздуха. Первичному последствию были посвящены работы некоторых отечественных и зарубежных исследователей [3- 5, 8, 10, 12 -18].

Обсуждение результатов. По разработанной методике статического расчета авторами проведено численное исследование на ЭВМ новых линзообразных мембранно-пневматических систем, усиленных отдельными стойками. Результаты расчета сопоставлены с результатами расчета гибких линзообразных систем классического типа. Результаты численного исследования усиленных стойками линзообразных мембранно-пневматических систем позволили определить несущую способность и материалоемкость покрытия, оценить эффективность новых систем и учесть вторичное последствие приращения избыточного давления воздуха, вызванное статическими традиционными нагрузками, в частности силовыми нагрузками. Для точного учета вторичного «последствия» на каждой итерации производится столько итераций на шаге, сколько требуется их до полного учета последствия и окончательного уравнивания системы [4].

Приведем пример расчета линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия пролетом 60 м на действие распределенной нагрузки QL с учетом последствия избыточного давления воздуха. Стальная мембранно-пневматическая линза, усиленная тремя стойками, соединяющими мембраны, в покрытии пролетом 60 м

Два шага нагружения. Исследуемая система, показана на рис. 1. Расчетная схема показана на рис. 2.

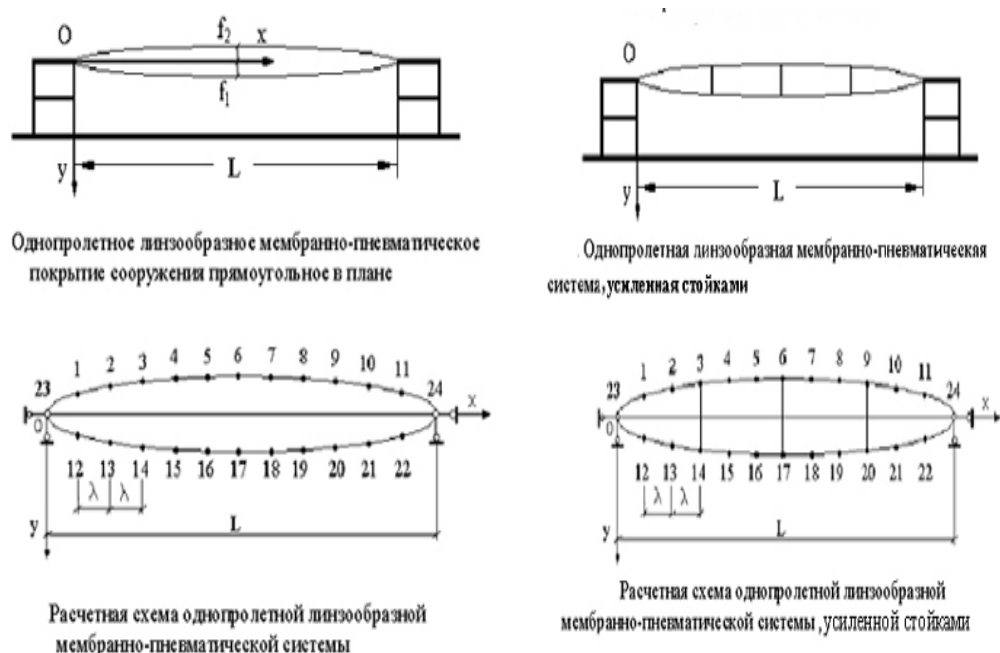


Рис. 2. Покрытия сооружений прямоугольные в плане и соответствующие расчетные схемы (составлено авторами)

Fig. 2. Coverings of structures are rectangular in plan and the corresponding design schemes (compiled by the authors)

Исходные данные:

Число шагов $NK = 2$. Число итераций на шаге $СК = 25$

Признак наличия подкачки-утечки воздуха $P = 0$

Признак силового воздействия $Q = 1$

Массив, описывающий топологию системы An array describing the topology of the system

1	23	2	0	0	0
2	1	3	0	0	0
3	2	4	0	0	14
4	3	5	0	0	0
5	4	6	0	0	0
6	5	7	0	0	17
7	6	8	0	0	0
8	7	9	0	0	0
9	8	10	0	0	20
10	9	11	0	0	0
11	10	24	0	0	0
12	0	0	23	13	0
13	0	0	12	14	0
14	0	0	13	15	3
15	0	0	14	16	0
16	0	0	15	17	0
17	0	0	16	18	6
18	0	0	17	19	0
19	0	0	18	2	0
20	0	0	19	21	9
21	0	0	20	22	0
22	0	0	21	24	0
23	0	1	0	12	0
24	11	0	22	0	0

Сосредоточенные силы $q(i)$, действующие на систему

Concentrated forces $q(i)$ acting on the system

$Q(2) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(4) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(6) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(8) = 6865 \text{ (H)}$

$Q(10) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(12) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(14) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(16) = 6865 \text{ (H)}$

$Q(18) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(20) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(22) = 6865 \text{ (H)}$

Избыточное давление в линзе на монтаже DP1(SL) = 3000

Погонная нагрузка на пояса от собственного веса $Q_1, Q_2 = 320, 240 \text{ (H)}$

Результаты счета на шаге N=2

Счет на шаге N = 2 CI = 24

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V_2 = 233.6251054855499$

Приращение объема полости линзы $DV = -.5560195144501279$

Приращение давления в линзе $PN(SL\%) = 196.4609$

Избыточное давление в линзе $PL(SL\%) = 3196.461$

Пневматические нагрузки на стадии эксплуатации

Pneumatic loads during operation

$PQN(1) = -139.8179840687308\#$

$PQN(2) = -985.0972326195661\#$

$PQN(3) = -111.2989760959658\#$

$PQN(4) = -983.1708636436597\#$

 $PQN(41) = 168.6066377272205\#$

$PQN(42) = 977.6754307044139\#$

$PQN(43) = 170.8573251302887\#$

$PQN(44) = 982.7088918785794\#$

Суммарные перемещения на шаге N=2 Total displacements at step N=2

Горизонтальные перемещения Horizontal movements	Вертикальные перемещения Vertical movements
U(1)= 1.204654670684335D-03	V(1)= 1.116122910798657D-02
U(2)= 1.747320853559926D-03	V(2)= 2.034522947117062D-02
U(3)= 1.746661883460063D-03	V(3)= 2.740386616338132D-02
U(4)= 1.423176651948843D-03	V(4)= 3.329878213981299D-02
U(5)= 7.873263312209724D-04	V(5)= 3.668310621603459D-02
U(6)= 5.810780888212486D-17	V(6)= 3.743615011636488D-02
U(7)=-7.873263312208454D-04	V(7)= 3.668310621603395D-02
U(8)=-1.423176651948696D-03	V(8)= 3.329878213981195D-02
U(9)=-1.746661883459906D-03	V(9)= 2.740386616338021D-02
U(10)=-1.747320853559792D-03	V(10)= 2.034522947116975D-02
U(11)=-1.204654670684257D-03	V(11)= 1.116122910798611D-02
U(12)= 1.114977937880524D-03	V(12)=-3.219415792142701D-03
U(13)= 2.529551790898961D-04	V(13)= 5.898803355633871D-03
U(14)=-1.781463228942868D-03	V(14)= 2.738518550495047D-02
U(15)=-5.552616017036223D-04	V(15)= 1.856404961498471D-02
U(16)=-2.202710657108793D-04	V(16)= 2.190168921508464D-02
U(17)=-6.164704605509447D-17	V(17)= 3.741304063088534D-02
U(18)= 2.202710657107488D-04	V(18)= 2.190168921508425D-02
U(19)= 5.552616017034742D-04	V(19)= 1.856404961498397D-02
U(20)= 1.781463228942689D-03	V(20)= 2.738518550494936D-02
U(21)=-2.529551790900408D-04	V(21)= 5.898803355633036D-03
U(22)=-1.114977937880629D-03	V(22)=-3.219415792143274D-03
U(23)= 0	V(23)= 0
U(24)= 0	V(24)= 0

Продольные усилия NAB (A, R) на стадии эксплуатации Longitudinal forces NAB (A, R) during operation

380301.9	378300.5	0	0	0
378300.5	376724.8	0	0	0
376724.8	375548.5	0	0	-5493.496
375548.5	374778.9	0	0	0
374778.9	374395.8	0	0	0
374395.8	374395.8	0	0	-5493.496
374395.8	374778.9	0	0	0
374778.9	375548.5	0	0	0
375548.5	376724.8	0	0	-5493.496
376724.8	378300.5	0	0	0
378300.5	380301.9	0	0	0
0	0	570125.3	567247.9	0
0	0	567247.9	564952.7	0
0	0	564952.7	562785.4	-5493.496
0	0	562785.4	561682.7	0
0	0	561682.7	561110.8	0
0	0	561110.8	561110.8	-5493.496
0	0	561110.8	561682.7	0
0	0	561682.7	562785.4	0
0	0	562785.4	564952.7	-5493.496
0	0	564952.7	567247.9	0
0	0	567247.9	570125.3	0
0	380301.9	0	570125.3	0
380301.9 0	570125.3	0	0	0

Далее приводим результаты шагово-итерационного расчета нелинейной линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия с линзой, усиленной тремя стойками, соединяющими мембраны. Расчет с одним и двумя шагами нагружения явились главными для расчета исследуемых покрытий. Кроме того, результаты расчетов той же линзообразной системы с числом шагов от 3 до 10 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет линзообразной системы с числом шагов от 3 до 10
Table 1. Calculation of a lenticular system with the number of steps from 3 to 10

Число шагов нагрузки Number of load steps	Приращение избыточного давления Overpressure increment	Прогиб верхнего пояса в середине пролета Deflection of the upper belt in mid-span
N=1	PN=142,9 Па	V=0,038157 м
N=2	PN=196,5 Па	V=0,037436 м
N=3	PN=193,1 Па	V=0,036840 м
N=4	PN=179,9 Па	V=0,036343 м
N=5	PN=165,0 Па	V=0,035925 м
N=6	PN=150,7 Па	V=0,035570 м
N=7	PN=137,8 Па	V=0,035267 м
N=8	PN=126,3 Па	V=0,035008 м
N=9	PN=116,1 Па	V=0,034785 м
N=10	PN=107,2 Па	V=0,034592 м

На основе результатов решения задач 1 - 10 построен график (рис. 3), показывающий изменение по шагам избыточного давления в замкнутой полости линзы, усиленной стойками. Зависимость величины избыточного давления в линзе от числа шагов, на которые разбивается нагрузка, является нелинейной, что выражает кривая OGFBE.

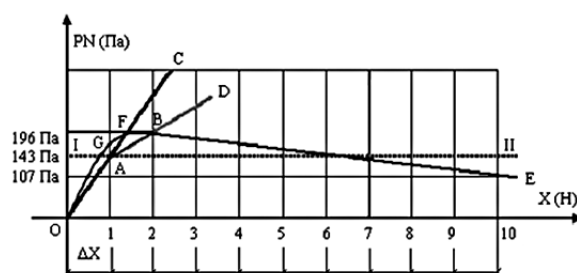


Рис. 3. График результатов вычисления расчетных величин избыточного давления воздуха в линзе, усиленной стойками (составлено авторами)

Fig. 3. Graph of the results of calculating the calculated values of excess air pressure in a lens reinforced with racks (Compiled by the authors)

Рассмотрим график с различным числом шагов нагружения системы, построенный по результатам, полученным для избыточного давления PN. Один шаг нагружения: точка А - результат решения задачи на шаге 01 по оси ОХ. Это решение получено на линейном участке ОG. Два шага нагружения: точка В - результат решения задачи на шагах 01 и 12 вдоль оси ОХ. Это решения получено на линейных участках ОА и АВD.

Кривая расчетных величин избыточного давления воздуха в линзе (кривая OGFBE), показывает, что максимальное давление воздуха получено при двухшаговом нагружении системы (точка В). Избыточное давление в точке В превышает избыточное давление в точке А, полученное при одношаговом нагружении на 37 %, так как $(196,4609 \text{ Па}) / (142,9228 \text{ Па}) = 1,37$. Максимальный прогиб системы получен при одношаговом нагружении. Он равен $V=0,038157 \text{ м}$, и превышает прогиб системы при двухшаговом нагружении всего на 2% так как $V=0,038157 \text{ м} / 0,037436 \text{ м} = 1,02$. Следовательно, для определения расчетных прогибов системы и расчетного избыточного давления воздуха в линзе, необходимо рассчитывать мембранно-пневматическую систему на действие расчетной нагрузки при одном и двух шагах нагружения.

Вычисляемые расчетные величины при решении задач с числом шагов нагружения системы более двух (эти результаты отражает снижающаяся прямая ВЕ) меньше максимальной величины избыточного давления воздуха в линзе. Отметим, что при расчете мембранно-пневматических систем необходимо учитывать не только первичное последствие от пневматических нагрузок, но и вторичное последствие от традиционных нагрузок. При расчете на пневматические нагрузки (подкачку или утечку воздуха) первичное последствие необходимо учитывать всегда, поскольку влияние его при расчете пневматической системы классического типа составляет (30 – 40) % [4]. Но проведенное исследование показало, что первичное последствие в линзообразной мембранно-пневматической системе с линзой, усиленной стойками, составило от заданного приращения избыточного давления воздуха 12,1%, что в три раза меньше той величины, которая получена для линзообразных мембранно-пневматических систем классического типа. Следовательно, наличие стоек уменьшает не только расчетные прогибы системы от расчетных снеговых нагрузок, но и последствие от нагружения систем избыточным давлением воздуха.

Авторами исследуются линзообразные мембранно-пневматические системы, усиленные расположенными вдоль пролета стойками, соединяющими мембраны. Обычно трех стоек, расположенных в четвертях и в середине пролета достаточно. В этом случае между стойками, то есть на четверти пролета, мембрана работает за счет избыточного давления воздуха. Каждая стойка делает одинаковыми прогибы нижней и верхней мембран системы в районе расположения стойки, что существенно уменьшает кинематические смещения поясов относительно друг друга. Общее же повышение жесткости пневматической системы повышает сопротивляемость и живучесть линзообразного покрытия при больших нагрузках, что особенно важно для районов с частыми ураганами, тайфунами и цунами.

Исследования показали, что при наличии стоек наблюдается эффект значительного усиления жесткости и несущей способности линзообразных мембранно-пневматических систем при больших пролетах. Расстояние между стойками вдоль здания можно при проектировании корректировать и тем самым, регулировать эффект усиления системы. Результаты избыточного давления и прогибов нагруженной снегом верхней мембраны нелинейного покрытия линзообразной мембранно-пневматической системы, усиленной в пролете тремя стойками, связывающими верхнюю и нижнюю мембраны и обычную пневмолинзу, без усиления.

Вывод. Результаты исследования сопоставляемых систем при действии расчетных снеговых нагрузок приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2. Действия расчетных снеговых нагрузок

Table 2. Actions of design snow loads

Снеговая нагрузка $q_{1/2}$ на полупролете при $n=2$ Snow load $q_{1/2}$ on a half-span with $n=2$	Линза с тремя стойками, в пролете Lens with three racks, in flight	Линза классического типа Lens classical type	Расхождение результатов Discrepancy results
Приращение давления PN Pressure increment PN	84,62 Па	373,94 Па	в 4,42 раз больше (на 342%) 4,42 times more (342%)
Вертикальный прогиб V_6 Vertical deflection V_6	0,113000 м	0,410000 м	в 3,63 раз больше (на 263%) 3,63 times more (by 263%)

Полученные результаты исследования работы при действии расчетных снеговых нагрузок усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы при сопоставлении её с гибкой линзообразной мембранно-пневматической системой классического типа позволяют сделать следующие выводы:

Таблица 3. Действия расчетных снеговых нагрузок
Table 3. Actions of design snow loads

Снеговая нагрузка на всем пролете q_l при $n=2$ Snow load on the entire span q_l at $n=2$	Линза с тремя стойками, в пролете Lens with three racks, in flight	Линза классического типа Lens classical type	Расхождение результатов Discrepancy results
Приращение давления PN Pressure increment PN	196,46 Па	423,21 Па	в 2,15 раз больше (на 115%) 2,15 times more (115%)
Вертикальный прогиб V_6 Vertical deflection V_6	0,037362 м	0,047141 м	в 1,26 раз больше (на 26%) 1,26 times more (26%)

1. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы в 3,6 раза меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки второго предельного состояния.
2. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы в 1,3 раза меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки первого предельного состояния.
3. Приращение избыточного давления в линзообразной системе, усиленной стойками, в 2,15 раз меньше приращения избыточного давления в линзообразной гибкой системе классического типа.
4. Площади поперечных сечений в линзообразной системе, усиленной стойками такие же, как в покрытии с линзой классического типа, то есть толщина несущего пояса 4 мм, толщина натягающего пояса 3 мм. В расчетах же на прочность толщина мембран потребовалась 3 мм и 2 мм соответственно.

Учитывая, что элементы усиления мембраны обычно устанавливают по длине покрытия на расстоянии друг от друга не менее 6 метров, их материалоемкость составит незначительную часть от материалоемкости мембранного покрытия классического типа.

Библиографический список:

1. Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер У. и др. Пневматические строительные конструкции. М.: Стройиздат, 1983. 439.
2. Вознесенский С. Б., Ермолов В. В. Проектирование пневматических конструкций в СССР и за рубежом. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1975.
3. Грек Е.В. Пневматические конструкции и продуктивизм в архитектурном дизайне// vselim.com, 2014.
4. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Книга 2. Дискретные расчетные схемы. Саратов. гос. аграр. ун-т, Саратов, 2000. 129 с. Деп. в ВИНТИ 29.05.00 № 1547 - В2000.
5. Полников С.В. Расчет нелинейных линзообразных мембранно-пневматических покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с усовершенствованной численной процедурой// Научное обозрение. - 2017. - № 19. - С. 35-41
6. Voznsenskiy S.B., Ermolov, V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Gosstroya USSR.
7. Geiger, David (1975). Low-profile air structures in the USA. Building Research and Practice, March-April, p. 80-87.
8. Jens G. Pohl. Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures – Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes. – California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California: 2014. – 406 p.
9. Krivoschapko, S.N., Galishnikova, V.V. Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 2015; 476.
10. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т 456. –
11. Уткин В.С. Расчет несущей способности буронабивных свай и подбор длины свай по коэффициенту запаса // Транспортные сооружения, 2017 №2, <https://t-s.today/PDF/02TS217.pdf> (доступ свободный)
12. Петров В.В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Саратов. ун-т, 1987. – 288 с.
13. Погонин А.О. Принципы формирования автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера: Автореф. дис. ... канд. арх. – Москва, 2010. – 30 с.

