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, № 2, 2022.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 49, No.2, 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 Commu-nications (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; CyberLeninca, Microsoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

© Founder and Pablisher 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, № 2, 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.
Кругляков А.А., д.т.н., профессор, ген. директор научно-коммерческой фирмы WBH, 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, г. Махачкала, РФ.
Давидюк 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, № 2
Махачкала, 2022. – 188с.
Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»
Адрес учредителя и издателя
367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70,
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».
Тел./факс (8722)623715; (8722)623964
e-mail:vestnik.dgtu@mail.ru
Website: http://vestnik.dgtu.ru/

К ЮБИЛЕЮ !

ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Дагестанский государственный технический университет – учреждение высшего образования инновационного типа, обладающее высоким интеллектуальным и научным потенциалом. С момента создания университет подготовил более 50 тысяч специалистов востребованных инженерных профессий, обеспечив кадрами высшей квалификации многие отрасли республики и страны.

Решение об организации Дагестанского политехнического института было принято на основании Постановления Совета Министров СССР от 24 декабря 1970 г., № 1021. Приказом Министра высшего и среднего специального образования РСФСР от 17 августа 1971 г., №330 были утверждены структура Дагестанского политехнического института, перечень кафедр, лабораторий и кабинетов, а также совещательных органов института. Приказом Министра высшего и среднего специального образования РСФСР от 24 февраля 1972 г., №71 были окончательно решены все организационные вопросы и создан Дагестанский политехнический институт. Приказом Государственного комитета РФ по высшему образованию от 5 июня 1995 г., №852 Дагестанский политехнический институт был преобразован в Дагестанский государственный технический университет.

Опираясь на исторические традиции, наращивая интеллектуальный капитал, используя современные методики и стратегии инновационного развития, непрерывно совершенствуя направления деятельности, университет сегодня вышел на передовые позиции в науке, образовании и воспитательной сфере.

В структуре вуза 11 факультетов, 38 кафедр, 5 научно-исследовательских институтов, 3 филиала, 24 специализированных центра, в том числе крупнейший в СКФО Центр современных информационных технологий, где установлен и используется в учебном процессе и научных исследованиях суперкомпьютер (вычислительный кластер HPProliant); Международный учебно-научный центр ДГТУ; Учебно-научный центр «Современные электронные элементы и технологии», созданный совместно с компаниями Analog Devices, Inc.; Всероссийский инжиниринговый центр микроспутниковых компетенций и др.

В 2017 году с целью выявления и поддержки одаренных детей на уровне довузовского образования, обеспечения соответствующих условий для их образования и творческого развития в интересах личности, общества и государства создан и функционирует Центр для одаренных детей ДГТУ «Сириус-Альтаир». В вузе функционирует «Центр повышения квалификации и переподготовки руководящих работников и специалистов». На профильных предприятиях и организациях республики создана 21 базовая кафедра университета.

Подготовку специалистов осуществляет высококвалифицированный научно-педагогический коллектив, состоящий из докторов наук и профессоров, кандидатов наук и доцентов, членов-корреспондентов РАН и РААСН, академиков и членов-корреспондентов российских и международных общественных академий.

Деятельность университета лицензирована по 49 направлениям бакалавриата, 11 – специалитета, 40 – магистратуры, 24 – аспирантуры и 7 специальностям среднего профессионального образования.

С целью реализации государственной политики в области подготовки национальных кадров для зарубежных стран, поддержки и развития академической мобильности образовательных услуг в университете ведется обучение иностранных граждан из стран дальнего и ближнего зарубежья, в том числе из Азербайджана, Афганистана, Белоруссии, Камеруна, Казахстана, Кот-д'Ивуара, Марокко, Украины, Узбекистана и Южной Кореи.

В университете проводится системная научно-исследовательская работа по 52 научным направлениям; функционируют диссертационные советы по защите докторских и кандидатских диссертаций по техническим наукам.

Плодотворная изобретательская деятельность ученых университета находит подтверждение соответствующими патентами, свидетельствами и сертификатами. Только за последние 10 лет университетом получено более 2000 патентов и положительных решений на изобретения и полезные модели, а также 102 свидетельства на ЭВМ и базы данных, что является одним из лучших показателей среди вузов и научных учреждений РФ.

Передовые разработки университета экспонируются на крупнейших выставках научных достижений, среди которых: Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед», Международный Салон исследований и технологического трансфера «INVENTICA» (Румыния), Российско-Британский Форум изобретений и инновационных технологий (Великобритания), Весенняя ярмарка в г. Лейпциг (Германия), Международная выставка в г. Пекин (Китай), Международная научно-техническая выставка в г. Ганновер (Германия), Международный Салон изобретений и новых технологий «Новое Время» (Республика Крым), Всероссийская выставка-ярмарка научно-исследовательских работ и инновационной деятельности «ИННОВ» (г. Новочеркасск), Международная ярмарка изобретений SIIF в г. Сеул (Южная Корея), Международная техническая ярмарка «International Technical Fair 2016» (Болгария), Дагестанский экономический форум, выставки «Деловой Дагестан» и «Дагпродэкспо» и др.

С 2005 г. сотрудники университета принимают активное участие в программе «СТАРТ», организованной Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, в рамках которой создано 11 малых предприятий, занимающихся разработкой наукоемкой продукции. Создан бизнес-инкубатор, функционирующий в составе Технологического парка ДГТУ и обеспечивающий эффективную интеграцию образования, науки и производства.

Коллектив вуза активно участвует в выполнении научно-исследовательских работ по научно-техническим программам и грантам Президента РФ, Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), Российского гуманитарного научного фонда (РГНФ), а также по государственному заданию Министерства образования и науки РФ.

В университете реализуются проекты федеральных целевых программ: «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»; «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники»; «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», а также аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы».

На протяжении многих лет университет является победителем в конкурсе проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса.

Преподаватели, студенты и аспиранты принимают также участие в Первом Республиканском конкурсе молодежных IT-проектов «DagITstan»; в Республиканском конкурсе молодежных инновационных проектов; в конкурсе «Лучшая научная статья» (г. Кельн, Германия); в конкурсе на соискание медалей Российской академии наук с премиями для молодых ученых РАН и т.д.

В ДГТУ традиционно проводятся внутривузовские конкурсы: «Молодой изобретатель», «Молодой программист», «Лучшая монография ДГТУ», «Гранты ректора ДГТУ», «Инновационный потенциал молодежи ДГТУ», победители которых получают грантовую поддержку.

Разработки ученых ДГТУ за последнее время дважды удостаивались государственной премии Республики Дагестан в области науки, техники, литературы, публицистики, искусства и архитектуры. За последние пять лет победителями программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК) стали 58 студентов, аспирантов и молодых ученых.