14. Поросенкова К.В., Пучков М.В. Проектирование нового города в экстремальных условиях крайнего севера // Архитектон: известия вузов, приложение к № 34, 2011 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа
15. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений. Москва: Издательство АСВ, 2018. – 396 с.
16. Теличенко В.И., Терентьев О.М., Липидус А.А. Технология возведения зданий и сооружений для студ. строит. спец. – М.: Высш. шк., 2006. – 446 с
17. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
18. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы М.: МИР, 1984. – 428 с.
19. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров в теории расчета нелинейных мембранно-пневматических систем с учетом упругой работы воздуха. М-во образования и науки Рос. Федерации, Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 186с.

References:

1. Ermolov V.V., Be'rd U.U., Bubner U.. Pnevmaticheskie stroitel'ny'e konstrukcii. M.: Strojizdat, 1983; 439. (In Russ)
2. Voznesenskij S. B., Ermolov V. V. Proektirovanie pnevmaticheskix konstrukcij v SSSR i za rubezhom. – M.: CINIS Goss-troya SSSR, 1975. (In Russ)
3. Grek Ev. Pneumatic structures and productivity in architectural design // vselim.com, 2014. (In Russ)
4. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Book 2. Discrete calculation schemes. Sarat. state agrarian un-t, Saratov, 2000; 129. Dep. v VINITI 29.05.00 № 1547 - V2000. (In Russ)
5. Polnikov S.V. Calculation of Nonlinear Lenticular Membrane-Pneumatic Coatings of Large-Span Structures by the Iterative Method of Parameter Increments with an Improved Numerical Procedure [Nauchnoe obozrenie] *Scientific review*. 2017;19: 35-41(In Russ)
6. Vozsenskiy, S.B., Ermolov, V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Goss-troya USSR. (In Russ)
7. Geiger David. Low-profile air structures in the USA. *Building Research and Practice*, 1975; March-April: 80-87.
8. Jens G. Pohl. Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures – Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes. *California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California*: 2014; 406.
9. Krivoshapko S.N., Galishnikova V.V. Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 2015; 476 p.
10. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2018; 456: 56.
11. Utkin V.S. Calculation of the bearing capacity of bored hanging piles and selection of the pile length according to the safety factor [Transportny'e sooruzheniya], *Transport facilities* 2017;2, <https://t-s.today/PDF/02TS217.pdf> (In Russ)
12. Petrov V.V. Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment [Text] / V.V. Petrov, I.G. Ovchinnikov, Yu.M. Shikhov. *Saratov: Sarat. un-t*, 1987; 288. (In Russ)
13. Pogonin A.O. Principles for the formation of autonomous residential buildings in extreme natural conditions: Abstract of the thesis. dis. ... cand. arch. Moskva, 2010; 30. (In Russ)
14. Porosenkova K.V., Puchkov M.V. Designing a new city in the extreme conditions of the Far North. [Arxitekton: izvestiya vuzov, prilozhenie] *Architecton: news of universities, application*, 2011; 34 [E'lektronny'j resurs]. – Rezhim dostupa (In Russ)
15. Rajzer V.D. Probabilistic methods in the analysis of the reliability and survivability of structures. Moscow *Izdatel'stvo ASV*, 2018; 396. (In Russ)
16. Telichenko V.I., Terent'ev O.M., Lapidus A.A. Technology of construction of buildings and structures for students. builds. specialist. 2006; 446. (In Russ)
17. Bate K., Vilson E. Numerical methods of analysis and finite element method M.: *Strojizdat*, 1982;447. (In Russ)
18. Gallager R. Method of finite elements. Fundamentals .M.: *MIR*, 1984; 428. (In Russ)
19. Kim A.Yu. An iterative method of parameter increments in the theory of calculation of nonlinear membrane-pneumatic systems, taking into account the elastic work of air. Federation, Sarat. state tech. un-t. 2005; 186. (In Russ)

Сведения об авторах:

Ким Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; sberbanksp@yandex.ru

Миша Фрикович Амоян, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; ezid-007@ya.ru

Виктор Евгеньевич Хапилин, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; khapilin2010@yandex.ru orcid:0000-0002-0690-3601

Information about authors:

Aleksey Yu.Kim, Dr.Sci. (Eng), Prof., Department of Building Materials, Structures and Technologies; sberbanksp@yandex.ru

Misha F. Amoyan, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; ezid-007@ya.ru

Viktor E. Khapilin, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; khapilin2010@yandex.ru; orcid:0000-0002-0690-3601

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 01.02.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 26.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 26.02.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-133-139

Оригинальная статья /Original Paper

**Зависимость расхода энергии в пересчете на 1 м³ бетона при использовании цемента
различной удельной поверхности**

А.А. Крутилин¹, Т.В. Крапчцова², Н.А. Инькова¹, О.К.Пахомова¹

¹Волгоградский государственный технический университет (Себряковский филиал),

¹403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, Россия

²АО «Себряковцемент»,

²403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Индустриальная 2, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является поиск рациональных способов изменения общего расхода энергии, затраченной на производство цемента в пересчете на 1 м³ бетона. **Метод.** Для получения достоверных данных применялись экспериментально-лабораторные методы испытания цемента. **Результат.** Испытания показали, что при постоянной прочности бетона расход цемента на 1 м³ бетона уменьшается с увеличением удельной поверхности вяжущего, особенно значительно в случае шлакопортландцемента. Результаты расчета показывают, что с увеличением удельной поверхности цемента расход общей энергии на их получение, отнесенный к 1 м³ бетона одинаковой прочности, уменьшается, причем наиболее существенно при увеличении удельной поверхности цемента с 300 до 400 м²/кг и меньше от 400 до 500 м²/кг. **Вывод.** Для снижения энергоемкости бетона, необходимо применять цементы, размолотые значительно тоньше, чем их размалывают на цементных заводах в мельницах открытого типа, несмотря на увеличение расхода электроэнергии. Цементы с высокой тонкостью помола способны сократить цикл тепловлажностной обработки бетонных изделий. Сокращение цикла позволяет увеличить оборачиваемость форм и производительность труда на заводах ЖБИ, а так же дополнительно снизить расход энергии на производство сборных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: тонкомолотые цементы, увеличение тонкости помола, шлакопортландцемент, граншлак, увеличение удельной поверхности вяжущего, удельный расход энергии

Для цитирования: А.А.Крутилин, Т.В. Крапчцова, Н.А. Инькова, О.К.Пахомова. Зависимость расхода энергии в пересчете на 1 м³ бетона при использовании цемента различной удельной поверхности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1):133-139. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-133-139

**Dependence of energy consumption in terms of 1 m³ of concrete when using cements
of different specific surface**

A. A. Krutinin¹, T. V. Krapchetova², N.A. Inkova¹, O. K. Pakhomova¹

¹Volgograd State Technical University (Sebryakov Branch),

¹21 Michurina Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

²Sebryakovtsement JSC,

²Industrial'naya Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to find rational ways to change the total energy consumption spent on cement production in terms of 1 m³ of concrete. **Method.** To obtain reliable data, experimental and laboratory methods for testing cement were used. **Result.** Tests have shown that at constant concrete strength, the consumption of cement per 1 m³ of concrete decreases with an increase in the specific surface of the binder, especially significantly in the case of Portland slag cement. The calculation results show that with an increase in the specific surface area of cements, the

total energy consumption for their production, referred to 1 m³ of concrete of the same strength, decreases, and most significantly with an increase in the specific surface area of cements from 300 to 400 m²/kg and less from 400 to 500 m²/kg. **Conclusion.** To reduce the energy intensity of concrete, it is necessary to use cements ground much thinner than they are ground at cement plants in open-type mills, despite the increase in energy consumption. Cements with high fineness of grinding can reduce the cycle of heat and moisture treatment of concrete products. Reducing the cycle allows to increase the turnover of molds and labor productivity at precast concrete plants, as well as further reduce energy consumption for the production of prefabricated reinforced concrete structures.

Keywords: finely ground cements, increase in fineness of grinding, Portland slag cement, granulated slag, increase in the specific surface of the binder, specific energy consumption

For citation: A.A. Krutinin, T.V. Krapchetova, N.A. Inkova, O. K. Pakhomova. Dependence of energy consumption in terms of 1 m³ of concrete when using cements of different specific surface. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):133-139. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-133-139

Введение. В настоящее время большинство предприятий железобетонных изделий заинтересованы в оптимизации собственных затрат на производство, повышении производительности труда и качестве выпускаемой продукции для сохранения конкурентоспособности. Вряд ли стоит ожидать в ближайшем будущем вложения больших инвестиций в промышленность железобетонных изделий и конструкций, потому целесообразнее было бы рассмотреть вопросы экономии строительных материалов при производстве бетонных изделий, и, первоочередно, цемента, как самого дорогостоящего из них.

Постановка задачи. Применение смешанных вяжущих, например, таких как шлакощелочные или комбинированные гипсовые вяжущие требует совершенствования технологических линий или создание новых, что влечёт большие капиталовложения [5].

Исходя из вышесказанного, в данной статье решено особое внимание уделить вопросу экономии цемента.

Существует много факторов, влияющих на его расход – это тонкость помола, тип и класс, водопотребление, набор прочности и др. Тем не менее, хорошо известно, что главные свойства цемента, в том числе его активность и скорость твердения, определяются не только химико-минералогическим составом портландцементного клинкера, размерами и формой кристаллов C₃S и C₂S, наличием минеральных добавок, но и, в большей мере, тонкостью помола цемента, формой его частичек и гранулометрическим составом.

Очень часто на заводах ЖБИ, чтобы ускорить процесс набора распалубочной прочности, завышают марку бетона, для этого увеличивая расход цемента. Можно этого избежать, если применять более тонкий помол вяжущего компонента или путём введения наполнителя в цемент при его помоле. Применение тонкомолотых цементов в производстве бетона позволяет в некоторых случаях значительно снизить его расход на 1 м³ в бетоне одинаковой марки. Однако получение цементов высокой тонкости требует большого расхода электроэнергии. Приведённые ниже исследования показывают, как изменяется общий расход энергии, затраченной на производство цемента в пересчёте на 1 м³ бетона, приготовленного на цементах разного типа.

Методы исследования. В ходе эксперимента была использована стандартная лабораторная шаровая мельница открытого цикла. Помол цемента осуществлялся без применения добавок интенсификаторов.

Для проведения исследования были приготовлены цементы следующих составов:

1. Бездобавочный цемент на основе клинкера с добавкой гипсоангидритового камня в пересчёте на SO₃ 2,5% [1, 2, 19].

2. Шлакопортландцемент с аналогичным содержанием гипсоангидритового камня; в качестве минеральной добавки использовался шлак доменный гранулированный Новолипецкого металлургического комбината в количестве 50% [1, 2, 12].

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Удельный расход энергии на измельчение цемента
Table 1. Specific energy consumption for grinding cements

Удельная поверхность, м ² /кг Specific surface, m ² /kg	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т Specific electricity consumption, kWh/t	
	Портландцемент Portland cement	Шлакопортландцемент Slag Portland cement
300	36	41
400	60	70
500	116	126

Расчёт и подбор бетонов вёлся на основе полученных цементах, а так же с применением в качестве крупного заполнителя – гранитного щебня, мелкого заполнителя – кварцевого песка [4].

Состав бетонов подобран с водоцементным соотношением В/Ц – 0,4; 0,5; 0,6 при жёсткости 20...30 с. Образцы бетонов размерами 10×10×10 см твердели в нормальных стандартных влажных условиях, после чего бетонные кубики испытывались на сжатие через 28 суток.

Обсуждение результатов. Испытания показали, что при постоянной прочности бетона расход цемента на 1 м³ бетона уменьшается с увеличением удельной поверхности вяжущего, особенно значительно в случае шлакопортландцемента (рис. 1, 2) [17].

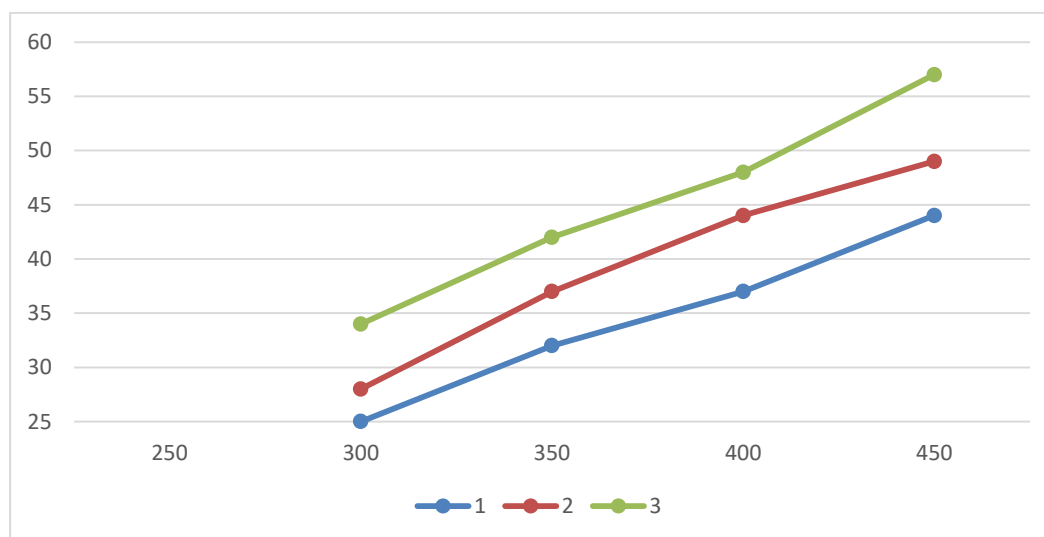


Рис. 1. Зависимость прочности бетона от расхода и тонкости помола цемента: бетон на портландцементе; 1, 2, 3 – удельная поверхность цемента соответственно 300, 400, 500 м²/кг

Fig. 1. The dependence of the strength of concrete on the consumption and fineness of cement grinding: concrete on Portland cement; 1, 2, 3 – specific surface of cements, respectively, 300, 400, 500 m²/kg

Учитывая полученные данные по расходу электроэнергии на помол цемента и их содержание в бетонах, был произведён расчёт общего расхода энергии на помол цемента с разной удельной поверхностью [16].

Общий расход энергии выразили в кг условного топлива, на 1 м³ бетона одинаковой прочности. Удельный расход электроэнергии на получение цемента в среднем по отрасли был принят 109,4 кВт·ч/т, на обжиг клинкера – 221 кг/т, на сушку шлака по опыту цементных заводов – 19,8 кг/т, а на получение электроэнергии на тепловых электростанциях – 0,324 кг/кВт·ч. Расход электроэнергии на приготовление сырьевой смеси, добавок и обжиг клинкера определен по разнице между общим потреблением и расходом на помол цемента до удельной поверхности 300 м²/кг – 36 кВт·ч/т: 109,4 – 36 = 73,4 кВт·ч/т [6, 7].

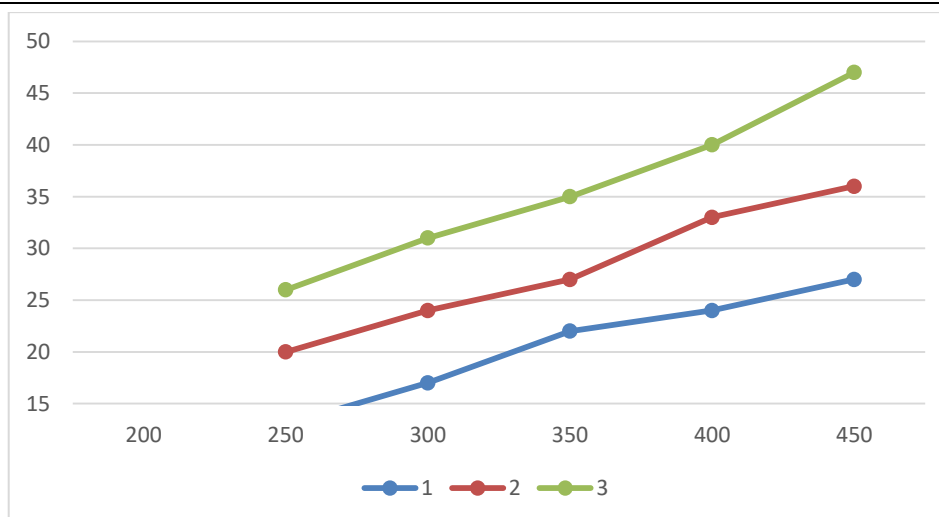


Рис. 2. Зависимость прочности бетона от расхода и тонкости помола цемента: бетон на шлакопортландцементе; 1, 2, 3 – удельная поверхность цементов соответственно 300, 400, 500 м²/кг

Fig. 2. The dependence of the strength of concrete on the consumption and fineness of cement grinding: concrete on Portland slag cement; 1, 2, 3 - specific surface of cements, respectively, 300, 400, 500 m²/kg

Результаты расчета, приведенные в табл. 2 (рис. 3, 4), показывают, что с увеличением удельной поверхности цементов расход общей энергии на их получение, отнесенный к 1 м³ бетона одинаковой прочности, уменьшается, причем наиболее существенно при увеличении удельной поверхности цементов с 300 м²/кг до 400 м²/кг и в меньшей степени от 400 м²/кг до 500 м²/кг [3].

Таблица 2. Расход энергии, затраченной на производство портландцемента, в пересчете на 1 м³ бетона

Table 2. Energy consumption spent on the production of Portland cement, in terms of 1 m³ of concrete

Вид цемента Type of cement	Марка бетона Concrete brand	Расход энергии, кг у.т. на 1 м ³ бетона при использовании цементов удельной поверхности, м ² /кг Energy consumption, kg c.e. per 1 m3 of concrete when using cements specific surface area, m ² /kg		
		300	400	500
ПЦ	В 30	Статья расхода. Размол цемента Expenditure. Cement grinding		
		0,42×36×0,324=4,9	0,37×60×0,324=7,22	0,343×116×0,324=12,9
		Статья расхода. Получение клинкера: электроэнергия Expenditure. Clinker production: electricity		
		0,42×73,3×0,324=9,95	0,37×73,3×0,324=8,80	0,343×73,3×0,324=8,12
		Статья расхода. Получение клинкера: топливо Expenditure. Getting clinker: fuel		
		0,42×0,95×221=88	0,37×0,95×221=77,5	0,343×0,95×221=72
Всего Total		102,85/100	93,52/90,9	93,02/90,31
ШПЦ	В 20	Статья расхода. Размол цемента Expenditure. Cement grinding		
		0,415×41×0,324=5,51	0,153×70×0,324=3,47	0,230×126×0,324=9,4
		Статья расхода. Получение клинкера: электроэнергия Expenditure. Clinker production: electricity		
		0,207×73,3×0,324=4,92	0,153×73,3×0,324=3,64	0,115×73,3×0,324=2,73
		Статья расхода. Получение клинкера: топливо Expenditure. Getting clinker: fuel		
		0,207×221=45,75	0,153×221=33,8	0,115×221=25,4
		Сушка шлака Slag drying		
		0,207×19,8=4,1	0,153×19,8=3,0	0,115×19,8=2,3
Всего Total		60,28/100	43,91/78,45	39,83/66,07

Так, при получении бетона марки В30 на портландцементе расход энергии уменьшается на 9,1% при увеличении удельной поверхности с 300 м²/кг до 400 м²/кг и на 0,59% при увеличении удельной поверхности с 400 м²/кг до 500 м²/кг [8 - 11, 18].

Особенно эффективен тонкий помол шлакопортландцемента, так как здесь при увеличении удельной поверхности с 300 м²/кг до 400 м²/кг расход энергии снижается на 21,55%, а при увеличении удельной поверхности с 400 м²/кг до 500 м²/кг на 12,38% [13, 15, 21].

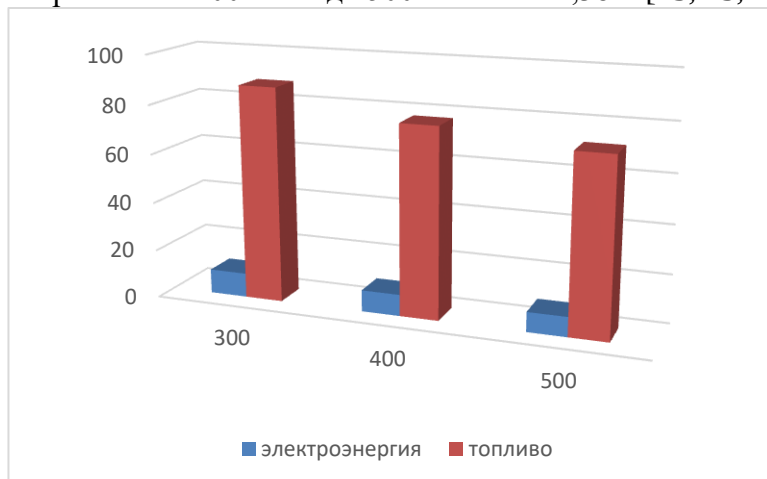


Рис. 3. Расход энергии, кг у.т. на 1 м³ бетона В30 при использовании портландцемента удельной поверхности 300, 400 и 500, м²/кг

Fig. 3. Energy consumption, kg s.e. per 1 m³ of concrete B30 when using Portland cement specific surface 300, 400 and 500, m²/kg

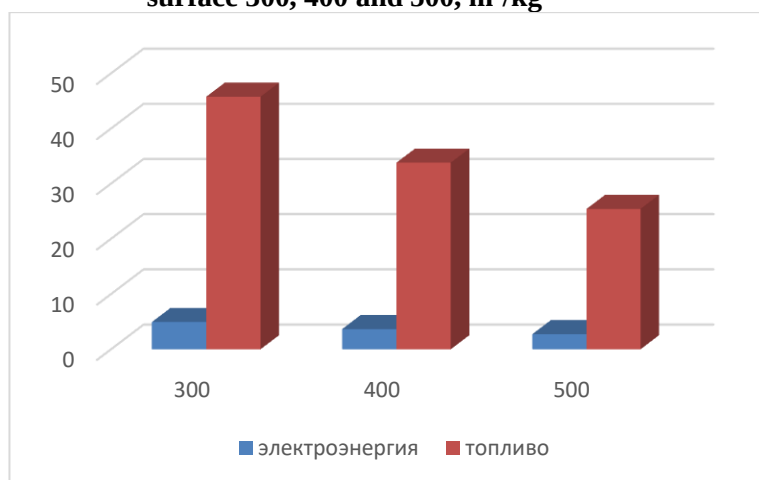


Рис. 4. Расход энергии, кг у.т. на 1 м³ бетона В20 при использовании шлакопортландцемента удельной поверхности 300, 400 и 500, м²/кг

Fig. 4. Energy consumption, kg of reference fuel per 1 m³ of B20 concrete when using portland slag cement of specific surface area 300, 400 and 500, m²/kg

Вывод. Для снижения энергоемкости бетона, необходимо применять цементы, размолотые значительно тоньше, чем их размалывают на цементных заводах в мельницах открытого типа, несмотря на увеличение расхода электроэнергии [20].

В среднем удельная поверхность цементов составляет 280 – 300 м²/кг. Кроме того, у тонкомолотых цементов есть и ряд других преимуществ. Уменьшение расхода цементов на 1 м³ бетона снижает транспортные расходы на перевозку цементов для заданного объема производства бетона.

Цементы с высокой тонкостью помола способны сократить цикл тепловлажностной обработки бетонных изделий. К ускорению цикла ТВО приводит более быстрый процесс гидратации цемента и соответственно набор его прочности во времени [14].

Сокращение цикла позволяет увеличить оборачиваемость форм и производительность труда на заводах ЖБИ, а так же дополнительно снизить расход энергии на производство сборных железобетонных конструкций.

Таким образом, из проведённых испытаний видно, что вполне возможно получить высококачественный бетон при снижении расхода цемента, за счёт его более тонкого помола.

Библиографический список:

1. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия.
2. ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия.
3. ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка.
4. Артамонов А.В., Кушка В.Н. Тяжелые бетоны на основе цемента различного помола. Строительные материалы. 2008. № 3. С. 50-51.
5. Василик Г.Ю., Грикевич Л.Н., Калабухов В.А. Состояние цементной промышленности России и пути выхода из кризиса. Технологии бетонов, 2009, № 11-12, с. 38-40
6. Вердиян М.А., Несмеянов Н.П., Ведрицкий В.В. Новый критерий оценки энергетической эффективности работы различных мельниц. Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века, часть 1, методические основы. 2004. № 7. С. 44-46.
7. Вердиян М.А., Несмеянов Н.П., Ведрицкий В.В. Новый критерий оценки энергетической эффективности работы различных мельниц. Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века, часть 2, расчеты и эксперименты. 2003. №8. С. 50-51.
8. Де Вердт К. Способы определения тонкости помола и размываемости//Цемент и его применение. 2010. № 5. С. 113-116.
9. Добшиц Л.М., Кононова О.В. Прочность и долговечность бетонов в зависимости от дисперсности цемента и наполнителей. В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 279-290.
10. Друхольский В.К., Степанов К.В., Трандофиров А.А., Стефаненко И.В. Способы измерения тонкости помола цемента. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 49 (68). С. 21-29.
11. Злобин И.А., Мандрикова О.С., Борисов И.Н. Цемент. Способ механического воздействия при помоле как фактор, определяющий формирование качественных характеристик цемента и его применение. 2016. № 1. С. 158-162
12. Крутилин А.А., Крапчатова Т.В., Пахомова О.К., Инькова Н.А. Исследование влияния ввода шлака при помоле клинкера на прочностные характеристики получаемого цемента в условиях АО «Себряковцемент» Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2 (83). С. 46-52.
13. Кузьменков М.И., Лукаш Е.В. Энергосбережение при помоле цемента. В сборнике: Ресурс- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии. Материалы Международной научно-технической конференции. Белорусский государственный технологический университет. 2014. С. 228-231.
14. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Химия цемента» для студентов специальности 2906. –Казань: КГАСУ, 2007. –16 с.
15. Несмеянов Н.П., Матусов М.Г., Картыгин А.В., Магометов Р.Р. Особенности снижения энергозатрат при помоле цемента в шаровых мельницах. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под редакцией В.С. Богданова. Белгород, 2018. С. 260-262.
16. Несмеянов Н.П. Методические основы разработки нового критерия оценки эффективности процесса измельчения цемента. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. № 11. С. 196-199.
17. Пироцкий В.З. Современные системы измельчения портландцементного клинкера и добавок. СПб.: ЦПО "Информация образования", 2000. 71 с.
18. Процессы помола и классификации в производстве цемента. Учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 171600 "Мех. оборудование и технол. комплексы предприятий строит. материалов, изделий и конструкций" направления 653500 "Стр-во" / Москва, 2004.
19. Пьячев В.А., Капустин Ф.Л. Производство и свойства клинкерных цемента. Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 322 с.
20. Пьячев В.А., Старцева Л.А. Зависимость энергоёмкости бетона от тонкости помола применяемого цемента. Технологии бетонов. 2010. № 5-6 (46-47). С. 36-37.
21. Романович А.А. Энергосберегающее оборудование для помола цемента В сборнике: Актуальные проблемы развития дорожного комплекса. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 104-110

References:

1. GOST 31108-2020 General construction cements. Specifications. (In Russ)
2. GOST 30515-2013 Cements. General specifications. (In Russ)
3. GOST 30744-2001 Cements. Test methods using polyfractional sand. (In Russ)
4. Artamonov A.V., Kushka V.N. Heavy concretes based on cements of various grinding methods. [Stroitel'nyye materialy] .Construction Materials. 2008; 3: 50-51. (In Russ)
5. Vasilik G.Yu., Grikevich L.N., Kalabukhov V.A. State of the cement industry in Russia and ways out of the crisis. [Concrete technologies]Concrete Technologies, 2009; 11-12: 38-40 (In Russ)
6. Verdiyan M.A., Nesmeyanov N.P., Vedritsky V.V. A new criterion for evaluating the energy efficiency of various mills. Building materials, equipment, technologies of the 21st century, P1, Methodological foundations. 2004; 7.: 44-46. (In Russ)

7. Verdiyev M.A., Nesmeyanov N.P., Vedritsky V.V. New criterion for evaluating the energy efficiency of the operation of various mills. Building materials, equipment, technologies of the 21st century, P2, calculations and experiments. 2003; 8: 50-51. (In Russ)
8. De Werdt K. Methods for determining the fineness of grinding and grindability. [Tsement i yego primeneniye] *Cement and its application*. 2010; 5: 113-116. (In Russ)
9. Dobshits L.M., Kononova O.V. Strength and durability of concrete depending on the dispersion of cement and fillers. In the collection: Concrete and reinforced concrete - a look into the future. Scientific works of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: 2014; 7: 279-290. (In Russ)
10. Druhol'sky V.K., Stepanov K.V., Trandofirov A.A., Stefanenko I.V. Methods for measuring the fineness of cement grinding. [Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura] *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2017; 49 (68): 21-29. (In Russ)
11. Zlobin I.A., Mandrikova O.S., Borisov I.N. Cement The method of mechanical action during grinding as a factor determining the formation of the qualitative characteristics of cement and its application. 2016; 1:158-162 (In Russ)
12. Krutulin A.A., Krapchetova T.V., Pakhomova O.K., Inkova N.A. Investigation of the effect of slag input during clinker grinding on the strength characteristics of the resulting cement under the conditions of Sebyakovcement JSC. [Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura] *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2021; 2 (83): 46-52. (In Russ)
13. Kuzmenkov M.I., Lukash E.V. Energy saving when grinding cement. In the collection: Resource and energy saving technologies and equipment, environmentally friendly technologies. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. *Belarusian State Technological University*. 2014; 228-231. (In Russ)
14. Guidelines for laboratory work on the discipline "Chemistry of cement" for students of specialty 2906. Kazan: KGASU, 2007;16. (In Russ)
15. Nesmeyanov N.P., Matusov M.G., Kartygin A.V., Magometov R.R. Features of reducing energy consumption when grinding cement in ball mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. Interuniversity collection of articles. Edited by V.S. Bogdanov. Belgorod, 2018; 260-262. (In Russ)
16. Nesmeyanov N.P. Methodological bases for the development of a new criterion for evaluating the effectiveness of the cement grinding process. [Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova] *Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov*. 2005; 11: 196-199. (In Russ)
17. Pirotsky V.Z. Modern systems for grinding Portland cement clinker and additives. St. Petersburg: TsPO "Information of education", 2000; 71. (In Russ)
18. Processes of grinding and classification in cement production. Proc. manual for students studying in the specialty 171600 "Mechanical equipment and technological complexes of enterprises building materials, products and structures" direction 653500 "Str-vo" Moscow, 2004. (In Russ)
19. Pyachev V.A., Kapustin F.L. Production and properties of clinker cements. Tutorial. Ekaterinburg: USTU-UIP, 2008; 322. (In Russ)
20. Pyachev V.A., Startseva L.A. The dependence of the energy intensity of concrete on the fineness of grinding of the cement used.[Tekhnologiya betonov] *Concrete technology*. 2010; 5-6 (46-47): 36-37. (In Russ)
21. Romanovich A.A. Energy-saving equipment for grinding cement In the collection: Actual problems of the development of the road complex. [Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova] *Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov*. 2016; 104-110 (In Russ)

Сведения об авторах:

Александр Александрович Крутилин, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; kotyra84@bk.ru

Татьяна Владимировна Крапчетова, инженер-аналитик, iwankra@mail.ru

Надежда Александровна Инькова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; coyote@bk.ru

Олеся Константиновна Пахомова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; pahomovaolesia@yandex.ru

Information about the authors:

Alexander A.Krutulin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; kotyra84@bk.ru

Tatiana V. Krapchetova, Analytical Engineer, iwankra@mail.ru

Nadezhda A.Inkova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies, coyote@bk.ru

Olesya K.Pakhomova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; pahomovaolesia@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 13.01.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 31.01.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 31.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.33

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-140-148

Оригинальная статья / Original Paper

Межфазные явления при увлажнении электростатического фибробетона

М.Р. Нахаев

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика

М.Д. Миллионщикова,

364051, г. Грозный, пр. Исаева, 100, Россия,

Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова,

364024, г. Грозный, ул. Шерипова, 32, Россия

Резюме. Цель. Целевые ориентиры современного строительства требуют поиска и развития новых эффективных технологий. Основная тенденция в строительной архитектуре – это создание зрелищных (здания-символы, предметы соревнований стран) объектов и сооружений, привлекающих внимание людей и пополняющих список уникальных достопримечательностей. Для реализации таких проектов необходимо внедрять высокотехнологичные передовые приемы, которым и является электростатический метод изготовления фибробетона. **Метод.** В работе рассматривается новый метод формования изделий и сооружений из фибробетона с помощью электростатики. Важное место в методе занимают физика межфазных явлений, а именно смачивание и капиллярные эффекты. Электростатическое осаждение слоев сухой бетонной смеси на формообразующий каркас происходит с помощью электростатических распылителей. **Результат.** Данный метод позволяет экономить цемент, вследствие применения водоцементного отношения, близкого к теоретической величине. Обсуждается вопрос об уплотнении нанесенных слоев сухой бетонной смеси вследствие смачивания водой с поверхностно-активными добавками. В связи с этим рассматривается кинетика заполнения водой сквозных и тупиковых капилляров и другие аспекты новой технологии. Разработано гидрофильное вяжущее с использованием добавки лигносульфоната кальция, позволяющее проявить эффективность метода электростатике в дальнейшем. **Вывод.** Процессы смачивания и кинетики заполнения жидкостью капилляров и каналов различной формы между частицами сухой бетонной смеси, а также уплотнение порошковой системы в результате увлажнения позволят реализовать трудные и уникальные проекты в реальность. Разработанный гидрофильный цемент на основе поверхностно-активной добавки ЛСТ (0,25%) способствует эффекту межфазового электростатического сцепления, за счет чего улучшаются свойства фибробетона.

Ключевые слова: электростатический фибробетон, легкий сеточный каркас, сухая бетонная смесь, волокна, увлажнение, смачивание, капиллярные эффекты

Для цитирования: М.Р. Нахаев. Межфазные явления при увлажнении электростатического фибробетона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 140-148. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-140-148

Interphase phenomena during humidification electrostatic fiber concrete

M.R. Nakhaev

M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

100 Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,

A.A. Kadyrov Chechen State University,

32 Sheripova Str., Grozny 364024, Russia

Abstract. Objective. The targets of modern construction require the search and development of new efficient technologies. The main trend in building architecture is the creation of spectacular

(buildings-symbols, objects of competitions of countries) objects and structures that attract the attention of people and add to the list of unique attractions. To implement such projects, it is necessary to introduce high-tech advanced techniques, which is the electrostatic method of manufacturing fiber-reinforced concrete. **Method.** The paper considers a new method of forming products and structures from fiber-reinforced concrete using electrostatics. An important place in the method is occupied by the physics of interfacial phenomena, namely wetting and capillary effects. The electrostatic deposition of layers of dry concrete mixture on the shaping frame occurs with the help of electrostatic sprayers. **Result.** This method allows saving cement, due to the use of a water-cement ratio close to the theoretical value. The issue of compaction of applied layers of dry concrete mix due to wetting with water with surface-active additives is discussed. In this regard, the kinetics of filling through and dead-end capillaries with water and other aspects of the new technology are considered. A hydrophilic binder has been developed using calcium lignosulfonate additive, which makes it possible to demonstrate the effectiveness of the electrostatic method in the future. **Conclusion.** The processes of wetting and the kinetics of liquid filling capillaries and channels of various shapes between the particles of the dry concrete mixture, as well as the compaction of the powder system as a result of moisture, will make it possible to realize difficult and unique projects in reality. The developed hydrophilic cement based on the surface-active additive LST (0.25%) contributes to the effect of interfacial electrostatic adhesion, thereby improving the properties of fiber-reinforced concrete.