Университет является соорганизатором масштабных мероприятий регионального уровня, которые прошли на базе ДГТУ: II Форум промышленников и предпринимателей РД, Каспийский энергетический форум и Налоговый форум РД.

В университете имеется научно-техническая библиотека, ежегодно пополняемый фонд которой, составляет свыше 1 млн. экземпляров литературы.

В университете развита система организации участия студентов в олимпиадах и конкурсах различных уровней. Ежегодно проводится региональный этап Всероссийской олимпиады школьников по информатике, физике, экономике; Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ, Всероссийские предметные интернет-олимпиады и олимпиады по специальностям среди студентов. ДГТУ на протяжении многих лет является лидером по количеству победителей в олимпиадах и конкурсах, проводимых Молодежным союзом экономистов и финансистов Российской Федерации.

Одним из приоритетных направлений деятельности вуза является воспитательная работа, которая направлена на разностороннее развитие личности, формирование высокого уровня культуры, активной гражданской позиции и социальной активности.

В целях реализации молодежных инициатив, развития творческого и интеллектуального потенциала в университете функционируют: объединенный Совет обучающихся, Комитет по делам молодежи, Совет молодых ученых, студенческое научное общество, студенческий Совет общежитий, Студенческий клуб, спортивный клуб, футбольный клуб «Политех», волонтерский отряд «Твори добро», добровольческий отряд «Надежда», экологическое движение «Здоровое поколение», туристический отряд «Наследники ДГТУ», строительный отряд «Политех», Команда КВН «Сборная ДГТУ», интеллектуальный клуб «Технари» и хореографический ансамбль ДГТУ «Вершины Кавказа», ячейки Дагестанских региональных отделений ООМД «Ассоциация студентов и студенческих объединений России» и ООМО «Студенты России».

ДГТУ – пятикратный победитель Республиканского конкурса студенческой весны. Представляя Республику Дагестан на Всероссийской студенческой весне, ДГТУ одержал триумфальную победу в г. Челябинск, завоевав 3 первых, 2 вторых и 2 третьих места. Войдя в сборную Российской Федерации, ДГТУ стал обладателем Гран-при Международного фестиваля студенческой весны стран СНГ на Кавказе. Сборная команда КВН университета является победителем региональных турниров, занимает призовые места на Всероссийском конкурсе «Веселые! Здоровые! Удачливые!».

ДГТУ располагает двумя футбольными полями, современными тренажерными залами для занятий тяжелой атлетикой, гиревым спортом и фитнесом, залом для настольного тенниса, летней спортивной площадкой для занятий баскетболом и волейболом.

Особой гордостью университета является собственный плавательный бассейн - «Политех», построенный в рамках проекта «500 бассейнов для вузов России» ВПП «Единая Россия» и современный пятисекторный скалодром. На берегу Каспийского моря функционирует спортивно-оздоровительный лагерь «Политехник».

Инициируя новые социально-экономические и инновационные проекты, ДГТУ успешно реализует приоритетные задачи системы высшего образования Российской Федерации.

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника **9**

О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, Т.Ю. Магомедов. Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов 9
Ю.В. Кудров, Л.В. Сумзина, А.В. Максимов, С.Л. Филимонов. Калориметрический стенд для исследования процессов в холодильном агрегате 18

Информационные технологии и телекоммуникации **24**

В.А. Вольф, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.А. Хвостов. К вопросу анализа существующих методов доступа штатных пользователей к информационным ресурсам автоматизированных систем органов внутренних дел 24
А.Р. Газизов. Алгоритм применения кроссплатформенного мобильного приложения для защиты информации в облачном хранилище 33
А.С. Лосев. Информационная безопасность предпринимательских сетей 46
В.Б. Мелехин В.М. Хачумов, М.В. Хачумов. Инварианты в задачах распознавания образов и контроля состояний сложных объектов 56
Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов. Определение скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей 67
Хоанг Конг Кинь. Метод построения обучающего курса САПР 76

Строительство и архитектура **87**

Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова. Продольные колебания стержней от динамических и кинематических возмущений 87
Б.Х. Бештоков, А.С. Ципинов, А.М. Гусенов, А.Р. Кажаров, А.А. Карданов. Сцепление арматуры с туфобетонами на кварцевых песках, приготовленными на портландцементе без добавок и с расширяющими добавками 94
Х.М. Гукетлов, И.З. Сруков. К вопросу учета светового климата при расчете и проектировании естественного освещения зданий 103
Х.Р. Зайнулабидова, Р.Г. Гасанов. Особенности региональных параметров колебания грунта как основа принятия оптимального проектного решения 110
Ю.Г. Иващенко, Р.Т. Мамешов. Управляемые воздействия на структурообразование и свойства цементных бетонов 123
А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Алгоритм численного расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем итерационным методом приращений параметров с учетом последействия давления воздуха 133
К.Г. Кондрашин, Р.А. Петров, Н.А. Рактович. Накопление необратимой деформации грунтов как результат повторных нагрузок 143
С.А. Логинова, А.А. Петренко. Исследование различных видов биологической коррозии бетона 150
М.Р. Нахаев. Аддитивная технология изготовления изделий и сооружений из армобетона 158
Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, Ф.М. Шогенова, А.Х. Артабаев, М.Х. Машукова. Свойства огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций 165
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров. Влияние пролета на работу большепролетных конструкций 177

Требования к оформлению статей **185**

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 . 2 , 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. (Econom.), 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. Kobzarenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences 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;
Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;
Scientific rubric «Computer science, computer engineering and management»
Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;
Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia
Igor E.Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;
Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;
Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;
Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
Boris I. 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 Construtions 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.2
Makhachkala, 2022–188p.
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 **9**

O.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, T.Yu. Magomedov. Calculation model of thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices 9
Yu.V. Kudrov, L.V. Sumzina, A.V. Maksimov, S.L.Filimonov. Calorimetric stand for research of processes in the refrigeration unit 18

Information Technology and Telecommunications **24**

V.A.Wolf , V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.A. Khvostov. To the question of analysis of existing methods of access of regular users to information resources of automated systems of internal affairs bodies . 24
A.R. Gazizov. An algorithm for using a cross-platform mobile application to protect information in cloud storage 33
A.S. Losev. Information security of business networks 46
V.B. Melekhin, V.M. Khachumov, M.V. Khachumov. Invariants in problems of pattern recognition and control of states of complex objects 56
Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov, H.D. Magomedov.Determination of seismic wave velocities on the ground using artificial neural networks 67
Hoang Cong Kinh. Method for constructing a CAD training course 76