Key words: electrostatic fiber-reinforced concrete, light mesh frame, dry concrete mixture, fibers, wetting, wetting, capillary effects

For citation: M.R. Nakhaev. Interphase phenomena during humidification electrostatic fiber concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):140-148. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-140-148

Введение. Две с лишним тысячи лет назад строители Римской империи брали вулканический пепел, пемзу и туф и тщательно измельчали их. Эту смесь, иногда с добавлением извести, использовали как вяжущее при приготовлении бетона и растворов [1]. Теперь это называется пуццолановый цемент или портландцемент с пуццоланой. Он производится при помоле клинкера с добавлением активных минеральных добавок. С тех пор в строительстве используются десятки марок цементов и многие десятки составов бетонов. Технологии бетонных работ тоже динамично менялись.

Например, сравнительно недавно появился способ изготовления изделий и сооружений из бетона с применением электростатики. Существенные отличия от давно известных технологий получения изделий из бетона заключается в том, что, во-первых, требуется формообразующая основа, например, в виде арматурно-сеточного каркаса изделия, который покрывается сухой бетонной смесью с помощью электростатических распылителей. Во-вторых, этот каркас может быть очень легким, что существенно снижает его материалоемкость и облегчает его изготовление. Электростатическое осаждение слоев сухой бетонной смеси на формообразующий каркас происходит с помощью электростатических распылителей [2,3]. Порошок сухой смеси оседает на каркас без удара и заметного механического воздействия, в отличие от технологии покрытия, например, торкретбетоном, которым покрывают прочную основу с сильным ударом, поскольку струя диспергированного бетона имеет скорость 80-100 м/с.

Постановка задачи. Формообразующий каркас может быть легким потому, что первый же электростатически осажденный слой сухого фибробетона после увлажнения водой и небольшой выдержки времени заметно увеличивает прочность каркаса. По мере увеличения количества слоев бетона и их увлажнения быстро увеличивается прочность каркаса, многократно опережая нагрузку от увеличения массы нанесенного фибробетона. Поэтому формообразующий каркас можно делать легким. Во многих случаях для изготовления каркаса можно использовать тонкую стальную сетку, аналогично применению их в армоцементных конструкциях. В армоцементной плите армирующая основа – это несколько параллельных тонких мелкострук-

турных стальных сеток, как правило, покрытых цинком, отстоящих на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга в матрице из плотного цементно-песчаного бетона [4].

Поэтому для изготовления каркаса сооружения можно использовать арматурную проволоку, сварную или тканую сетку из проволоки. Для улучшения покрытия формообразующей основы сухой смесью бетона в некоторых случаях можно дублировать стальную сетку прорезанной грубой тканью (редкой мешковиной) из джута и других гидрофильных волокон. Всё это снижает трудоемкость и металлоемкость изготовления формообразующего каркаса для малоэтажных построек.

В традиционной технологии часто высокий расход бетона – это следствие того, что бетонная смесь оптимального состава (имеется в виду, в первую очередь количество воды по отношению к массе вяжущего) обладает повышенной жесткостью. Жесткая смесь с трудом заполняет форму, особенно с густой арматурой. Из-за этого толщина стенок при проектировании изделия закладывается больше, чем это необходимо для обеспечения нужной прочности. Особенно это вредно при большой серийности изделий, так как повышенная масса сказывается на экономических показателях [5]. Существует распространенный конструкторский прием: для уменьшения расхода бетона с одновременным сохранением жесткости изделия, форму делают с внешним или внутренним оребрением. Но этот прием связан с существенным повышением сложности и стоимости форм для изготовления оребренных изделий из железобетона. Этот прием широко используется в другой области – при проектировании изделий из пластмасс или изделий для литья под давлением из сплавов цветных металлов. Особенность этих изделий из пластмассы и металла в том, что они производятся в литейных формах тиражом десятками и сотнями тысяч и стоимость дорогой литейной формы сравнительно быстро окупается.

Исключительного мастерства в деле применения ребер жесткости для своих архитектурных проектов из железобетона достиг Пьер Луиджи Нерви [6]. Кроме решения важной технической задачи, применением ребер жесткости П.Л. Нерви достигает в своих проектах функциональной выразительности (рис. 1).



Рис. 1. П.Л. Нерви. Авиационный ангар в Орбетелло, 1938. Развитые высокие и одновременно узкие ребра жесткости из железобетона придают своду ангара прочность [7]

Fig. 1. P.L. Nerves. Aircraft hangar in Orbetello, 1938. Developed high and at the same time narrow reinforced concrete stiffeners give the hangar vault strength [7]

Снижение расхода цемента достигают уменьшением водоцементного отношения (В/Ц). Но при этом увеличивается жесткость бетона, что нежелательно. В этом случае облегчают заполнение бетоном форм с густой арматурой применением пластификаторов, суперпластификаторов и других технологических добавок [8, 9]. Новая технология изготовления многих типов изделий и сооружений с применением электростатики позволяет работать во всем диапазоне водоцементных отношений и с различными смесями по составу. В том числе, с минеральными добавками естественного или техногенного происхождения, прошедшими механоактивацию при тонком измельчении [10]. Тонкое измельчение широко используется в производстве строи-

тельных материалов, что требует повышенного расхода электроэнергии [11]. Но увеличенный расход энергии оправдывается, так как минеральные добавки, прошедшие тонкое измельчение, увеличивают свою удельную поверхность и химическую активность, что способствует ускорению технологических процессов и повышению качества продукции.

Методы исследования. Благодаря применению в новой технологии электростатики появляется возможность раздельного нанесения на формообразующий каркас изделия сухой бетонной смеси и последующего увлажнения ее. Применение оптимального водоцементного отношения дает экономию цемента без снижения прочности изделий. Для точного определения величины В/Ц нужно провести дополнительные исследования, чтобы по времени и другим условиям увлажнения получить бетон с заданным отношением В/Ц. Для лучшего смачивания компонентов сухой смеси бетона вода, как правило, должна содержать поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Лучше проводить увлажнение нанесенного слоя сухого бетона генератором холодного тумана [11]. Имеющиеся на рынке генераторы тумана распыляют воду каплями размером не более 50 мкм. Повторяют циклы покрытия сухой смесью и увлажнения водой до получения необходимой толщины фибробетона. Между циклами делают выдержки времени для набора фибробетоном начальной прочности.

Здесь рассмотрим физические и другие условия для увлажнения компонентов сухой смеси бетона. В этом процессе важная роль принадлежит физике межфазных явлений, а именно смачиваемости и капиллярным эффектам.

Важная стадия в новом методе – это процесс смачивания водой сухой бетонной смеси, электростатическим методом нанесенной на каркас изделия. О степени смачивания жидкостью твердой поверхности судят по так называемому краевому углу. Краевой угол смачивания измеряется в точке встречи трех фаз:

- жидкости (в нашем случае капля воды);
- твердой поверхности, на которой «сидит» капля;
- газа (обычно воздуха).

Для измерения краевого угла нужно в точке схождения упомянутых трех фаз провести касательную к поверхности капли. На рис. 2 краевой угол θ – это направление от подложки против часовой стрелки.

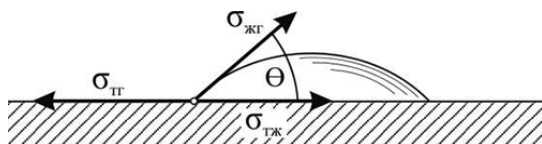


Рис. 2. Определение угла смачивания Θ жидкостью твердой поверхности
Fig. 2. Determination of the contact angle Θ with a liquid of a solid surface

При полном смачивании угол $\theta = 0^\circ$. Условно полагают, что при плохом смачивании угол $\theta = 90^\circ$ и больше, вплоть до 180 градусов [12]. Случай почти абсолютного не смачивания в природе – это небольшая капля росы, лежащая на листе травы, покрытым растительным воском.

$$\cos \Theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг}. \quad (1)$$

Поэтому в технологии электростатического нанесения веществ на частицах цемента и других компонентов сухой бетонной смеси и особенно волокон, заметно снижающих смачивания их водой, нужно относиться внимательно.

В случае сферической межфазной поверхности, например, для малой капли радиусом r , закон П. Лапласа для определения давления p_σ внутри капли имеет вид [15]:

$$p_\sigma = 2\sigma_{12} / r, \quad (2)$$

где σ_{12} – поверхностное натяжение воды на границе с воздухом, r – радиус капли или мениска.

При вогнутом мениске давление в жидкости понижено по сравнению с давлением в воздухе. Для выпуклого мениска давление в жидкости будет больше, чем в воздухе или в другом окружающем газе.

Например, для капли воды радиусом 1 мкм, давление внутри капли, обусловленное поверхностным натяжением, равно около 150 кПа (1,5 бар). Это говорит о том, что проявления поверхностного натяжения не так уж малы применительно к микрообъектам, к которым можно отнести частицы сухой бетонной смеси и узкие капилляры, и поровое пространство между ними. Поэтому смачивание и капиллярные эффекты играют определяющую роль в процессах увлажнения, пропитке и уплотнения частиц осажденной на формообразующий каркас сухой бетонной смеси.

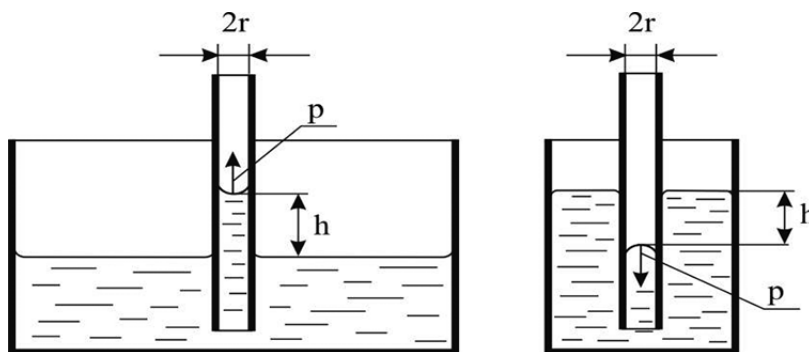


Рис. 3. Два случая в опытах по смачиванию
(слева - жидкость смачивает стенки узкой трубки; справа - жидкость не смачивает стенки трубки)

Fig. 3. Two cases in wetting experiments

(left – liquid wets the walls of a narrow tube; right – the liquid does not wet the tube walls)

Обсуждение результатов. Жидкость поднимается, если она смачивает стенки капилляра. Этот случай показан на рис. 3 слева (гидрофильный капилляр). Справа показан вариант, когда жидкость не смачивает стенки гидрофобного капилляра (например, ртуть в стекле). На какую высоту h поднимется жидкость по капилляру вычисляется по формуле:

$$h = (2\sigma \cos \Theta) / \rho g r, \quad (3)$$

где r – радиус узкой трубки, ρ – плотность жидкости, g – ускорение силы тяжести.

Если в системе лучше смачивание и узкие каналы – больше капиллярный подъем.

Например, за 400 миллионов лет эволюции у деревьев появились весьма тонкие сосуды. Сосуды обеспечивают подъем питательных соков в деревьях на многие десятки метров. При вертикальном канале между частицами гидрофильного цемента шириной 10 мкм, при σ воды, равном 0,072 Н/м, угол смачивания водой гидрофильного цемента примем $\cos \Theta = 60^\circ$, высота поднятия воды по зазору между частицами будет 1,47 м. Реально между частицами цемента будет очень извилистый канал и, кроме того, он будет частично перекрываться другими частицами. Но вода, обладая хорошими смачивающими свойствами, обладает хорошими проникающими свойствами.

Зависимость глубины проникания жидкости в сквозной цилиндрический капилляр от времени имеет вид:

$$h = [(r \sigma t \cos \Theta) / 3\mu]^{1/2}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент вязкости, σ – коэффициент поверхностной энергии, θ – краевой угол, r – радиус капилляра, t – время.

Расчет для зазора размером 5 мкм между частицами гидрофильного цемента при Θ близком к нулю дает заполнение водой зазора длиной 24 мм за 5 с. Но реально, видимо, скорость заполнения будет примерно в 1,5 раза меньше в силу эффекта повышения вязкости поллярных жидкостей в узких капиллярах [16] и вследствие взаимодействия воды с цементом. Что достаточно для быстрой пропитки водой слоя из минеральных частиц.

В порошковых системах, если жидкости будет недостаточно, то вода уйдет из широких капилляров в более мелкие. Это следует из выражения (3). При наличии больших зазоров меж-

ду частицами сухой бетонной смеси, жидкость из более широких каналов и каверн будет перетекать в более узкие капилляры. Конечно, попавшая вода в микротрещины на поверхности самой частицы, никуда не перетечет. Потому, что микротрещины на поверхности частиц априори меньше большинства зазоров между частицами цемента, тонкого песка и других активных добавок [17,18] и волокон.

Представляет интерес наполнение жидкостью капилляра, один конец которого глухой. Наполнение такого капилляра длиной h_0 будет происходить до того момента пока давление за счет поверхностного натяжения в жидкости не сравняется с давлением в парогазовой смеси в тупиковом конце капилляра. Это произойдет, когда жидкость проникнет в капилляр на высоту h (рис. 4). Когда первый этап закончится, капилляр будет продолжать заполняться, но во много раз медленнее. Объясняется это тем, что молекулы воздуха, запертые в глухом капилляре, сначала диффундируют в жидкость, а потом выходят из жидкости в атмосферу.

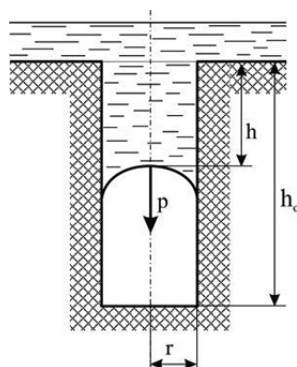


Рис. 4. Заполнение тупикового цилиндрического капилляра жидкостью
 Fig. 4. Filling a dead-end cylindrical capillary with liquid

Растворимость воздуха в воде при нормальной температуре и давлении очень низка, поэтому диффузия молекул воздуха идет медленно. В случае заполнения каналов между частицами сухой бетонной смеси, вода, за счет малого краевого угла в системе «вода - цемент», и попутно взаимодействия с другими компонентами сухой смеси бетона, быстро пропитывает всю порошковую систему.

Частицы порошковой минеральной смеси образуют поровое пространство различной морфологии. В этой связи интересно рассмотреть картину заполнения водой глухих конических каналов. Оказывается, они заполняются с двух сторон (рис. 5).

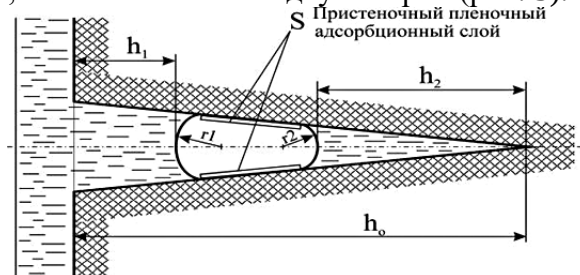


Рис. 5. Пропитка конического тупикового капилляра жидкостью
 Fig. 5. Impregnation of a conical dead end capillary with liquid

На рис. 5 обозначено: r_1 и r_2 – радиусы большого и маленького менисков, S – адсорбированная пленка жидкости, прилегающая к стенке канала; h_0 – общая длина глухого конусного канала; h_1 – глубина жидкости на входе в глухой канал; h_2 – часть у вершины капилляра, занятая жидкостью.

Адсорбционный пленочный слой жидкости, показанный на рис. 5, всегда существует в силу наличия расклинивающего давления [19], открытого Дерягиным Б.В. и имеющего большое значение в физике межфазных явлений. Испарение жидкости с мениска с меньшей кривизной r_1 и конденсация водяного пара на мениске большей кривизны r_2 вносит очень небольшой вклад по сравнению с пленочным пристеночным течением при заполнении конусного глухого

канала. Уплотнение смачиваемых частиц сухой бетонной смеси (цемент, тонкий песок, активные минеральные частицы и волокна) при увлажнении водой (рис. 6).

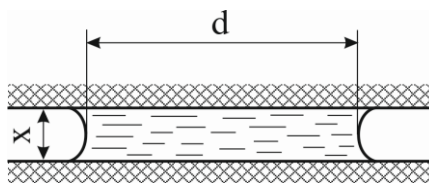


Рис. 6. Уплотнение смачиваемых частиц сухой бетонной смеси
Fig. 6. Compaction of wetted particles in dry concrete

Силы смачивания можно рассматривать как силы, приложенные к линии соприкосновения жидкости и твердого тела. Их можно рассматривать также как силу натяжения поверхности мениска, образуемого жидкостью в зазоре «х» между частицами.

Эта поверхность представляет собой растянутую куполообразную пленку, в данном случае как часть тора, стремящуюся сократиться. Закон Лапласа определяет зависимость капиллярного давления P от средней кривизны поверхности раздела граничащих фаз (например, воды и воздуха) и поверхностного натяжения σ . Капиллярное давление в зазоре с плоскими параллельными стенками, расположенными на расстоянии «х» друг от друга, рассчитывается по формуле (3). В соответствии с ней капиллярное давление растет при уменьшении зазора между частицами и достигает максимума при сближении до субмикронного расстояния между частицами и достигает многих десятков килопаскалей.

Проведенный основательный анализ уникальных возможностей технологии электростатики подтолкнул к разработке гидрофильного цемента, обеспечивающего быстрое и качественное прилипание бетонной смеси на формообразующий каркас и на последующие слои бетона. Получение гидрофильного цемента требует использования соответствующих добавок, смачивающих цементный порошок и повышающих пластичность формовочной массы. Исследовалась гидрофильная добавка лигносульфоната кальция (ЛСТ), которая вводилась в помольный агрегат в процессе тонкого измельчения портландцементного клинкера в дозировке 0,10 – 0,35% от массы клинкера (рис. 7).

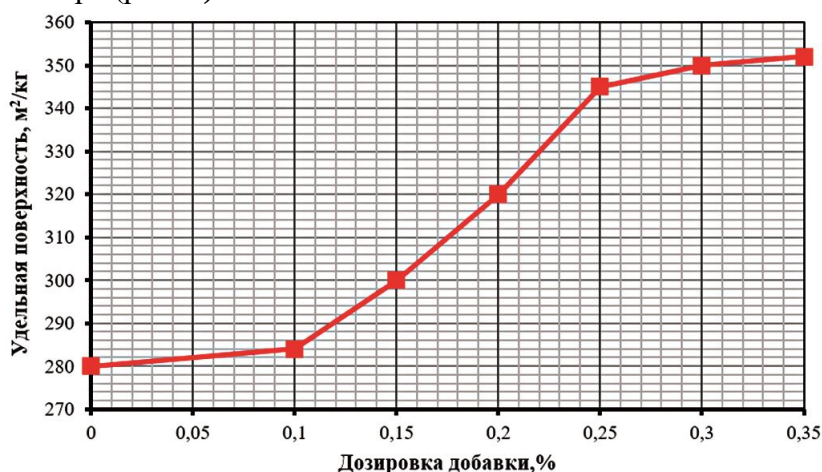


Рис. 7. График зависимости удельной поверхности гидрофильного цемента от дозировки ЛСТ
Fig. 7. Graph of the dependence of the specific surface area of hydrophilic cement on the dosage of calcium lignosulfonate

Полученный гидрофильный цемент позволит получать бетонные и растворные смеси достаточно подвижные; при этом при водоцементном отношении 0,36 был получен расплыв конуса встряхивающего столика составил 136 мм, что на 12% выше, чем на стандартном портландцементе. Рецептуры гидрофильного цемента и свойства цементного камня приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Рецептуры и свойства гидрофильного цемента
Table 1. Formulations and properties of hydrophilic cement

Дозировка ЛСТ, % Dosage LST, %	Удельная поверхность, м ² /кг Specific surface, m ² /kg	Нормальная густота цементного теста, % Normal density of cement paste, %	Сроки схватывания, час-мин. Setting time, hour- min.		Активность, МПа Activity, MPa
0,20	320	23,5	00-41	00-52	49,6
0,25	345	22,0	00-25	00-36	51,0
0,30	350	22,5	00-32	00-45	50,1

Полученные составы гидрофильного цемента, показали, что дозировка 0,25% от массы клинкера наиболее выгодная, нормальная густота цементного теста (НГЦТ) снизилась на 12%, удельная поверхность 345 м²/кг, сроки схватывания короткие, через 12 минут начинается схватывание смеси, что позволит наносить последующие слои бетонной массы на формообразующий каркас. Прочностные показатели образцов балочек на гидрофильном цементе при оптимальной дозировке ЛСТ 0,25% показали среднее значение 51 МПа, что выше проектной активности портландцемента М500, гарантированно обеспечивая высокую жесткость и прочность композиции электростатического фибробетона.

Вывод. Важное место в новой технологии занимает физика межфазных явлений, а именно смачивание и капиллярные эффекты. Электростатическое осаждение слоев сухой бетонной смеси на формообразующий каркас происходит с помощью электростатических распылителей. Вторая стадия процесса – дозированное увлажнение сухой бетонной смеси тонкораспыленной водой.

Рассмотрены процессы смачивания и кинетика заполнения жидкостью капилляров и каналов различной формы между частицами сухой бетонной смеси, а также уплотнение порошковой системы в результате увлажнения. Полученный гидрофильный цемент на основе поверхностно-активной добавки ЛСТ (0,25%) позволит реализовать эффект межфазового электростатического сцепления за счет смачивания частиц цемента добавкой, что вследствие применения водоцементного отношения, близкого к теоретической величине, улучшает свойства фибробетона.

Библиографический список:

- Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве. М.: Стройиздат. 1980. 415 с.
- Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Электростатическое формование изделий из армированного бетона // Бетон и железобетон. 1997. № 6. С. 17-19.
- Кокоев М. Федоров В.Т. Электростатический армированный бетон // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 29-31.
- Леденев В.В., Худяков А.В. Оболочечные конструкции в строительстве. Теория, проектирование, конструкции, примеры расчета. Тамбов. Изд. «ТГТУ». 2016. 272 с.
- ГОСТ 21509-76 от 1977-01-01 Лотки железобетонные оросительных систем. Технические условия.
- Иванова Е.К., Кацнельсон Р.А. Пьер Луиджи Нерви. М.: Стройиздат. 1968. 128 с.
- <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/009/001/212794202.jpg>
- Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат. 1984. 672 с.
- Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат. 1986. 464 с.
- Патент RU 2528332, МПК (2006.01) C04 B7, опубл. 10.09.2014. Интенсификаторы помола цементного клинкера.
- Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. Т. 75. N 3. 2006. С. 203-216.
- Гергель В.И., Цариченко С.Г., Поляков Д.В. Пожаротушение тонкораспыленной водой установками высокого давления оперативного применения // Пожарная безопасность. No 2. 2006. С.125-131.
- Адамсон А.В. Физическая химия поверхностей. М.: Мир. 1979. 568 с.
- Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М.: Химия, 1983.263 с.
- Moore F. G. Integration or segregation: How do molecules behave at oil/water interfaces? / F. G. Moore, G. L. Richmondruen // Accounts of Chemical Research. 2008. Vol. 41, no. 6. P. 739-748.
- Зенгуил Э. Физика поверхности. М.: Мир. 1990. 534 стр.
- Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. М.: Академия, 2006. 240 с.

18. 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.
19. Дерягин Б. В. К вопросу об определении понятия и величины расклинивающего давления и его роли в статике и кинетике тонких слоев жидкостей // «Коллоидный журнал». 1955. т. 17. В. 3.

References:

1. Venua M. Cements and Concrete in Construction. M.: *Stroyizdat*. 1980; 415 (In Russ)
2. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Electrostatic molding of reinforced concrete products. *Concrete and reinforced concrete*. 1997; 6:17-19. (In Russ)
3. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Electrostatic Reinforced Concrete. *Building Materials*. 2004; 6. (In Russ)
4. Ledenev V.V., Khudyakov A.V. Shell structures in construction. Theory, design, structures, calculation examples. Tambov. *Publishing house "TSTU"*. 2016; 272. (In Russ)
5. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. Technology of concrete and reinforced concrete products. M: *Stroyizdat*. 1984; 672. 497-498. (In Russ)
6. GOST 21509-76 from 1977-01-01 Reinforced concrete trays for irrigation systems. Technical conditions. (In Russ)
7. <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/009/001/212794202.jpg>
8. Ivanova E.K., Katsnelson R.A. Pier Luigi Nervi. M.: *Stroyizdat*. 1968;128. (In Russ)
9. Volzhensky A.V. Mineral binders. M.: *Stroyizdat*. 1986; 464. (In Russ)
10. Patent RU 2528332, IPC (2006.01) C04 B7, publ. 09/10/2014. Cement clinker grinding intensifiers. (In Russ)
11. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Advances in chemistry*. 2006; 75(3): 203-216. (In Russ)
12. Gergel V.I., Tsarichenko S.G., Polyakov D.V. Fire extinguishing with water mist with high pressure installations of operational use. *Fire safety*. 2006; 125-131. (In Russ)
13. Adamson A.V. Physical chemistry of surfaces. M.: *Mir*. 1979;568. (In Russ)
14. Axelrud G.A., Altshuler M.A. Introduction to capillary-chemical technology. Moscow: *Chemistry*. 1983; 263(In Russ)
15. Moore F.G. Integration or segregation: How do molecules behave at oil/water interfaces?/F.G. Moore, G.L. Richmondruen. *Accounts of Chemical Research*. 2008; 41(6):739-748.
16. Zenguil E. Surface Physics. M.: *Mir*. 1990;534. (In Russ)
17. Summ B.D. Fundamentals of Colloidal Chemistry. Moscow: *Academy*, 2006;240. (In Russ)
18. 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)
19. Deryagin B.V. To the question of the definition of the concept and value of wedging pressure and its role in the statics and kinetics of thin layers of liquids. *Colloid Journal*. 1955; 17:3. (In Russ)

Сведения об авторе:

Нахаев Магомед Рамзанович, кандидат технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна, Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова, проректор по научной работе и инновациям Чеченского государственного университета имени А.А. Кадырова; mr-nakhaev@mail.ru

Information about author:

Magomed R. Nakhaev,, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov, Vice-Rector for Research and Innovation, Kadyrov Chechen State University; 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 25.12.2021.

Одобрена после рецензирования / Reviced 19.01.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 19.01.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.544

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-149-155

Оригинальная статья / Original Paper

Исследование свойств цемента для тампонирувания нефтяных скважин

М.Ш. Саламанова

Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,
364051, Россия, г. Грозный, пр. Исаева, 100, Россия,
Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,
364051, Россия, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21, Россия

Резюме. Цель. Цементирование нефтяных и газовых скважин на достаточно большой глубине и при высоких температурах достаточно сложный и энергоемкий процесс, требующий использования специального цемента. Обзорный материал по тампонажным цементам подтверждает ответственность выбора этого вяжущего, способного гарантировать безопасный процесс бурения, тампонирувания и эксплуатации нефтяных скважин. Приводится классификация тампонажного цемента, ведь известно, что при цементации свободного пространства в скважине, специалисты сталкиваются с различными сложностями, связанными с температурными перепадами, разностью плотностей в земной коре. **Метод.** Исследования проводились согласно нормативным документам ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема; ГОСТ 1581-2019 Портланд-цементы тампонажные. Технические условия; ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. **Результат.** Исследованы свойства тампонажного цемента ПЦТ-I-100, для замедления схватывания растворной смеси на 10 – 14 часов, в вяжущую систему вводили с водой затворения добавки замедлители «Сульфасел» и «НТФ». Результаты исследований показали, что использование добавок замедлителей затормозило твердение системы в первые 10 часов, но после схватывания, цементный камень ускоренно добрал недостающую прочность. Водопотребность тампонажного цемента достаточно высокая 33–35%, что является обязательным для получения подвижной растворной смеси с учетом закачки ее насосами в пространство нефтяной скважины **Вывод.** Назначение тампонажного цемента подтверждает всю ответственность и важность подбора вяжущей связки тампонирувания скважин и определяется различными факторами, и в частности, гидрогеологическим условиями, температурой, уровнем грунтовых вод в пластах земной коры.

Ключевые слова: тампонажный цемент, замедлители, сроки схватывания, активность, цементный камень, нефтяные скважины, тонкость помола

Для цитирования: М.Ш. Саламанова. Исследование свойств цемента для тампонирувания нефтяных скважин. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 149-155. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-149-155

Study of cement properties for plugging oil wells

M.Sh. Salamanova

M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University
100 Kh. Isaev Ave., Grozny, 364051, Russia,
Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,
21 Staropromyslovskoe highway, Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. Cementing oil and gas wells at a sufficiently large depth and at high temperatures is a rather complex and energy-intensive process that requires the use of special cement. The review material on oil well cements confirms the responsibility of choosing this binder, which can guarantee the safe process of drilling, plugging and operating oil wells. The classification of well cement is given, because it is known that when cementing free space in a well, specialists face various difficulties associated with temperature changes, density differences in the earth's crust. **Method.** The studies were carried out in accordance with the normative documents GOST 310.3-76 Cements. Methods for determining normal density, setting time and uniformity of volume change; GOST 1581-2019 Oil-well portland cements. Specifications; GOST 310.4-81 Cements. Methods for determining the ultimate strength in bending and compression. **Result.** The properties of grouting cement PCT-I-100 were studied, to slow down the setting of the mortar mixture for 10-14 hours, additives "Sulfatsel" and "NTF" retarders were introduced into the binder system with mixing water. The research results showed that the use of retardant additives slowed down the hardening of the system in the first 10 hours, but after setting, the cement stone quickly gained the missing strength. The water demand of oil well cement is quite high 33–35%, which is mandatory for obtaining a mobile mortar mixture, taking into account its injection by pumps into the space of an oil well **Conclusion.** The purpose of grouting cement confirms the responsibility and importance of selecting a binder for plugging wells and is determined by various factors, in particular, hydrogeological conditions, temperature, groundwater level in the layers of the earth's crust.

Key words: oil well cement, retarders, setting time, activity, cement stone, oil wells, fineness of grinding

For citation: M.Sh. Salamanova. Study of cement properties for plugging oil wells. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):149-155. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-149-155

Введение. Развитие нефтедобывающей отрасли требует цементирования нефтяных скважин на достаточно большой глубине и при высоких температурах. Процесс тампонирувания возможно осуществлять только при использовании специального цемента. В функции этого вяжущего входит исключение опасного воздействия агрессивных газов и сред в процессе бурения, снижение давления на трубы и гарантирование безопасной эксплуатации нефтяных скважин [1–5].

И следует отметить, несмотря на незначительную область применения, это вяжущее – тампонажный цемент (ПТЦ), имеет несколько подвидов: песчанистый, солестойкий, низкогигроскопичный, утяжеленный, облегченный.

Песчанистый цемент получают в результате совместного тонкого измельчения портландцементного клинкера (50–75%) нормированного состава и чистых кварцевых песков (25–50%), с добавлением небольшого количества гипса в количестве 1,5–3%.

Солестойкий цемент – продукт двухстадийного тонкого измельчения портландцементного клинкера с кварцевыми песками.

Минералогический состав клинкера представлен алитом не менее 50%, трехкальциевым алюминатом не более 5%. Тонкодисперсные кварцевые порошки с высокой удельной поверхностью более 600–900 м²/кг с преобладанием минерала кварца SiO₂ не менее 90%. Особенность этого вида тампонажного цемента противостояние солевой агрессии, как возможного реагента грунтовых вод.

Низкогигроскопический цемент отличается своим составом от предыдущих вяжущих. Помимо портландцементного клинкера и гипса, здесь используют триэтаноламин. Это добавка катионактивного действия, создающая эффект воздухововлечения и замедления схватывания, благодаря ей образуется более пористая структура цементного камня при твердении.

Утяжеленный цемент применяют при цементировании в условиях аномально высоких пластовых давлений. Для создания более тяжелой растворной смеси в цемент вводят немолотые утяжеляющие добавки кварцевого песка или железнорудных материалов.

Облегченный цемент необходимо использовать в случае наблюдения сложных геологических условий с наличием пластов, склонных к гидроразрывам. В таком случае в цемент вводят более легкие добавки, такие как зола ТЭЦ, опока, трепел, диатомиты и др. Ну, а если предстоит ремонт участков оболочки на достаточно высокой глубине, нужно еще снизить плотность цементной смеси, то применяют добавки каолинита, микросфер алюмосиликатной природы. Так как такую массу легче закачивать, она будет проявлять адгезионные свойства к старому основанию оболочки и заполнять все дефекты. Тем более в таких ремонтных тампонажных смесях зафиксирован расширяющийся эффект [6–10, 12].

Существует и более упрощенная классификация, так как при тампонировании скважин специалисты сталкиваются с проблемой температурных перепадов, и, следовательно, тампонажный цемент делят на три категории:

- не глубокие холодные скважины с температурой $\leq 40^{\circ}\text{C}$;
- горячие скважины с температурой $50 - 100^{\circ}\text{C}$;
- сверхглубокие скважины с температурой $> 100^{\circ}\text{C}$.

Постановка задачи. Небольшой обзорный материал [3–8, 11, 13, 14], поможет представить всю ответственность выбора тампонажного цемента, ведь от этого будет зависеть качество бурения и эффективность эксплуатации нефтяных скважин. По заказу ООО «Нефть-Сервис», осуществляющей разработку нефтяного месторождения в республике Северная Осетия-Алания, были исследованы две пробы тампонажного цемента.

Была поставлена цель – исследовать свойства тампонажного цемента ПЦТ – I – 100, и в частности, сроки схватывания цементного теста и по возможности замедлить их на 10 – 14 часов для беспрепятственного протекания процессов бурения и тампонирования. В качестве замедлителей схватывания использовались добавки с рекомендуемыми дозировками «Сульфатцел» 0,8 – 1,2 % и «НТФ» 0,02 – 0,15 %.

Методы исследования. Исследования проводились согласно нормативным документам ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема; ГОСТ 1581-2019 Портландцементы тампонажные. Технические условия.

Пробы предварительно высушенных в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 2 часов тампонажного цемента просеивались через сито с сеткой №09. Эта процедура была необходимой, так как цемент был несвежим и прощупывалось достаточно большое количество комков, которые отрицательно сказались бы на результатах эксперимента. Тонкость помола подготовленных проб, просеянных сквозь сито с сеткой №008, составила 12,4 – 12,6 %. Для определения сроков схватывания цементного теста, предварительно необходимо определить количество воды затворения для получения теста нормальной консистенции (НГЦТ).

На рис. 1 представлена последовательность проведения исследований. Следует заметить, что в процессе приготовления цементного теста наблюдалось водоотделение, в пробе №1 это явление проявилось чуть выше, чем в пробе №2.

Для определения НГЦТ использовали прибор Вика, но иглу заменяли пестиком. Опытным путем удалось найти номинальное значение этого показателя, определялось оно по стрелке левой шкалы прибора, когда пестик не доходил до пластины до деления 5–6 мм.

В табл. 1 представлены результаты испытаний тампонажного цемента ПЦТ – I – 100. Нормальная консистенция проб тампонажного цементного теста изменялась в пределах 33,2 – 35,0%, следует отметить, что показатель водопотребности на 8–10% выше, чем у портландцемента АО «Чеченцемент».



Просеивание ПТЦ и приготовление цементного теста
Screening of PTC and preparation of cement paste



Определение нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания

Determination of the normal density of cement paste and setting time

Рис.1. Последовательность определения свойств цементного теста

Fig.1. Sequence of definition cement paste properties

Объяснению сопоставимой разницы служит более высокая удельная поверхность тампонажного цемента, что составляет $S_{уд} = 433 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Таблица 1. Нормальная густота цементного теста
Table 1. Normal density of cement paste

№ пробы Sample number	Навеска цемента, гр. Hinge of cement, gr	Количество воды, гр. Quantity water, gr.	НГЦТ, % NGCT, %
1	400	139,2	34,8
	400	140,0	35,0
	400	139,1	34,7
2	400	133,1	33,3
	400	133,0	33,2
	400	132,9	33,2

Далее необходимо проследить, как добавки-замедлители «Сульфасел» и «НТФ» будут изменять показатель водопотребности смеси. Проводились испытания по определению оптимальной дозировки замедлителей, ведь была поставлена цель – замедлить начало схватывания на 10 – 14 часов.