Building and Architecture **87**

L.A. Baragunova, M.M. Shogenova. Longitudinal vibrations of rods from dynamic and kinematic perturbations 87
B.H. Beshtokov, A.S. Tsipinov, A.M. Gusenov, A.R. Kazharov, A.A. Cardanov. Coupling of reinforcement with Tuff concrete on quartz sands prepared on Portland cement without additives and with expanding additives 94
H.M. Guketlov, I.Z. Srukov. On the issue of taking into account the light climate in the calculation and design of natural lighting in buildings 103
H.R. Zainulabidova, R.G. Gasanov. Features of regional parameters of soil fluctuations as a basis for making an optimal design decision 110
Yu.G. Ivaschenko, R.T.Mameshov. Controlled impacts for structure formation and properties of cement concretes 123
A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Algorithm for numerical calculation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by iterative method of parameter increments taking into account the aftereffect of air pressure 133
K.G. Kondrashin, S.R. Kosobokova, R.A. Petrov, N.A. Raktovich. Accumulation of irreversible deformation of soils as a result of repeated loading 143
S.A. Loginova, A.A. Petrenko. Investigation of various types of biological corrosion of concrete 150
M.R. Nakhaev. Additive technology for manufacturing products and structures from reinforced concrete. ...158
T.A. Khezhev, G.N. Khadzhishalapov, F.M. Shogenova, A.Kh. Artabaev, M.Kh. Mashukova. Properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures 165
A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, H.M. Gapparov. Influence of the span on the operation of large-span structures 177

Formatting requirements for papers **185**

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-9-17 Оригинальная статья /Original Paper

Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов

О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, Т.Ю. Магомедов
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка расчетной модели термоэлектрической системы (ТЭС) для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов (ДПП), реализованной в пакете прикладных программ Elcut, и проведение соответствующего численного эксперимента по ней. **Метод**. Разработан новый тип системы охлаждения ДПП, в котором используется несколько секций ТЭМ, обеспечивающих теплосъем, как с нижней, так и с верхней поверхности тепловыделяющих элементов, что увеличивает поверхность теплообмена между источником холода и элементом РЭА и повышает эффективность теплосъема. Методом конечных элементов построена расчетная модель данной системы на основе решения задачи теплопроводности для многоэлементной конструкции сложной конфигурации, каждая составляющая которой характеризуется тепло- и электрофизическими параметрами. **Результат**. Проведен численный эксперимент по расчетной модели. В результате него получены результаты численного эксперимента в виде трехмерной картины температурного поля системы ДПП - ТЭС при выходе ее на стационарный режим, а также графиков изменения во времени температуры в центре дискретных полупроводниковых приборов при различных величинах холодопроизводительности термоэлектрического модуля. **Вывод**. В результате численного эксперимента установлено, что предложенная конструкция охлаждающей ТЭС в полной мере позволяет решить задачу обеспечения требуемого температурного режима ДПП в диапазоне его мощностей до 75 Вт. При этом использование секций термоэлектрических модулей из идентичных по своим геометрическим, электро- и теплофизическим характеристикам термоэлементов позволяет повысить технологичность создания устройства, а также обеспечить его работу в оптимальных токовых режимах.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура (РЭА), дискретный полупроводниковый прибор, охлаждение, термоэлектрическая система, термоэлектрический модуль, расчетная модель, численный эксперимент, температура

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, Т.Ю. Магомедов. Расчетная модель термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(2):9-17. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-9-17

Calculation model of thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices

O.V. Evdulov, A.M. Ibragimova, T.Yu. Magomedov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a computational model of a thermoelectric system (TPS) for cooling discrete semiconductor devices (DSD), implemented in the Elcut application software package, and to conduct a corresponding numerical experiment on it. **Method.** A new type of DPP cooling system has been developed, which uses several TEM sections that provide heat removal from both the lower and upper surfaces of the fuel elements, which increases the heat ex-

change surface between the cold source and the REE element and increases the heat removal efficiency. Using the finite element method, a computational model of this system is constructed based on the solution of the problem of thermal conductivity for a multi-element structure of a complex configuration, each component of which is characterized by thermal and electrical parameters. **Result**. A numerical experiment was carried out using the calculation model. As a result of it, the results of a numerical experiment were obtained in the form of a three-dimensional picture of the temperature field of the DPP - TPP system when it reaches the stationary mode, as well as graphs of temperature changes over time in the center of discrete semiconductor devices at various values of the cooling capacity of the thermoelectric module (TEM). **Conclusion**. As a result of the numerical experiment, it was found that the proposed design of the cooling TPP fully allows solving the problem of ensuring the required temperature regime of the DPP in the range of its power up to 75 W. At the same time, the use of sections of thermoelectric modules from thermoelements identical in their geometric, electrical and thermal characteristics makes it possible to increase the manufacturability of the device, as well as to ensure its operation in optimal current modes.

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. Ibragimova, T.Yu. Magomedov. Calculation model of thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 9-17. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-9-17

Введение. Одной из основных тенденций создания РЭА на сегодняшний день является включение в ее состав большого количества дискретных полупроводниковых приборов (ДПП), характеризующихся высокой плотностью тепловых потоков [1-3]. Одновременно расширяется температурный диапазон эксплуатации такой аппаратуры, усложняются другие условия ее работы (влажность, давление и т. п.), при этом растут требования к стабильности характеристик элементов, входящих в ее состав. Работа большинства ДПП должна проходить в условиях значительных внутренних и внешних тепловых нагрузок, колебаний температуры окружающей среды, а параметры устройств при этом должны оставаться в заданных пределах. Стабильной и продолжительной работы таких элементов РЭА удается добиться, лишь создав им необходимые температурные условия эксплуатации. Как правило, они формируются за счет применения специальных охлаждающих систем, которые разнообразны в своем конструктивном исполнении, принципе работы, а также имеют существенный разброс в массогабаритных, энергетических и технологических характеристиках [4-8].

Среди существующих технических средств для отвода теплоты и термостабилизации малогабаритной РЭА, к элементам которой относятся ДПП, с точки зрения соответствия последним по массогабаритным и энергетическим показателям, необходимо выделить охлаждающие ТЭС [9-14]. Охлаждающие ТЭС, обладая высокой экологичностью, большим ресурсом работы, надежностью, независимостью от ориентации в пространстве, возможностью термостатирования, могут обеспечить температурный режим работы малогабаритных радиоэлементов с высокой точностью при минимальных габаритных размерах и мощностях питания, соответствующих мощностям питания самих РЭА.

В [15] рассмотрена ТЭС для охлаждения малогабаритной РЭА. В ней проблема повышения эффективности охлаждения малогабаритных ДПП, находящихся в составе РЭА с плотной упаковкой, решается путем использования нескольких секций стандартных ТЭМ, образующих ТЭС и осуществления теплосъема, как с нижней, так и с верхней поверхности тепловыделяющих элементов.

Структурная схема прибора показана на рис.1. Обозначено: 1 - основная секция ТЭМ, 2 - дополнительные секции ТЭМ, 3 - основная теплообменная система, 4 - ДПП, 5 - дополнительная теплообменная система, 6 - теплоизоляция (обладающая также электроизоляционными

свойствами), 7 - источник постоянного электрического тока. В данной конструкции эффективность охлаждения повышается за счет увеличения площади теплообмена между ТЭС и тепловыделяющим элементом.