В ходе эксперимента установлены следующие дозировки замедлителей:

- «Сульфасел» 1 % от массы цемента;
- «НТФ» 0,5 % от массы цемента.

Обсуждение результатов. Следует отметить следующие технологические особенности, обнаруженные в процессе исследований: добавка «Сульфасел» привела к увеличению нормальной консистенции цементного теста до 36,2%, при растворении в воде проявился эффект коагулирования, образовался густой гель, который и привел к повышению водопотребности.

Добавка «НТФ» моментально растворилась в воде затворения, сложностей как в первом случае не наблюдалось, да к тому же повышение водопотребности практически не зафиксировано, среднее арифметическое значение НГЦТ составило 33,4%.

Для выполнения поставленных задач, необходимо найти начало и конец схватывания тампонажного цементного теста, исследовались две пробы цемента ПЦТ-I-100 без добавочные и с замедлителями. Для проведения эксперимента пестик заменяем иглой прибора Вика, но пестик закрепляем на цилиндрическом, металлическом стержне.

Эксперимент проводим согласно ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема; ГОСТ 1581-2019 Портландцементы тампонажные. Технические условия. Результаты исследования в таблице 2.

Таблица 2. Сроки схватывания цементного теста

Table 2. Setting time of cement paste

№ опыта Experience number	Навеска цемента, гр. Weight of cement, gr.	Добавка замедлитель, гр. Additive retarder, gr.	Количество воды, гр. Quantity water, gr.	Начало схватывания, час-минута Start setting, hour-minute	Конец схватывания, час-минута End setting, hour-minute
1	400	-	139,2	4-30	5-20
	400	-	140,0	4-29	5-18
	400	-	139,1	4-30	5-21
2	400	-	133,1	4-32	5-22
	400	-	133,0	4-33	5-21
	400	-	132,9	4-32	5-22
Сульфасел 1% от массы цемента/ Sulfacel 1% by weight of cement					
3	400	4	145,0	13-10	14-42
	400	4	145,2	13-12	14-40
	400	4	145,1	13-13	14-41
НТФ 0,5% от массы цемента/ NTF 0.5% by weight of cement					
4	400	2	133,6	12-01	13-10
	400	2	133,5	12-00	13-12
	400	2	133,5	12-02	13-14

Анализ проведенных результатов показал, что используемые добавки замедлители позволили на 8–9 часов замедлить начало схватывания, что способствовало созданию качественной цементной оболочки вокруг обсадной колонны, защищающей от сдвижек пластов, от контакта с грунтовыми водами, газов и агрессивных сред. Еще один важный показатель качества тампонажного цемента, прочность на сжатие в начальные сроки твердения, так как полученная оболочка должна быть достаточно плотной, прочной и иметь высокую адгезию, как с колонной, так и со стенками ствола в пробуренном пласте горной породы (рис. 2). Исследования проводили согласно ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и

сжатии. Испытание образцов балочек размером 40х40х160 мм проводили с помощью гидравлического прессы ИП-500.

Полученные результаты исследований дают возможность проследить динамику набора прочности, использование добавок замедлителей затормозило твердение системы в первые 10 часов, но после схватывания, этот процесс интенсифицировался, цементный камень ускоренно добрал недостающую прочность. Сопоставимо с без добавочными композициями, активность составов 3 и 4 через 20 – 25 часов возросла на 20-30%.

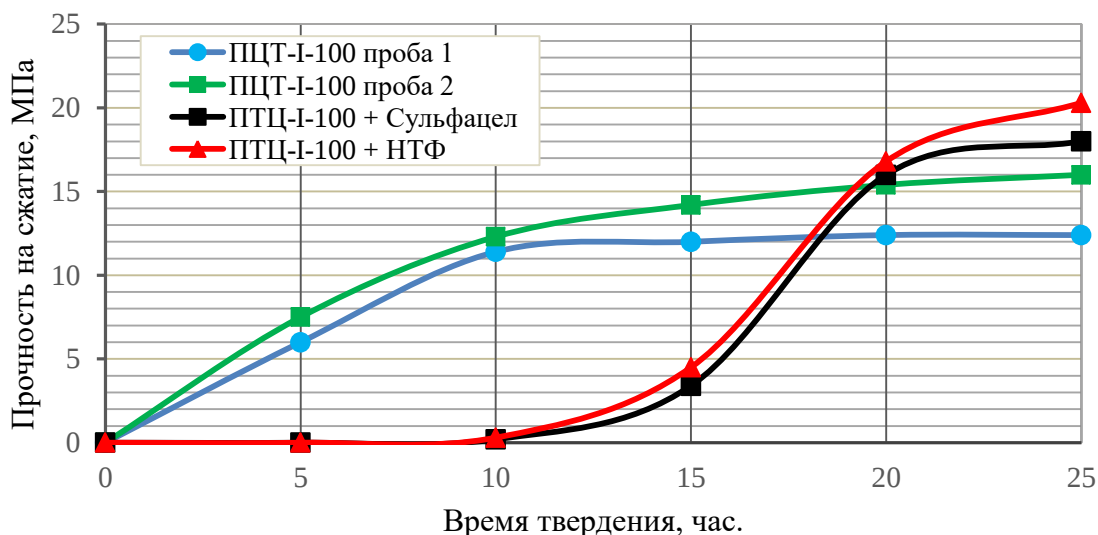


Рис.2. Кинетика набора прочности в первые часы твердения

Fig.2. Kinetics of curing in the first hours of curing

Исследуемый тампонажный цемент ПЦТ-I-100 предназначен для работы в условиях умеренных температур 50 – 100°C, и добавки замедлителя НТФ в дозировке 0,5% с запасом позволят качественно провести процесс бурения и тампонирувания. Водопоглощаемость тампонажного цемента достаточно высокая 33–35%, что является обязательным для получения подвижной растворной смеси, с учетом закачки ее насосами в пространство нефтяной скважины.

Вывод. Таким образом, назначение тампонажного цемента подчеркивает всю ответственность и важность подбора вяжущей связки, добавки замедлителей. Это необходимо для того, чтобы специалисты успели своевременно заделать и зафиксировать раствором свободное пространство между стенками ствола пласта земной коры и обсадной колонны, а после схватывания оболочка должна обеспечивать надежную защиту от грунтовых вод или гидроразрывов слоев из-за разной плотности. К тому же цементная оболочка будет служить защитой для обсадной стальной трубы от коррозионных и агрессивных воздействий.

Библиографический список:

1. Белоусов Г.А. Цементирование эксплуатационных колонн в условиях АНПД // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. М.: ОАО «ВНИИОНГ», 2005. № 11. С. 32-33.
2. Булатов А.И. Технология цементирования нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 2002. 225 с.
3. Лукманов Р.Р. Метод прогноза и изменения свойств тампонажных растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. М.: ОАО «ВНИИОНГ», 2005. № 8. С. 38-42.
4. Николаев Н.И., Иванов А.И. Повышение эффективности бурения нефтяных и газовых скважин в осложненных условиях // Записки Горного института. 2009. № 183. С. 67-71.
5. Николаев Н.И., Хаоя Лю Результаты исследования зоны контакта «цементный камень – горная порода» // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 428-434.
6. Овчинников П.В. Специальные тампонажные композиции для цементировании газовых скважин // Известия вузов. Нефть и газ. 2002. № 6. С. 14-18.
7. Blinov P.A., Dvornicov M.V. Rheological and filtration parameters of the polymer salt drilling fluids based on xanthan gum // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. № 13. P. 5661-5664.
8. Wagh A.S., Natarajan R., McDaniel R.L. et al. Ceramicrete blends produce strong, low-permeability cements for arctic use // Oil and Gas Journal. 2005. Vol. 104. № 19. P. 48-52.
9. Brandl A., Cutler J., Seholm A., Sansil M., Braun G. Cementing solutions for corrosive well environments // SPE Drilling & Completion. 2011. Vol. 26. № 02. P. 208-219.

10. Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study // *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*. 2015. Vol. 49. № 2. P. 281-288.
11. Becker T., Morgan R., Chin W., Griffith J. Improved rheology model and hydraulics analysis for tomorrow's wellbore fluid applications // *SPE Production and Operations Symposium*, 23-26 March, Oklahoma City, Oklahoma, Society of Petroleum Engineers, 2003.
12. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // *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.
13. 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 // *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.
14. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing // *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.

References:

1. Belousov G.A. Cementing of production strings under ANPD conditions. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. M.: OAO VNIIONG, 2005; 11: 32-33 (In Russ).
2. Bulatov A.I. Technology of cementing oil and gas wells. M.: Nedra, 2002. 225 (In Russ).
3. Lukmanov R.R. Method for forecasting and changing the properties of cement slurries. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. M.: OAO VNIIONG, 2005; 8: 38-42 (In Russ).
4. Nikolaev N.I., Ivanov A.I. Improving the efficiency of drilling oil and gas wells in difficult conditions. *Zapiski Gornogo instituta*. 2009; 183: 67-71 (In Russ).
5. Nikolaev N.I., Haoya Liu Results of the study of the contact zone "cement stone - rock". *Notes of the Mining Institute*. 2017; 226: 428-434 (In Russ).
6. Ovchinnikov P.V. Special grouting compositions for cementing gas wells. *Izvestiya vuzov. Oil and gas*. 2002; 6: 14-18 (In Russ).
7. Blinov P.A., Dvoynicov M.V. Rheological and filtration parameters of the polymer salt drilling fluids based on xanthan gum. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13: 5661-5664.
8. Wagh A.S., Natarajan R., McDaniel R.L. et al. Ceramicrete blends produce strong, low-permeability cements for arctic use. *Oil and Gas Journal*. 2005; 104 (19): 48-52.
9. Brandl A., Cutler J., Seholm A., Sansil M., Braun G. Cementing solutions for corrosive well environments. *SPE Drilling & Completion*. 2011; 26 (02): 208-219.
10. Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*. 2015; 49(2): 281-288.
11. Becker T., Morgan R., Chin W., Griffith J. Improved rheology model and hydraulics analysis for tomorrow's wellbore fluid applications. *SPE Production and Operations Symposium*, 23-26 March, Oklahoma City, Oklahoma, Society of Petroleum Engineers, 2003.
12. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // *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.
13. 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 // *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.
14. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Alashanov A., Ismailova Z. Features of Production of Fine Concretes Based on Clinkerless Binders of Alkaline Mixing. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 23–27 September 2019, Belgorod: 2019; 385-388 (In Russ).

Сведения об авторе:

Саламанова Мадина Шахидовна, кандидат технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна, кафедра технологии строительного производства; madina_salamanova@mail.ru ORCID 0000-0002-1293-7090

Information about author:

Madina Sh. Salamanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design, Department of Construction Production Technology; madina_salamanova@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 05.02.2022.

Поступила после рецензирования /Revised 02.03.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 02.03.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172

Оригинальная статья/Original Paper

Исследование эффективности 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. Целью исследования является оценка эффективности шпренгельных балок с двумя стойками. **Метод.** Выполняются множество числовых примеров и проводятся варианты проектирования шпренгельных балок с различными конструктивными характеристиками. Составляются соответствующие таблицы. **Результат.** Проведён анализ влияния различных конструктивных параметров на собственный вес и стоимость металла шпренгельной балки с двумя стойками. Составлены различные таблицы, которые показывают эффективность шпренгельной балки с оптимальными характеристиками. Построенные таблицы позволяют делать вывод об эффективности оптимальных параметров шпренгельных балок с двумя стойками. **Вывод.** Предлагаемые методика и алгоритм свидетельствуют об эффективности рассматриваемой конструкции. Экономия стали, а также уменьшение стоимости металла шпренгельных балок с двумя стойками по сравнению с обычными балками достигает до 40-50%.

Ключевые слова: шпренгельная балка, упруго-податливая опора, таблицы, стоимость, собственный вес, оптимальные параметры, алгоритм

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Исследование эффективности шпренгельных балок с двумя стойками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (1):156-172. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172

Study of the effectiveness of trussed 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. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of trussed beams with two posts. **Method.** Many numerical examples are carried out and variant design of trussed beams with various structural characteristics is carried out. Appropriate tables are compiled. **Result.** The analysis of the influence of various design parameters on the own weight and the cost of the metal of a trussed beam with two posts was carried out. Various tables have been compiled that show the effectiveness of a trussed beam with optimal characteristics. The constructed tables allow us to draw a conclusion about the effectiveness of the optimal parameters of trussed beams with two posts. **Conclusion.** The proposed technique and algorithm testify to the effectiveness of the considered design. Saving steel, as well as reducing the cost of metal of trussed beams with two posts compared to conventional beams, reaches 40-50%.

Keywords: trussed beam, elastically compliant support, tables, cost, own weight, optimal parameters, algorithm

For citation: A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Study of the effectiveness of trussed beams with two posts. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1): 156-172. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-156-172.

Введение. Данная статья является продолжением результатов проведенных исследований, решающих проблемы оптимизации параметров шпренгельных балок с одной стойкой [1, 2] и оптимизацию параметров шпренгельной балки с двумя стойками [3]. На основе теоретических исследований были получены условия, которые позволяют вычислять конструктивные параметры шпренгельных балок с двумя стойками. Результаты исследования были представлены в виде простых лаконичных формул, удобных для пользования. В настоящей статье мы продолжаем исследования, связанные с оптимизацией конструктивных параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Чтобы не повторяться, далее мы будем делать ссылки на рисунки и формулы, полученные в статье [3].

Постановка задачи. Пусть шпренгельная балка [3, рис.1] имеет пролёт $l = 15\text{м}$. Погонная нагрузка – равномерно распределённая: $q = 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

Рассмотрим три варианта расчётной схемы.

Первый вариант:

расчётная схема – упрощённая [3, рис. 2б]; коэффициент жёсткости $r \rightarrow \infty$, $k = 0$.

Второй вариант:

расчётная схема – уточнённая [3, рис 2а)]; коэффициент жёсткости r определяется по формуле (54) [3] при $k = 0,7 \cdot 10^{-3}$ ($z = 0,362$).

Третий вариант:

расчётная схема – обычная балка без шпренгеля [3, рис. 2в)]; коэффициент жёсткости $r = 0$, $k \rightarrow \infty$.

Для всех трёх вариантов балки, о которых говорилось выше, вычислим изгибающий момент M и поперечную силу Q в расчётном сечении перекладины; определим усилие N в стойке; найдём усилия в затяжке N_k и N_r (обозначения указаны на [3, рис. 5], а так же вычислим осевое усилие сжатия F перекладины [3, рис. 6],

Методы исследования:

Первый вариант, расчётная схема – [3, рис. 2б):

коэффициент

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30} = \frac{1}{2,72};$$

По формуле (39) [3]: $z = \frac{11}{30};$

По формуле (47) [3]: $M = \frac{ql^2}{90};$

Поперечная сила: $Q = -qlz + \frac{ql}{6};$

При $z = \frac{11}{30}$ изгибающий момент:

$$M = -\frac{ql^2}{90} = -\frac{60 \text{кН/м} \cdot (15\text{м})^2}{90} = 150 \text{кНм};$$

Поперечная сила:

$$Q = -ql - \frac{1}{5} = -60 \text{кН/м} \cdot 15\text{м} \cdot \frac{1}{5} = -180 \text{кН};$$

По формулам (19-21) [3] и формуле (14) [3], в частном случае по формуле (31) [3], найдём усилие в стойке:

$$N_1 = N_2 = N = \frac{ql}{2,72 + 80k} = \frac{60 \text{кН/м} \cdot 15\text{м}}{2,72} = 367 \text{кН};$$

$N = 367 \text{кН};$

$$N_k = \frac{N_1}{\sin \alpha} \cdot \sin \alpha = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}};$$

Примем $h \approx 0,1 \cdot l = 0,1 \cdot 15\text{м} = 1,5\text{м};$

Тогда: $\sin \alpha = \frac{1,5}{\sqrt{\left(\frac{15M}{3}\right)^2 + (15M)^2}} = 0,285; \quad N_k = \frac{367кН}{0,258} = 1422кН;$

По формуле (20) [3]:

$$N_{\Gamma} = N \cdot \frac{l/3}{h} = N \cdot \frac{l/3}{l/10} = 3,33 \cdot N = 3,33 \cdot 367кН = 1222кН$$

По формуле (21) [3]:

$$F = -N_k \cdot \cos \alpha = -1422кН \cdot 0,952 = -1369,7кН$$

Выпишем все полученные значения усилий :

при $\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 150 кН \cdot м; \\ Q = 180 кН; \\ F = -1369,7 кН; \\ N = 367кН; \\ N_k = 1422кН; \\ N_{\Gamma} = 1222кН. \end{array} \right. \quad (57)$$

расчетная схема – [3, рис. (2.а)];

Второй вариант – оптимизированный:

Коэффициенты

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

По формуле (48) [3]:

$$M = \frac{ql^2}{9} (3z - 1) = \frac{60кН/м \cdot 15м}{9} \cdot (3 \cdot 0,367 - 1) = \frac{60 \cdot 225кНм}{104,64} = -129кНм;$$

$$M = -129 кНм;$$

При $z = 0,369$

$$Q = -qlz + \frac{ql}{6} = ql \cdot \left(\frac{1}{6} - z\right) = 60 кН/м \cdot 15м \cdot (0,166 - 0,362) = -966кН \cdot 0,196 = 176,4кН;$$

$$Q = 176,4кН.$$

По формуле (31) [3]:

$$N = \frac{ql}{2,72 + 80\kappa} = \frac{60кН/м \cdot 15м}{2,72 + 80 \cdot 0,524 \cdot 10^{-3}} = \frac{900кН}{2,72 + 4,192 \cdot 10^{-2}} = \frac{900кН}{2,76192} = 322,2кН;$$

$$N = 322,2 кН.$$

$$N_k = \frac{N}{\sin \alpha} = \frac{322,2кН}{0,258} = 1130 кН;$$

$$N_k = 322,2кН.$$

По формуле (20) [3], при $h = \frac{l}{10} :$

$$N_{\Gamma} = N \cdot \frac{l/3}{h} = 322,2кН \cdot 3,33 = 1072,9кН$$

По формуле (21) [3]:

$$F = -N_k \cdot \cos \alpha = -1130кН \cdot 0,952 = -1074,76кН.$$

Выпишем все полученные значения усилий:

при $\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = -129 кНм; \\ F = -1074,76 кН; \\ N = 322,2 кН; \\ N_k = 1130кН; \\ N_{\Gamma} = 1072,9кН; \end{array} \right. \quad (58)$$

Третий вариант, расчетная схема – [3, рис. 2.в]:

$\kappa \rightarrow \infty$: по формуле (39) [3]: $z = 0$.

Это случай – обычной балки (без шпренгеля). Есть только перекладина (расчетная схема – рис. 2.в) [3].

Изгибающий момент в середине пролета:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{60 \text{ кН/м} \cdot (15 \text{ м})^2}{8} = \frac{60 \cdot 225 \text{ кНм}}{8} = 1687,5 \text{ кНм};$$

Поперечная сила на опоре :

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{60 \text{ кН/м} \cdot 15 \text{ м}}{2} = 450 \text{ кН};$$

Усилия N, N_k, N_Γ, F равны нулю.

Выпишем все полученные значения усилий :

При $\kappa \rightarrow \infty$; $z = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 1687,5 \text{ кНм}; \\ Q = 450 \text{ кН}; \\ F = 0; \\ N = 0; \\ N_k = 0; \\ N_\Gamma = 0; \end{array} \right. \quad (59)$$

Подбор сечения элементов

Введем в рассмотрение 3 марки стали. Характеристики этих сталей приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики марок сталей

Table 1. Characteristics of steel grades

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности , Regular strength steel R1=220 МПа.
2	ВСт3 псн обр.	40990	Сталь обычной прочности, Regular strength steel R2=270 МПа.
3	15Х СНД	59990	Сталь повышенной прочности, High strength steel R1=330 МПа.

Стоимость стали в табл. 1 соответствует ценам, установленным на московской бирже на первое января 2020 года. Сечение перекладины примем из прокатного широкополочного двутавра

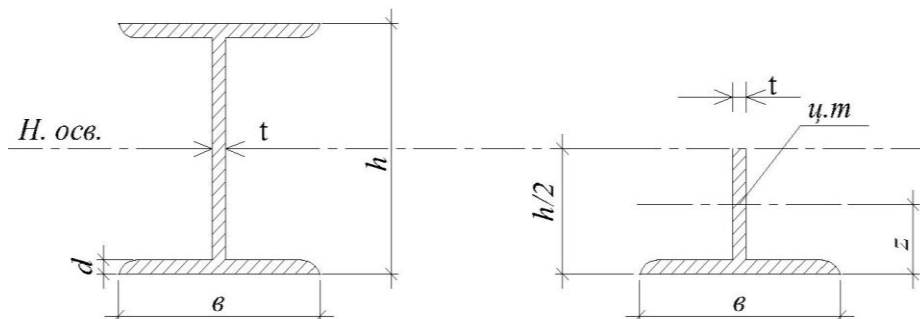


Рис. 1. Сечение прокатного широкополочного двутавра

Fig. 1. Cross section of a rolling wide-shelf I-beam

Приведем расчетные формулы, с помощью которых можно подобрать сечение шпренгельной балки.

В сечении перекладины:

$$\text{напряжения изгиба :} \quad \sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W_X}; \quad (60)$$

$$\text{напряжения осевого обжатия:} \quad \sigma_0 = \frac{F}{A}; \quad (61)$$

$$\text{касательные напряжения:} \quad \tau = \frac{Q \cdot S}{t \cdot J_X}; \quad (62)$$

Здесь статический момент половины сечения двутавра (рис. 1) относительно нейтральной оси $x-x$ определяется по формуле

$$S = 0,5A \cdot (0,5h - z_0), \quad (63)$$

где A - площадь сечения;

z_0 - координата центра тяжести половины сечения, рис. 1.

В расчетном сечении $x = \frac{l}{3}$ (рис. 2 [3]), возникают три вида напряжений – формулы (60 – 62), эпюры этих напряжений приведены на рис. (2) :

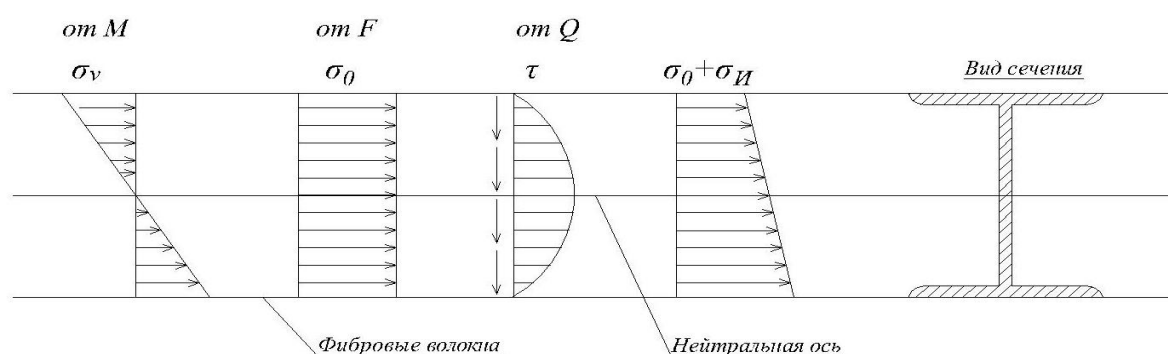


Рис. 2. Эпюры напряжений

Fig. 2. Stress diagrams

Прочность сечения проверяем по IV – ой теории прочности [14] :

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_{\text{и}})^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (63a)$$

В соответствии с эпюрами (рис. 2), условие прочности запишем так :

$$\text{На фибровых волокнах:} \quad \sigma_0 + \sigma_{\text{и}} \leq \gamma \cdot R, \quad (64)$$

$$\text{На нейтральной оси :} \quad \sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} \leq \gamma \cdot R. \quad (65)$$

В случае обычной балки, когда нет шпренгельных элементов (рис.2.б) [3], Усилие сжатия равно нулю. Соответственно равно нулю и напряжение σ_0 . Для этого случая условие прочности сечения балки запишем в виде :

$$\sigma = \frac{M}{W_c} \leq \gamma \cdot R.$$

Отсюда

$$W_{\text{ТР}} \geq \frac{M}{c\gamma R}; \quad (66)$$

Где $W_{\text{ТР}}$ – требуемый момент сопротивления изгибу;

c – коэффициент, учитывающий влияние пластических деформаций. Для двутаврового сечения $c=1,1$.

Далее перейдем к другим элементам шпренгельной балки. Стойка работает на сжатие, однако рассчитывать её на устойчивость продольного изгиба не стоит, поскольку этот элемент имеет небольшую длину, равную

$$h = 0,1 \cdot l = 0,1 \cdot 15\text{м} = 1,5\text{м}.$$

Достаточно подобрать его сечение по прочности $\sigma = \frac{N}{A_{\text{ст}}} \leq \gamma \cdot R$,

где $A_{\text{ст}}$ – площадь сечения стойки.

Отсюда $A_{\text{ст}} \geq \frac{N}{\gamma R_{\text{ст}}}$, (67)

где N – усилие сжатия стойки, γ и $R_{\text{ст}}$ – соответственно коэффициент условия работы и расчетное сопротивление стойки.

Обычно $A_{\text{ст}}$ назначают конструктивно из условия удобства устройства узлов конструкции. Затяжка работает на растяжение.

Условия прочности :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{N_{\text{к}}}{A_{\text{к, нетто}}} \leq R \cdot \gamma ; \\ \sigma_2 &= \frac{N_{\text{к}}}{A_{\text{к, нетто}}} \leq \frac{R^{\text{вр}}}{1,3} \cdot \gamma . \end{aligned} \quad (68)$$

Здесь: R и $R^{\text{вр}}$ – расчетные сопротивления стали затяжки по $\sigma_{\text{т}}$ и $\sigma_{\text{вр}}$;

γ – коэффициент условия работы;

$A_{\text{к, нетто}}$ – площадь сечения косой затяжки в её слабом сечении;

$N_{\text{к}}$ – усилие, уже приведенное нами и данное формулами (57, 58 и 59).

Условия прочности горизонтальной затяжки записываются также, как неравенства (68), только с заменой усилия $N_{\text{к}}$ усилием $N_{\text{г}}$. Теперь мы располагаем всеми расчетными формулами.

Далее перейдем к непосредственным вычислениям. Начнём с расчетных усилий первого варианта, равенства (57). В качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 45 Б1: характеристики сечения : $h = 44,54 \text{ см}$, $A = 74,6 \text{ см}^2$, $g = 58,5 \text{ кг/м}$, $J_x = 24690 \text{ см}^4$, $W_x = 1110 \text{ см}^3$, $Z_0 = 5,39$, $t = 0,76 \text{ см}$.

По формуле (60) $\sigma_{\text{и}} = \frac{150 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1110 \text{ см}^3} \approx 13,5 \text{ кН/см}^2$;

Статический момент по равенству (63) :

$$S = 0,5 \cdot 74,6 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 44,54 \text{ см} - 5,39 \text{ см}) = 629,624 \text{ см}^3 .$$

По формуле (68):

$$\tau = \frac{180 \text{ кН} \cdot 629,624 \text{ см}^3}{0,76 \text{ см} \cdot 24690 \text{ см}^4} = 6,1 \text{ кН/см}^2 .$$

Осевое напряжение сжатия по формуле (61):

$$\sigma_0 = \frac{1369,7 \text{ кН}}{74,6 \text{ см}^2} = 18,3 \text{ кН/см}^2 .$$

Проверка прочности :

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 18,3 \text{ кН/см}^2 + 13,5 \text{ кН/см}^2 = 31,8 \text{ кН/см}^2 = 318 \text{ МПа} < 330 = R_3 .$$

Здесь R_3 дано в табл. 1.

Недонапряжение составляет $3,3\% < 5\%$. На нейтральной оси (65) :

$$\sqrt{(18,3 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (6,1 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 21 \text{ кН/см}^2 = 210 \text{ МПа} < 330 \text{ МПа} = R_3 .$$

Прочность обеспечена.

По расчету для первого варианта (формула 57) в качестве сечения перекладины проходит широкополочный двутавр №45 Б1 $R = R_3 = 330 \text{ МПа}$.

Далее назначим широкополочный двутавр №50 Б1 :

характеристики сечения: $h = 49,51\text{см}$, $A = 91,8\text{ см}^2$, $g = 72,1\text{ кг/м}$, $J_X = 37670\text{ см}^4$,
 $W_X = 1520\text{ см}^3$, $Z_0 = 5,99$, $t = 0,844\text{ см}$.

Далее мы не будем давать пояснения. По вышеприведенному алгоритму будем проводить только вычисления.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{150\text{ кН} \cdot \text{м}}{1520\text{ см}^3} \approx 10\text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 91,8\text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 49,51\text{ см} - 5,99\text{ см}) = 862,92\text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{180\text{ кН} \cdot 862,92\text{ см}^3}{0,844\text{ см} \cdot 37670\text{ см}^4} = 4,8\text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1369,7\text{ кН}}{91,8\text{ см}^2} = 15\text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{(15\text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,8\text{ кН/см}^2)^2} \approx 23,04\text{ кН/см}^2 = 230,4\text{ МПа} < 270\text{ МПа} = R_2.$$

Здесь R_2 дано в табл. № 1.

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 15\text{ кН/см}^2 + 10\text{ кН/см}^2 = 25\text{ кН/см}^2 = 250\text{ МПа} < 270 = R_2.$$

Недонапряжение составляет 8,7%.

Другие прокатные профили дают больший запас прочности.

Окончательно принимаем в качестве перекладины для 1-го варианта усилий (57) широкополочный двутавр №50 Б1 (при $R = R_2 = 270\text{ МПа}$).

Далее назначим профиль №55 Б1 : характеристики сечения: $h = 54,52\text{ см}$, $A = 110\text{ см}^2$,
 $g = 86,3\text{ кг/м}$, $J_X = 54480\text{ см}^4$, $W_X = 2000\text{ см}^3$, $Z_0 = 6,62$, $t = 0,92\text{ см}$.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{150\text{ кН} \cdot \text{м}}{2000\text{ см}^3} \approx 7,55\text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 110\text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 54,52\text{ см} - 6,62\text{ см}) = 1135,2\text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{180\text{ кН} \cdot 1135,2\text{ см}^3}{0,92\text{ см} \cdot 54480\text{ см}^4} = 4,07\text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1369,7\text{ кН}}{110\text{ см}^2} = 12,45\text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{(12,45\text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,07\text{ кН/см}^2)^2} \approx 14,3\text{ кН/см}^2 = 143\text{ МПа} < 220\text{ МПа} = R_1.$$

Здесь R_1 дано в табл. 1.

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 12,45\text{ кН/см}^2 + 7,55\text{ кН/см}^2 = 20\text{ кН/см}^2 = 200\text{ МПа} < 220 = R_1.$$

Недонапряжение составляет 10%. Другие прокатные профили дают больший запас прочности. Окончательно принимаем в качестве перекладины для 1-го варианта усилий (57) широкополочный двутавр №50 Б1 (при $R = R_1 = 220 \text{ МПа}$).

Перейдём ко второму варианту усилий (58). В качестве перекладины назначим широкополочный прокатный двутавр №40 Б1: характеристики сечения: $h = 39,58 \text{ см}$, $A = 60,1 \text{ см}^2$, $g = 47,2 \text{ кг/м}$, $J_x = 15810 \text{ см}^4$, $W_x = 799 \text{ см}^3$, $Z_0 = 4,73 \text{ см}$, $t = 0,68 \text{ см}$.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{799 \text{ см}^3} \approx 16,2 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 0,5 \cdot 60,1 \text{ см}^2 \cdot (0,5 \cdot 39,58 \text{ см} - 4,73 \text{ см}) = 452,55 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 452,55 \text{ см}^3}{0,68 \text{ см} \cdot 15810 \text{ см}^4} = 7,43 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{60,1 \text{ см}^2} = 17,85 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности:

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 17,85 \text{ кН/см}^2 + 16,2 \text{ кН/см}^2 = 34,05 \text{ кН/см}^2 = 340,5 \text{ МПа} \approx 330 \text{ МПа} = R_3.$$

Перенапряжение составляет – 3%. Здесь R_3 дано в табл. 1. Другие прокатные профили дают неоправданно больший запас прочности !

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(17,85 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (7,43 \text{ кН/см}^2)^2} \approx 22,0 \text{ кН/см}^2 = 220 \text{ МПа} < 330 \text{ МПа} = R_3.$$

Прочность обеспечена.

Окончательно принимаем в качестве перекладины для 2-го варианта усилий (58) широкополочный двутавр №40 Б1 (при $R = R_3 = 330 \text{ МПа}$). Далее, в качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 45 Б1. Данные этого профиля приведены выше при рассмотрении 1-го варианта.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1110 \text{ см}^3} \approx 11,6 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 629,624 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 629,624 \text{ см}^3}{0,76 \text{ см} \cdot 24690 \text{ см}^4} = 5,92 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{74,6 \text{ см}^2} = 14,407 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности:

На фибровых волокнах (64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 14,407 \text{ кН/см}^2 + 11,6 \text{ кН/см}^2 = 26,007 \text{ кН/см}^2 = 260,07 \text{ МПа} < 270 \text{ МПа} = R_2.$$

Здесь R_2 дано в табл. 1. Недонапряжение составляет $\approx 3\%$.

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(14,41 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (5,92 \text{ кН/см}^2)^2} = 17,69 \text{ кН/см}^2 = 177 \text{ МПа} < 270 \text{ МПа} = R_2.$$

Окончательно принимаем в качестве перекладины профиль №45 Б1 при 2 варианте усилий (58) и $R = R_2 = 270 \text{ МПа}$.

Далее в качестве перекладины назначим прокатный широкополочный двутавр № 50 Б1. Данные этого профиля приведены выше при рассмотрении 1-го варианта.

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{129 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1520 \text{ см}^3} \approx 8,5 \text{ кН/см}^2;$$

$$S = 862,92 \text{ см}^3.$$

$$\tau = \frac{176,4 \text{ кН} \cdot 862,92 \text{ см}^3}{0,844 \text{ см} \cdot 37670 \text{ см}^4} = 4,79 \text{ кН/см}^2.$$

$$\sigma_0 = \frac{1074,76 \text{ кН}}{91,8 \text{ см}^2} = 11,71 \text{ кН/см}^2.$$

Проверка прочности: На фибровых волокнах(64):

$$\sigma_0 + \sigma_{\text{и}} = 11,71 \text{ кН/см}^2 + 8,5 \text{ кН/см}^2 = 20,21 \text{ кН/см}^2 = 202,1 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа} = R_1.$$

Здесь R_2 дано в табл. 1. Недонапряжение составляет $-7,7\%$.

На нейтральной оси :

$$\sqrt{(11,71 \text{ кН/см}^2)^2 + 3 \cdot (4,79 \text{ кН/см}^2)^2} = 14,35 \text{ кН/см}^2 = 143,5 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа} = R_1.$$

Окончательно принимаем в качестве перекладины профиль №50 Б1 при 2-м варианте усилий (58). И $R = R_2 = 220 \text{ МПа}$.

Перейдём к рассмотрению третьего варианта усилий (59).

Пользуясь формулой (66) определим требуемый момент сопротивления изгибу для стальных, приведенных в табл.1:

$$\begin{aligned} 1. \quad W_X &= \frac{M}{\gamma R} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{1,1 \cdot 0,9 \cdot 22 \text{ кН/см}^2} = \frac{1687,5 \cdot 10^2 \text{ см}^3}{0,99 \cdot 22} = \frac{1687,5 \cdot 10^2 \text{ см}^3}{21,78} = 77,4 \cdot 10^2 \text{ см}^3 = 7740 \text{ см}^3 \\ 2. \quad W_X &= \frac{M}{\gamma R} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{0,99 \cdot 27} = 63,1 \cdot 10^2 \text{ см}^3 = 6310 \text{ см}^3 \\ 3. \quad W_X &= \frac{M}{\gamma R} = \frac{1687,5 \text{ кН} \cdot 10^2 \text{ см}}{32,67} = 5160 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

По сортаменту [4], [5], подбираем сечение широкополочного прокатного двутавра:

1. №100 Б1 с $W_X = 8940 \text{ см}^3 > 7740 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки : $\rho = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 3405 \text{ кг}$.
2. №90 Б1 с $W_X = 6920 \text{ см}^3 > 6310 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки: $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$;
 общий вес балки : $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 2895 \text{ кг}$.
3. №90 Б1 с $W_X = 6920 \text{ см}^3 > 5160 \text{ см}^3$;
 погонный вес балки: $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки : $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 2895 \text{ кг}$.