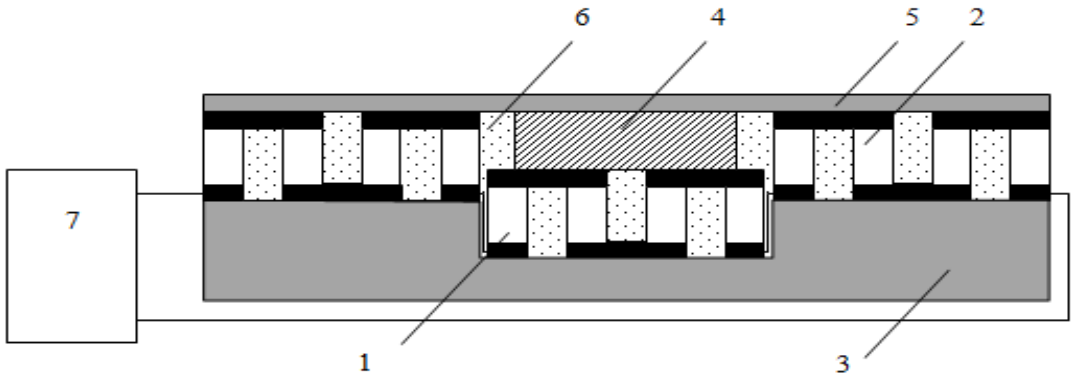


Рис.1. Структурная схема термоэлектрической системы для охлаждения дискретных полупроводниковых приборов
Fig.1. Structural diagram of a thermoelectric system for cooling discrete semiconductor devices

Постановка задачи. Целью работы является разработка расчетной модели ТЭС для охлаждения ДПП, реализованной в пакете прикладных программ Elcut, проведение соответствующего численного эксперимента по ней.

Методы исследования. Физическая модель ТЭС совместно с ДПП и конечно-элементной сеткой изображена на рис.2.

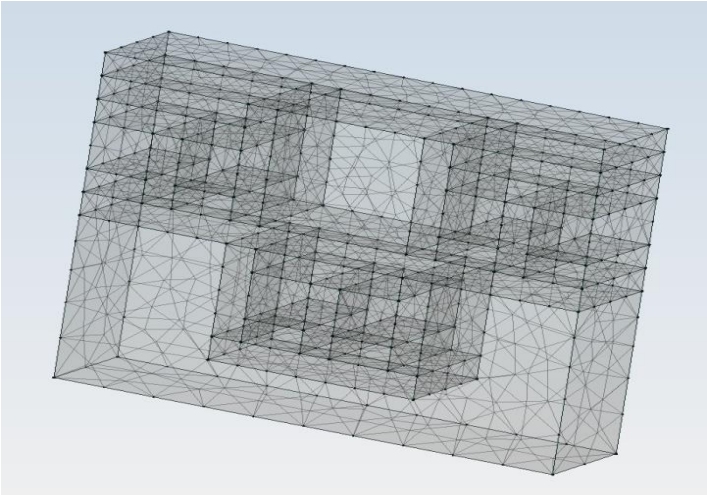


Рис.2. Объемная модель термоэлектрической системы совместно с дискретными полупроводниковыми приборами и конечно-элементной сеткой
Fig.2. 3D Model of a Thermoelectric System Together with Discrete Semiconductor Devices and a Finite Element Mesh

В модели выделяются следующие области: ветвь термоэлемента из полупроводника p-типа, ветвь термоэлемента из полупроводника n-типа, коммутационные элементы, теплоизоляция, основная теплообменная система (предназначена для съема теплоты с горячих спаев ТЭМ, обеспечивающих охлаждение нижней поверхности ДПП), дополнительная теплообменная система (предназначена для сопряжения холодных спаев ТЭМ, обеспечивающих отвод теплоты от ДПП с его верхней поверхности, с последним).

В расчетной модели в соответствии с рекомендациями, изложенными в [16, 17], каждый ТЭМ представлен в виде единичного термоэлемента, а все его характеристики являются приведенными. При практических расчетах каждый термомодуль состоит из m единичных термоэлементов. Все электро- и теплофизические характеристики термоэлементов идентичны.

Математическая модель представляет собой систему трехмерных дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности с учетом выделения в объеме ветвей термоэлементов, контактов и ДПП Джоулевой теплоты [18, 19].

Начальные, граничные условия и условия сопряжения - система уравнений для тепловых потоков на границах слоев, в том числе учитывающих поглощение (выделения) теплоты Пельтье, а также наличие конвективного теплообмена в остальных частях системы ТЭС - ДПП. Математическая формулировка задачи моделирования выглядит следующим образом:

$$\lambda_{р}\left(\frac{\partial^2 T_{р}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{р}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{р}}{\partial z^2}\right)+Q_{Дж.р}=\rho_{р}C_{р}\frac{\partial T_{р}}{\partial \tau},$$

$$\lambda_{n}\left(\frac{\partial^2 T_{n}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{n}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{n}}{\partial z^2}\right)+Q_{Дж.n}=\rho_{n}C_{n}\frac{\partial T_{n}}{\partial \tau},$$

$$\lambda_{к}\left(\frac{\partial^2 T_{к}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{к}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{к}}{\partial z^2}\right)+Q_{Дж.к}=\rho_{к}C_{к}\frac{\partial T_{к}}{\partial \tau}, \qquad (1)$$

$$\lambda_{ДПП}\left(\frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{ДПП}}{\partial z^2}\right)+P_{ДПП}=\rho_{ДПП}C_{ДПП}\frac{\partial T_{ДПП}}{\partial \tau},$$

$$\lambda_{отс}\left(\frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{отс}}{\partial z^2}\right)=\rho_{отс}C_{отс}\frac{\partial T_{отс}}{\partial \tau},$$

$$\lambda_{дтс}\left(\frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{дтс}}{\partial z^2}\right)=\rho_{дтс}C_{дтс}\frac{\partial T_{дтс}}{\partial \tau},$$

$$\lambda_{т}\left(\frac{\partial^2 T_{т}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_{т}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_{т}}{\partial z^2}\right)=\rho_{т}C_{т}\frac{\partial T_{т}}{\partial \tau}.$$

Начальные условия:

$$T_{р}=T_{n}=T_{к}=T_{т}=T_{ДПП}=T_{отс}=T_{дтс}=T_{срс} \text{ при } \tau=0.$$

Граничные условия:

$\lambda_{р}\frac{\partial T_{р}}{\partial x}-\alpha j_{ТЭМ}T_{р}=\lambda_{к}\frac{\partial T_{к}}{\partial x}$ на холодной контактной поверхности ветви из полупроводника р-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_{р}\frac{\partial T_{р}}{\partial x}+j_{ТЭМ}T_{р}=\lambda_{к}\frac{\partial T_{к}}{\partial x}$ на горячей контактной поверхности ветви из полупроводника р-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_{n}\frac{\partial T_{n}}{\partial x}-\alpha j_{ТЭМ}T_{n}=\lambda_{к}\frac{\partial T_{к}}{\partial x}$ на холодной контактной поверхности ветви из полупроводника n-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} + j_{ТЭМ} T_n = \lambda_к \frac{\partial T_к}{\partial x}$ на горячей контактной поверхности ветви из полупроводника n-типа - коммутационного элемента,

$\lambda_к \frac{\partial T_к}{\partial x} = \lambda_т \frac{\partial T_т}{\partial x}$ на контактной поверхности коммутационного элемента - теплоизоляции,

$\lambda_{дтс} \frac{\partial T_{дтс}}{\partial x} = \lambda_{ДПП} \frac{\partial T_{ДПП}}{\partial x}$ на контактной поверхности дополнительной теплообменной системы - ДПП,

$\lambda_{отс} \frac{\partial T_{отс}}{\partial x} = \beta_{отс}\left(T_{отс} - T_{ср}\right)$ на контактной поверхности основной теплообменной системы - окружающей среды,

$\lambda_{дтс} \frac{\partial T_{дтс}}{\partial x} = \beta_{дтс}\left(T_{дтс} - T_{ср}\right)$ на контактной поверхности дополнительной теплообменной системы - окружающей среды,

где T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; C - теплоемкость; ρ - плотность; x, y, z - координаты; β - коэффициент теплообмена; $Q_{Дж}$ - количество теплоты Джоуля, выделяемое в единицу времени в единице объема; $P_{ДПП}$ - мощность тепловыделений ДПП в единице объема; $j_{ТЭМ}$ - плотность электрического тока ТЭМ; индексы при переменных: p - полупроводник p-типа, n - полупроводник n-типа, к - коммутационный элемент, т - теплоизоляция, отс - основная теплообменная система, дтс - дополнительная теплообменная система, ср - окружающая среда.

Решение системы уравнений (1) осуществлено методом конечных элементов, непосредственно реализованном в пакете прикладных программ Elcut [20].

Обсуждение результатов. На основе рассмотренной постановки задачи произведен численный эксперимент. В результате него получены трех-, двух- и одномерные температурные поля системы прибор - ДПП для различных мощностей и плотностей электрических токов питания ТЭМ, условий теплообмена с окружающей средой.

Также получены графики изменения во времени температуры в контрольных точках системы (ДПП, спаях ТЭМ, основной и дополнительной теплообменной системы) при изменении тех же параметров.

На рис.3 в качестве примера показано трехмерное температурное поле данной системы при выходе ее на стационарный режим, на рис. 4 - графики изменения во времени температуры в центре ДПП при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ. $T_{ср}$=23 С, $P_{ДПП}$=25 Вт, для рис.3 мощность одного ТЭМ $Q_{ТЭМ}$=12 Вт.

Согласно полученным соотношениям, картина распределения температуры в системе ТЭС - ДПП существенно не однородна.

Минимум температуры приходится на холодные спаи дополнительных секций ТЭМ, а максимум - на горячие спаи основной секции ТЭМ.

При этом температура в центре ДПП в стационарном режиме при оговоренных выше условиях колеблется в пределах от 15 до 20 С. Продолжительность выхода на режим системы составляет порядка 4 мин, что объясняется ее относительно небольшими габаритными размерами.

В качестве ТЭМ могут использоваться стандартные термомодули российских фирм производителей, в частности, ООО «Криотерм» (г. Санкт-Петербург).

Для определения их характеристик (тока и напряжения питания, потребляемой мощности, холодильного коэффициента) по найденным в результате расчета величинам $Q_{ТЭМ}$ применена программа Thermoelectric system calculation [21], размещенная на сайте этой же фирмы.

В результате расчета характеристик ТЭМ, определено, что для эффективного охлаждения ДПП мощностью вплоть до 75 Вт, целесообразным является использование стандартного термомодуля типа ICE-71.

При этом его рабочий диапазон мощностей будет находиться в пределах от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К. При этом ток питания будет составлять 2÷8 А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,38 до 0,43.

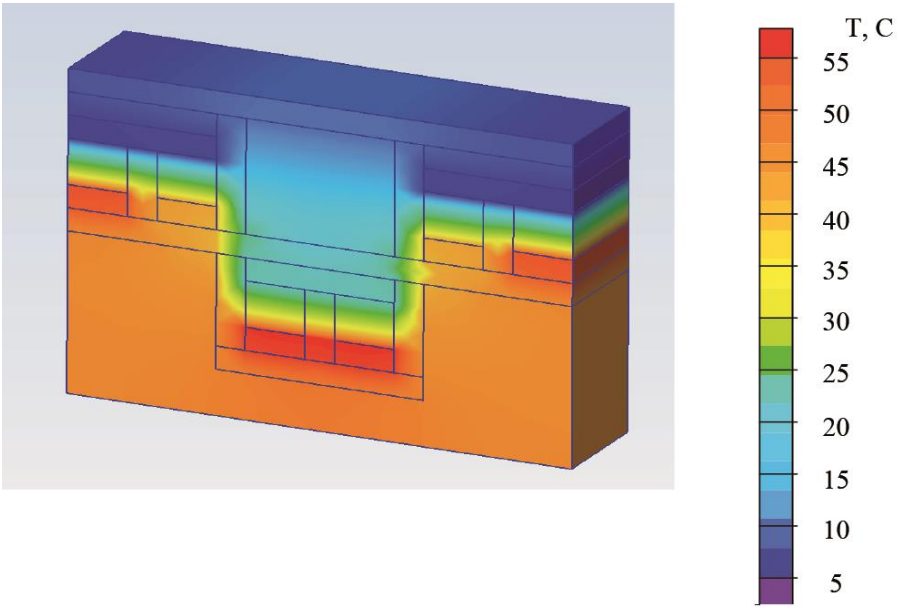


Рис. 3. Трехмерное температурное поле термоэлектрической системы при выходе на стационарный режим
Fig. 3. Three-dimensional temperature field of a thermoelectric system when reaching a stationary regime