Итак, мы рассмотрели 9 – вариантов балок.

Обсуждение результатов. Для наглядности подытожим результаты.

Вариант №1.

Обычная, нешпренгельная балка (широкополочный прокатный двутавр):

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$$

1. №50 Б1, $R_1 = 220 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1294,5\text{кг}$.
2. №55 Б1, $R_2 = 270 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1081,5\text{кг}$.
3. №45 Б1, $R_3 = 330 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 877,5\text{кг}$.

Вариант №2.

(оптимизированный вариант).

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

1. №50 Б1, $R_1 = 220 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 1081,5\text{кг}$.
2. №45 Б1, $R_2 = 270 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 877,5\text{кг}$.
3. №40 Б1, $R_3 = 330 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 708,0\text{кг}$.

Вариант №3.

$$\kappa \rightarrow \infty; \quad z = 0.$$

1. №100 Б1, $R_1 = 22 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 3405\text{кг}$.
2. №90 Б1, $R_1 = 27 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895\text{кг}$.
3. №90 Б1, $R_1 = 33 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$;
 общий вес балки: $\rho l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895\text{кг}$.

Далее перейдем к определению веса шпренгельных элементов.

Вариант №1.

$$\kappa=0; \quad z = \frac{11}{30};$$

Воспользуемся усилиями (57):

$$\begin{cases} F = -1369,7 \text{ кН}; \\ N = 367 \text{ кН}; \\ N_k = 1422 \text{ кН}; \\ N_\Gamma = 1222 \text{ кН}. \end{cases}$$

Вычислим длину l_3 косой затяжки (рис. 1). Примем, как и ранее $h = 0,1 \cdot l$.

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + \left(\frac{l}{10}\right)^2} = \frac{1}{3}l \cdot 1,04;$$

По формуле (68):

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_k}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 71,81 \text{ см}^2;$$

Это – два уголка, каждая по $A=37,4 \text{ см}^2$: $37,4 \text{ см}^2 \cdot 2 = 74,8 \text{ см}^2 > 71,81 \text{ см}^2$;

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_{\text{к}}}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 71,81 \text{ см}^2;$$

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{N_{\text{к}} \cdot 1,3}{R_{\text{вр}} \cdot \gamma} = \frac{1422 \text{ кН} \cdot 1,3}{37 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 55,51 \text{ см}^2 < 74,8 \text{ см}^2;$$

Принимаем 2 равнобоких уголка, каждая по $A = 37,4 \text{ см}^2$,
 погонный вес $\rho = 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Горизонтальная затяжка (рис.1).

$$A_{\text{г. нетто}} = \frac{N_{\text{г}}}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1222 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 61,71 \text{ см}^2;$$

Это – 2 уголка, каждая по $A = 31,4 \text{ см}^2$; погонный вес $\rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Стойка по формуле (67):

$$A_{\text{ст}} = \frac{367 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 18,53 \text{ см}^2;$$

Сечение стойки назначаем конструктивно из условия удобства устройства узлов.

Вычислим вес одной косой затяжки:

$$2 \cdot \rho l_3 = 2 \cdot 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot l_3 = 2 \cdot 29,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2 \text{ м} = 305,8 \text{ кг}$$

Вес 2-х косых затяжек:

$$2 \cdot 305,8 \text{ кг} = 611,6 \text{ кг},$$

Общий вес горизонтальной затяжки :

$$2 \cdot \rho l_{\text{г.з}} = 2 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot \frac{l}{3} = 2 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5 \text{ м} = 247 \text{ кг}.$$

Вес стойки: площадь сечения конструктивно: $A = 25,7 \text{ см}^2 > 18,53 \text{ см}^2 = A_{\text{ст}}.$

Номер прокатного двутавра №25 Б1, $\rho = 20,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Вес 2-х стоек:

$$2 \cdot \rho h = 2 \cdot 20,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 1,5 \text{ м} = 60,6 \text{ кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов по варианту №1:

$$60,6 \text{ кг} + 611,6 \text{ кг} + 247 \text{ кг} = 912,2 \text{ кг}$$

Вариант №2

$$\kappa = 0,524 \cdot 10^{-3}; \quad z = 0,362.$$

Воспользуемся усилиями (58):

$$F = -1074,76 \text{ кН};$$

$$N = 322,2 \text{ кН};$$

$$N_{\text{к}} = 1130 \text{ кН};$$

$$N_{\text{г}} = 1072,9 \text{ кН};$$

Далее мы не приводим пояснения.

$$A_{\text{к. нетто}} = \frac{1130 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = \frac{1130 \text{ кН}}{19,8 \text{ кН/см}^2} = 57,07 \text{ см}^2;$$

2 уголка, каждая по $A = 31,4 \text{ см}^2$; $31,4 \text{ см}^2 \cdot 2 = 62,8 \text{ см}^2$; погонный вес $\rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}};$

Общий вес одной косой затяжки:

$$2 \cdot \rho l = 2 \cdot 31,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot l = 2 \cdot 31,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2 \text{ м} = 326,6 \text{ кг};$$

Вес 2-х косых затяжек:

$$2 \cdot 326,6 \text{ кг} = 653,2 \text{ кг},$$

$$A_{\text{г}} = \frac{N_{\text{г}}}{R \cdot \gamma} = \frac{1072,9 \text{ кН}}{22 \text{ кН/см}^2 \cdot 0,9} = 54,19 \text{ см}^2;$$

2 уголка, каждая по $A=27,3\text{см}^2$; $27,3\text{см}^2 \cdot 2 = 54,6\text{см}^2 > 54,9$;

погонный вес $\rho = 21,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$.

Вес стойки принимаем по первому варианту: 60,6 кг.

Общий вес всех шпренгельных элементов по варианту №2:

$$60,6 \text{ кг} + 21,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5 \cdot 2 + 653,2 \text{ кг} = 60,6 + 653,2 + 215 = 928,8 \text{ кг}.$$

Это значение веса шпренгельных элементов необходимо уточнить с учетом условия оптимальности (55).

Поскольку модули упругости строительных сталей одинаковы, то формулу (55) можно записать так:

$$\frac{A_3 \cdot h^2}{l_3^3} = \frac{J}{l^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}};$$

По второму варианту выше были подобраны 3-вида широкополочного двутавра:

- при $R_1 = 220\text{МПа}$, №50 Б1, момент инерции сечения $J = 37670\text{см}^4$;
- при $R_2 = 270\text{МПа}$, №45 Б1, момент инерции сечения $J = 24690\text{см}^4$
- при $R_3 = 330\text{МПа}$, № 40 Б1, момент инерции сечения $J = 15810\text{см}^4$.

При $h = 0,1 \cdot l$, $l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2}$; $l = 15\text{м}$, и $J = 37670\text{см}^4$;

По формуле (Б) найдем $A_3 = 92\text{см}^2$.

При $J = 24690\text{см}^4$, сохранив все остальные параметры без изменения, из условия (Б) получим:

$$A_3 = 60,26\text{см}^2$$

При $J = 15810\text{см}^4$, сохранив все остальные параметры без изменения, из условия (Б) получим:

$$A_3 = 38,55\text{см}^2$$

По условию прочности:

$$A_3 = A_k = \frac{N_k}{R_1 \cdot \gamma} = \frac{1130\text{кН}}{19,8 \text{ кН/см}^2} = 57,07\text{см}^2.$$

По прочности требуется косая затяжка с меньшей площадью сечения. Но чтобы обеспечить выполнение условия оптимальности (55), окончательно назначаем

$$A_3 = 92\text{см}^2;$$

Если бы по условию прочности требовалась большая площадь, чем по оптимальности, то условие оптимальности можно было обеспечить при незначительной по прочности сечения A_3 , которая входит в формулу (55).

Длина косой затяжки по рис. (1):

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{3}\right)^2 + h^2} = 5,2\text{м};$$

Здесь: $l = 15\text{м}$, $h = 0,1 \cdot l$.

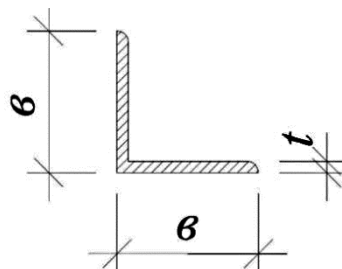


Рис. 3. Профиль равнобокого уголка
Fig. 3. Profile of an equilateral corner

Назначим 2 уголка, каждая по $A=47,1\text{см}^2$;

$$47,1\text{см}^2 \cdot 2 = 94,2\text{см}^2 > 92\text{см}^2;$$

По рис. 3. $b=200\text{мм}$; $t=12\text{мм}$; погонный вес $g = 37 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$.

Общий вес 2-х косых затяжек (4-рѐх уголков):

$$4 \cdot l_3 \cdot g = 4 \cdot 5,2\text{м} \cdot 37 \frac{\text{кг}}{\text{м}} = 769 \text{ кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда перекладина №50 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 769\text{кг} + 215\text{кг} = 1044,6 \text{ кг}.$$

Назначим 2 уголка, каждая по $A=31,4\text{см}^2$;

$$31,4\text{см}^2 \cdot 2 = 62,8\text{см}^2 > 60,26\text{см}^2; \quad \text{погонный вес } \rho = 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}}.$$

Общий вес 2-х косых затяжек (4-рѐх уголков):

$$4\rho \cdot l_3 = 4 \cdot 24,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2\text{м} = 513,76\text{кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда перекладина №45 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 513,76\text{кг} + 215\text{кг} = 789,34 \text{ кг}.$$

Назначим 2 уголка, каждая по $A=19,2\text{см}^2$;

$$2 \cdot 19,2\text{см}^2 = 38,4\text{см}^2 \approx 38,55\text{см}^2;$$

$$\rho = 15,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \quad (b=100\text{мм}; \quad t=10\text{мм}).$$

Общий вес 4-ѐх уголков (2-х косых затяжек):

$$4\rho \cdot l_3 = 4 \cdot 15,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 5,2\text{м} = 314\text{кг}.$$

Общий вес всех шпренгельных элементов (когда а №40 Б1):

$$60,6 \text{ кг} + 314 + 215\text{кг} = 589,6 \text{ кг}.$$

Для наглядности сведем в табл. 2, 3, 4 полученные выше значения.

По расчетной схеме (рис. 2.б)[3] $\kappa=0$; $z = \frac{11}{30}$;

Таблица 2. Результаты расчета
Table 2. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№55 Б1	$86,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 1294,5 кг.	4745,5 71197,5
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№50 Б1	$72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 1081,5 кг.	2956,1 44485
3	15X СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№45 Б1	$58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 877,5 кг.	3510 52650

С учетом веса и стоимости шпренгельных элементов табл. 2 уточняем в табл. 2а.

Шпренгельные элементы выполняются из стали марки ВСт3 пс 6-1, R1=220 МПа.

Таблица 2.а Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 2.a Weight and cost of a trussed beam

№	Вес шпренгельной балки Truss beam weight	Стоимость металла шпренгельной балки The cost of the metal of the trussed beam
1	1294,5кг + 980,8кг = 2275,3кг.	1,2945т · 55000р + 0,9808т · 55000р = 125141р
2	1081,5кг + 980кг = 2061,5кг	1,0815т · 41000р + 0,9808т · 55000р = 98241,5р
3	877,5кг + 980кг = 1857,5кг	0,8775т · 60000р + 0,9808т · 55000р = 106550р

По расчетной схеме (рис. 2.а) [3] $K = 0,7 \cdot 10^{-3}$; $z = 0,362$.

Таблица 3. Результаты расчета
Table 3. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№50 Б1	$72,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 11081,5 кг.	3965,5р 59482,5
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№45 Б1	$58,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 877,5 кг.	2398,5 35977,5
3	15X СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№40 Б1	$47,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ 708,0кг.	2832 42480

С учетом веса и стоимости шпренгельных элементов табл. 3 уточняем в табл. 3.а.

Шпренгельные элементы выполняются из стали марки ВСт3 пс 6-1, R1=220 МПа.

Таблица 3.а Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 3.a Weight and cost of a trussed beam

№	Вес шпренгельной балки Truss beam weight	Стоимость металла шпренгельной балки The cost of the metal of the trussed beam
1	1081,5кг+1044,6 кг=2126,1 кг.	1,0815т·55000р+1,0446т·55000р=116935,5
2	877,5кг+789,3кг=1666,8 кг	0,8775т·41000р+0,789т·55000р=79372,5р
3	708,0кг+589,6кг=1297,6 кг	0,708т·60000р+0,5896т·55000р=74909,0р

По расчетной схеме (рис. 2.в)) [3] $\kappa \rightarrow \infty$; $z \rightarrow \infty$; (обычная, нешпренгельная балка).

Таблица 4. Результаты расчета
Table 4. Calculation results

№	Марка стали Steel grade	Стоимость 1 тонны в руб. The cost of one ton in rubles	Группа стали и расчетное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Number of wide-shelf I-beam	Вес 1 погонного метра; Общий вес перекладины Weight of one linear meter; Total weight of the crossbar	Стоимость 1 погонного метра; Общий вес перекладины Price one linear meter; Total weight of the crossbar
1	ВСт3 пс 6-1	55000	Сталь обычной прочности, R1=220 МПа. Regular strength steel	№100 Б1	227 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 3405 кг.	12485 187275
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр.	41000	Сталь обычной прочности, R2=270 МПа. Regular strength steel	№90 Б1	193 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 2895 кг.	7913 118695
3	15Х СНД	60000	Сталь повышенной прочности, R1=330 МПа. High strength steel	№90 Б1	195 $\frac{\text{кг}}{\text{м}}$. 2895кг.	11700 173700

На основании таблиц 2.а, 3.а и 4 составим сводную табл.5:

Таблица 5. Сводная таблица расчетов
Table 5. Summary table of calculations

№	Марка стали Steel grade	Значение коэффициента К The value of the coefficient	Вес конструкции в целом, в кг. The weight of the structure as a whole, in kg.	Стоимость металла всей конструкции в руб. The cost of the metal of the entire structure in rubles.	Процентное соотношение в весе % Percentage in weight %	Процентное соотношение в стоимости % Percentage in cost %
1	ВСт3 пс 6-1 R1=220 МПа.	K = 0	2275	125141	67	67
		K = 0,7 · 10 ⁻³	2126	116935,5	62	62
		K → ∞	3405	187275	100	100
2	ВСт3 пс 6-2 н. обр. R2=270 МПа	K = 0	2061	98241,5	71	83
		K = 0,7 · 10 ⁻³	1667	79372,5	58	67
		K → ∞	2895	118695,0	100	100
3	15Х СНД R1=330 МПа.	K = 0	1857	106555	64	61
		K = 0,7 · 10 ⁻³	1298	74909,0	45	43
		K → ∞	2895	173700,0	100	100

Вывод. Из сводной табл. 5 следует вывод: оптимизация параметров, которая обеспечивается при $K = 0,7 \cdot 10^{-3}$, приводит к существенной экономии металла и снижению его стоимости. Такая экономия находится в пределах 40-50 % по сравнению с обычными балками.

Кроме этого, сравнение результатов исследования работы шпренгельных балок с одной стойкой [1, 2] и с двумя стойками говорит о рациональности шпренгельных балок с двумя стойками на пролётах $l = (12 - 18)\text{м}$.

Приведенная в статье методика исследования эффективности работы шпренгельных балок с двумя стойками, а также их расчет могут найти широкое применение при проектировании шпренгельных балочных конструкций.

Библиографический список:

1. 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.
2. 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
3. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельных балок с двумя стойками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 48, №3, 2021 г. С.117-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132.
4. 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.
5. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
6. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников. Расчет стальных конструкций. М–75г. С.30-41.
7. 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.
8. 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.
9. Металлические конструкции. под ред. Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
10. Металлические конструкции. под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
11. 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; Оpubл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 5 с.
12. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1980. С.195-196.
13. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
14. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
15. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
16. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2010.
17. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
18. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
19. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019

References:

1. Yusupov A.K., Muselemov K.H.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)]
2. Yusupov A.K., Muselemov K.H.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)]

3. Yusupov A.K., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of the parameters of trussed beams with two posts. Bulletin of the Daghestan State Technical University. Technical science. Volume 48, No. 3, 2021 C.117-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-117-132.
4. Akayev N.K., Yusupov A.K. [Vestnik Daghestanskogo 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)]
5. Azharmachev 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)]
6. Klykov V.M., YA.M. Likhtarnikov Calculation of steel structures M.:75; 30-41. (In Russ)
7. 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)
8. 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)
9. Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986; 382-384. (In Russ)
10. Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011; 439-442. (In Russ)
11. Pat. 130333 RF. MPK E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonno 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)]
12. Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M.: Stroyizdat, 1980;195-196. (In Russ)
13. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
14. Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016; 120. (In Russ)]
15. F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, [Atlas stal'nykh konstruktsiy.]. Atlas of Steel Structures. 1977; 37-84 (In Russ)]
16. 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)]
17. Yusupov A.K. Daghestanskiy 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)]
18. 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)]
19. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov SH.G. Vestnik Mashinostroyeniya, [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhalalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", 2019; 12: 112 (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 02.02.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.02.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 20.02.2022.

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 Microsoft Word. 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 Microsoft Word 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 по центру.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Резюме (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 Microsoft Word 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

**Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей,
поступивших в редакцию журнала**

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +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 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio 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 Imama Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +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 49– №1 – 2022.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 49, No.1 2022.

Верстка: Шагина С.Б.

Перевод: Субачев Ю.В.

Адрес редакции:

367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Тел./факс(8722)623715

(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Svetlana B.Shagina

Translation: Yuri V. Subachev

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 30.04.2022г. Сдано в печать 30.04.2022г.

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.