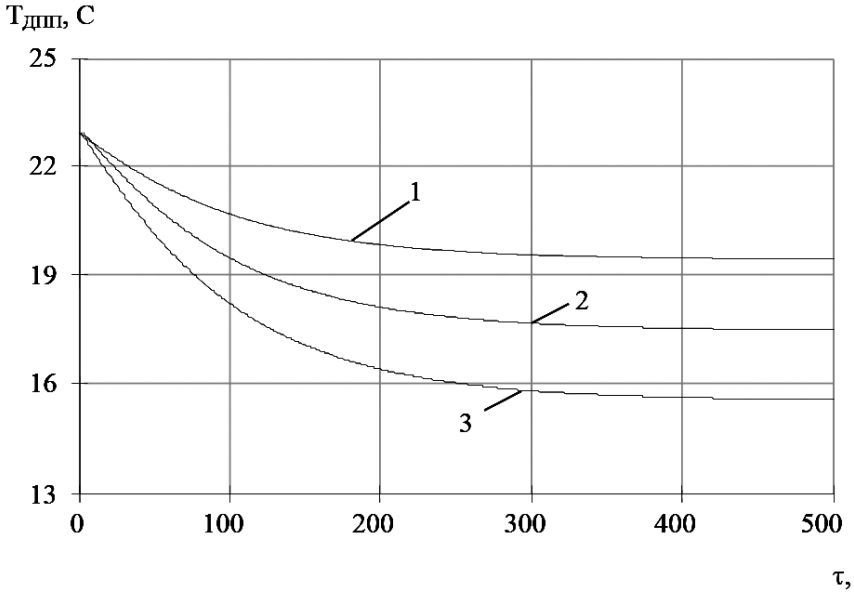


Рис. 4. Изменения во времени температуры в центре дискретных полупроводниковых приборов при различных мощностях одного термоэлектрического модуля
1- $Q_{ТЭМ}$=8 Вт, 2 - $Q_{ТЭМ}$=12 Вт, 3 - $Q_{ТЭМ}$=16 Вт
Fig. 4. Temperature changes in time at the center of discrete semiconductor devices at different powers of one thermoelectric module
1 - Q_{TEM}=8 W, 2 - Q_{TEM}=12 W, 3 - Q_{TEM}=16 W

На рис.5 показаны графики, отражающие зависимость мощности данного типа ТЭМ от перепада температур $\Delta T_{ТЭМ}$ между его спаями для различных величин тока питания $I_{ТЭМ}$.

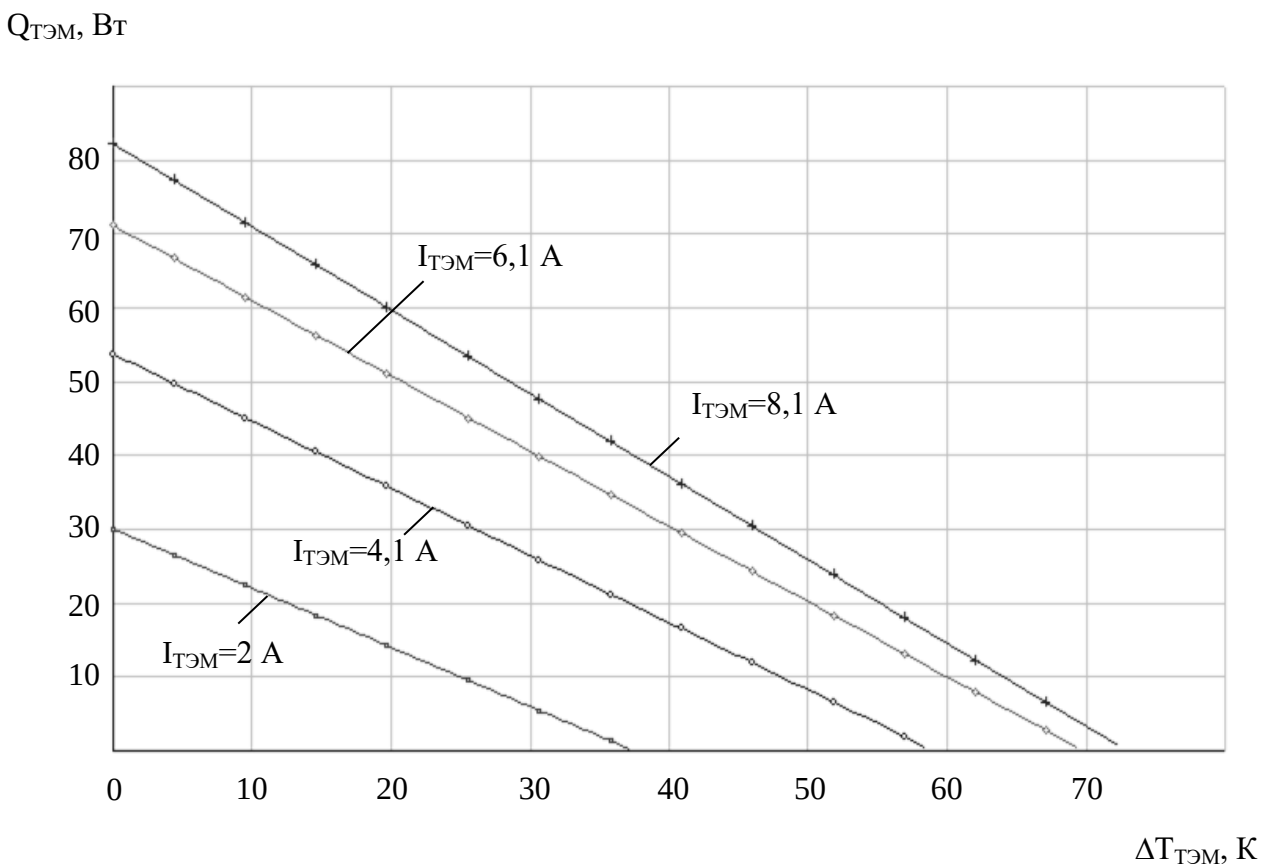


Рис. 5. Зависимость мощности ТЭМ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания
Fig. 5. Dependence of the TEM power on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

Вывод. Разработан новый тип системы охлаждения ДПП, в котором используется несколько секций ТЭМ, обеспечивающих теплосъем, как с нижней, так и верхней поверхности тепловыделяющих элементов, что увеличивает поверхность теплообмена между источником холода и элементом РЭА и повышает эффективность теплосъема.

Рассмотрена расчетная модель данной системы. Она построена на основе решения задачи теплопроводности для многоэлементной конструкции сложной конфигурации, каждая составляющая которой характеризуется своими тепло- и электрофизическими параметрами, методом конечных элементов.

Представлены результаты численного эксперимента в виде трехмерной картины температурного поля системы ДПП - ТЭС при выходе ее на стационарный режим, а также графиков изменения во времени температуры в центре ДПП при различных величинах холодопроизводительности ТЭМ.

В результате численного эксперимента установлено, что предложенная конструкция охлаждающей ТЭС в полной мере позволяет решить задачу обеспечения требуемого температурного режима ДПП в диапазоне его мощностей до 75 Вт.

При этом использование секций ТЭМ из идентичных по своим геометрическим, электро- и теплофизическим характеристикам термоэлементов позволяет повысить технологичность создания устройства, а также обеспечить его работу в оптимальных токовых режимах.

Библиографический список:

1. Камышная Э.Н. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры / Э.Н. Камышная, В.В. Маркелов, В.А. Соловьев. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 165 с.
2. Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов / Н.С. Кудрявцева. - М.: МАИ, 2012. - 226 с.
3. Черепанов В.П. Защита радиоэлектронной аппаратуры от перегрузок / В.П. Черепанов, Е.И. Посысаев. - М.: Радио-Софт, 2015. - 216 с.
4. Коновалов Д.А. Современные подходы к разработке и созданию элементов систем тепловой защиты радиоэлектронных компонентов Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов // Вестник ВГТУ. - 2014. - Т. 10. - №. 1. - С. 97-104.
5. Dai Jun. Optimum cooling of data centers / Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.]. - New York: Springer-Verlag, 2014. - 186 p.
6. Shabany Y. Heat transfer: thermal management of electronics / Y. Shabany. - Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. - 471 p.
7. Меркульев А. Ю. Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий / А. Ю. Меркульев, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Молодой ученый. - 2013. - № 11 (58). - С. 143-145.
8. Андреев П.Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова. - Пенза: ПГУ, 2012. - 130 с.
9. Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Патент РФ № 2314663. 2008. Бюл. № 1. / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Менафов А.М.
10. Термоэлектрическая батарея//Патент РФ № 2338300. 2008. Бюл. № 31. / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В.
11. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация режимов термоэлектрического охлаждения теплонагруженных элементов / Е.Н. Васильев//Журнал технической физики. - 2017. -Т.87, № 1. - С. 80-86.
12. Евдулов О.В. Экспериментальные исследования системы охлаждения электронных плат / О.В. Евдулов, А.М. Хайбулаев//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - Махачкала: ДГТУ. - 2022. - Т. 49, №1. - С. 6-13.
13. Васильев Е.Н. Термоэлектрическое охлаждение теплонагруженных элементов электроники / Е.Н. Васильев // Микроэлектроника. - 2020. - Т. 49, № 2. - С. 133-141.
14. Евдулов О.В. Модель системы неравномерного охлаждения электронных плат / О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2016. - Т. 41, №2 - С. 61-67.
15. Ибрагимова А.М., Евдулов О.В. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для отвода теплоты от элементов РЭА // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: статья в сборнике научных трудов X Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 27-29 окт. 2021 г.). СПб., 2021. С.12-15.
16. Исмаилов Т.А. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения электронной аппаратуры / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2002. - № 7. - С. 59-62.
17. Александров А.А. Теплотехника. / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 880 с.
18. Теория тепломассообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
19. Bergman T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. - New York: John Wiley & Sons, 2011. - 1076 p.
20. https://elcut.ru (дата доступа 19.05.2022).
21. http://kryotherm.spb.ru (дата доступа 19.05.2022).

References:

1. Kamyshnaya E.N. Design and technological calculations of electronic equipment. E.N. Kamyshnaya, V.V. Markelov, V.A. Solovyov. M.: MSTU im. N. E. Bauman, 2014: 165. (In Russ)
2. Kudryavtseva N.S. Fundamentals of designing effective systems for thermal control of spacecraft / N.S. Kudryavtsev. - M.: MAI, 2012: 226. (In Russ)
3. V.P. Cherepanov, E.I. Posysaev. Protection of electronic equipment from overloads. *M.: Radio-Soft*, 2015: 216. (In Russ)
4. D.A. Konovalov, 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)
5. Jun Dai, Michael M. Ohadi, [et al.] Optimum Cooling of Data Centers. New York: *Springer-Verlag*, 2014: 186.
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. 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)
10. 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)

11. 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)
12. Evdulov O.V. Experimental studies of the cooling system of electronic boards. O.V. Evdulov, A.M. Khaibulaev [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* Makhachkala: DSTU. 2022; 49(1): 6-13. (In Russ)
13. Vasiliev E.N. Thermoelectric cooling of heat-loaded electronics elements. Microelectronics. 2020; 49(2): 133-141. (In Russ)
14. Evdulov O.V. Model of the system of non-uniform cooling of electronic boards / O.V. Evdulov, D.V. Evdulov [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2016; 41(2): 61-67. (In Russ)
15. Ibragimova A.M., Evdulov O.V. Thermoelectric semiconductor devices for heat removal from REA elements. Low-temperature and food technologies in the XXI century: an article in the collection of scientific papers of the X International Scientific and Technical Conference (St. Petersburg, October 27-29, 2021). SPb., 2021: 12-15. (In Russ)
16. Ismailov T.A. Modeling of heat transfer processes in a thermoelectric device for cooling electronic equipment. T.A. Ismailov, O.V. Evdulov . News of higher educational institutions. Instrumentation. 2002; 7: 59-62. (In Russ)
17. Aleksandrov A.A. Heat engineering. A.A. Aleksandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [i dr.]. M: MSTU im. N.E. Bauman, 2017: 880. (In Russ)
18. Theory of heat and mass transfer. Under. ed. A.I. Leontiev. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2018: 464. (In Russ)
19. Bergman T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011:1076.
20. https://elcut.ru (дата доступа 19.05.2022).
21. http://kryotherm.spb.ru (дата доступа 19.05.2022).

Сведения об авторах:

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

Ибрагимова Асият Магомедовна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; ibrasya@mail.ru.

Магомедов Тимур Юсупович, старший преподаватель кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии; Magomedov173@gmail.com.

Information about authors:

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

Asiyat M. Ibragimova, Applicant for the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ib-rasya@mail.ru.

Timur Yu. Magomedov, Senior Lecturer, Department of Electricity and Renewable Energy Sources; Magomedov173@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.04.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 04.05.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 04.05.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.562
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-18-23 Оригинальная статья /Original Paper

Калориметрический стенд для исследования процессов в холодильном агрегате

Ю.В. Кудров, Л.В. Сумзина, А.В. Максимов, С.Л. Филимонов
Российский государственный университет туризма и сервиса,
141221, Московская область, г.о. Пушкинский, дп. Черкизово, ул. Главная, 99, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является разработка калориметрического стенда, позволяющего моделировать работу энергоэффективного двухиспарительного холодильного агрегата бытового холодильника или морозильника. **Метод.** В ходе работы описана калориметрическая установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования по определению холодопроизводительности и энергоэффективности модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника. **Результат.** В настоящее время разработаны новые ресурсосберегающие схемные решения бытовой холодильной техники. Разработанные решения позволяют повысить эффективность холодильного агрегата, а также снизить его энергопотребление. Проведены теоретические расчеты, подтверждающие данные показатели. Для подтверждения расчетных значений требуется проведение автоматизированных экспериментальных исследований по определению параметров холодильного агрегата. В работе предлагается описание автоматизированного калориметрического стенда, позволяющего моделировать работу энергоэффективного двухиспарительного холодильного агрегата бытового холодильника или морозильника. **Вывод.** Спроектированный калориметрический стенд позволит проводить комплексные экспериментальные исследования по определению холодопроизводительности модернизированного холодильного агрегата при работе на различных холодильных агентах. Экспериментальная установка позволяет также производить измерение температуры и давления в процессе работы холодильного агрегата, а также определять влияние различных факторов на его характеристики.

Ключевые слова: холодильный агрегат, калориметрический стенд, энергоэффективность, холодопроизводительность, теплообменник, двухкамерный холодильник, пароотделитель

Для цитирования: Ю.В. Кудров, Л.В. Сумзина, А.В. Максимов, С.Л. Филимонов. Калориметрический стенд для исследования процессов в холодильном агрегате. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):18-23. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-18-23

Calorimetric stand for research of processes in the refrigeration unit

Yu.V. Kudrov, L.V. Sumzina, A.V. Maksimov, S.L.Filimonov
Russian State University of Tourism and Service,
99 Glavnaya Str., Cherkizovo, Urban district Pushkinsky, Moscow region, 141221, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to develop a calorimetric stand that allows simulating the operation of an energy-efficient two-evaporator refrigeration unit of a household refrigerator or freezer. **Method.** In the course of the work, a calorimetric setup is described that allows conducting experimental studies to determine the cooling capacity and energy efficiency of a modernized refrigeration unit of a household refrigerator. **Result.** Currently, new resource-saving circuit solutions for household refrigeration equipment have been developed. The developed solutions make it possible to increase the efficiency of the refrigeration unit, as well as to reduce its energy consumption. Theoretical calculations confirming these indicators have been carried out. To confirm the calculated values,

automated experimental studies are required to determine the parameters of the refrigeration unit. The paper proposes a description of an automated calorimetric stand that allows simulating the operation of an energy-efficient dual-evaporator refrigeration unit of a household refrigerator or freezer. **Conclusion.** The designed calorimetric stand will allow carrying out complex experimental studies to determine the cooling capacity of the modernized refrigeration unit when operating on various refrigerants. The experimental setup also makes it possible to measure the temperature and pressure during the operation of the refrigeration unit, as well as to determine the influence of various factors on its characteristics.

Keywords: refrigeration unit, calorimetric stand, energy efficiency, cooling capacity, heat exchanger, two-chamber refrigerator, steam separator

For citation: Yu.V. Kudrov, L.V. Sumzina, A.V. Maksimov, S.L.Filimonov. Calorimetric stand for research of processes in the refrigeration unit. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 18-23. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-18-23

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется энергоэффективным технологиям получения холода [1 – 8]. Многие производители современной бытовой холодильной техники не стремятся раскрыть свои технические инновации в данной сфере. Каждое предприятие, выпускающее холодильную технику, разрабатывает новые технические решения, для подтверждения эффективности которых, требуется проведение исследований. Кроме этого, несмотря на то, что сейчас большое внимание уделяется энергоэффективности и энергосбережению бытовых приборов, различные исследования, направленные на решение данных вопросов, остаются актуальными и в наше время [9 – 14]. В связи с этим требуется разработка новых экспериментальных средств исследования бытовых холодильников и морозильников.

Проведение исследований является трудоемким процессом, требует значительных затрат на изготовление опытных образцов. В этой связи автоматизация исследований с возможностью управления процессами в холодильном агрегате позволит значительно снизить материальные и временные затраты на создание новых энергоэффективных моделей [15 – 18].

Постановка задачи. В работах [6, 19] описывается схема энергоэффективного бытового холодильника, представленная на рис. 1.

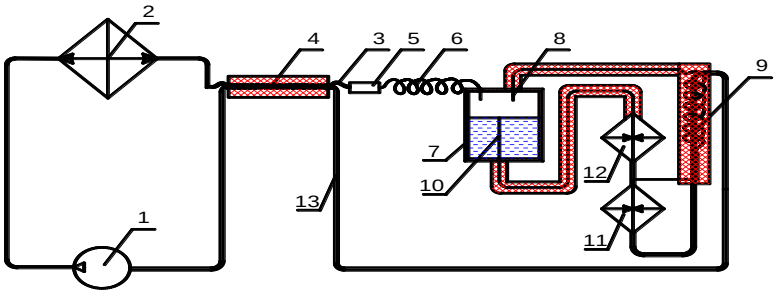


Рис.1. Схема холодильного агрегата [6, 19, 20]:

1- компрессор, 2 - конденсатор, 3 - трубопровод, 4 - первый теплообменник, 5 - фильтр-осушитель, 6 - первая капиллярная трубка, 7 - пароотделитель, 8 - капилляная трубка холодильной камеры, 9 - пароотделитель, 10 - капиллярная трубка низкотемпературной камеры, 11- испаритель холодильной камеры, 12 - испаритель низкотемпературной камеры, 13 - всасывающий трубопровод

Fig.1. Scheme of the refrigeration unit [6, 19, 20]:

1- compressor, 2 - condenser, 3 - pipeline, 4 - first heat exchanger, 5 - filter-drier, 6 - first capillary tube, 7 - steam separator, 8 - capillary refrigerant tube, 9 - steam separator, 10 - low temperature capillary tube , 11 - refrigeration evaporator, 12 - low temperature evaporator, 13 - suction pipeline

Отличительной особенностью данной схемы является разделение потока хладагента в процессе дросселирования в пароотделителе 8, а также использование теплоизолированного теплообменника 4, образованного трубкой после выхода из конденсатора и участком всасыва-

ющей трубки. После процесса дросселирования в основной капиллярной трубке 6 происходит разделение потоков дополнительными капиллярными трубками 8 и 10 [19, 20].

При определении эффективности применения дополнительных теплообменников и пароотделителя в модернизированном холодильном агрегате, а также рассмотрении возможности повышение энергоэффективности и холодопроизводительности бытовых двухкамерных холодильников за счет совершенствования холодильного агрегата применялись теоретические методы исследования с использованием теории термодинамики и теплообмена [19].

Для подтверждения полученных результатов требуется проведение экспериментальных исследований, что в свою очередь требует разработки калориметрического стенда, позволяющего определять влияние дополнительных теплообменников и пароотделителя на общую энергоэффективность холодильного агрегата [6, 19, 20].

Методы исследования. В ходе работы описана калориметрическая установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования по определению холодопроизводительности и энергоэффективности модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника или морозильника. Данный калориметрический стенд позволит подтвердить теоретические исследования, проведенные с использованием теории термодинамики и теплообмена.

Обсуждение результатов. Разработан калориметрический стенд для исследования влияния дополнительных теплообменников и пароотделителя на общую энергоэффективность холодильного агрегата. Схема стенда модернизированного холодильного агрегата представлена на рис.2.

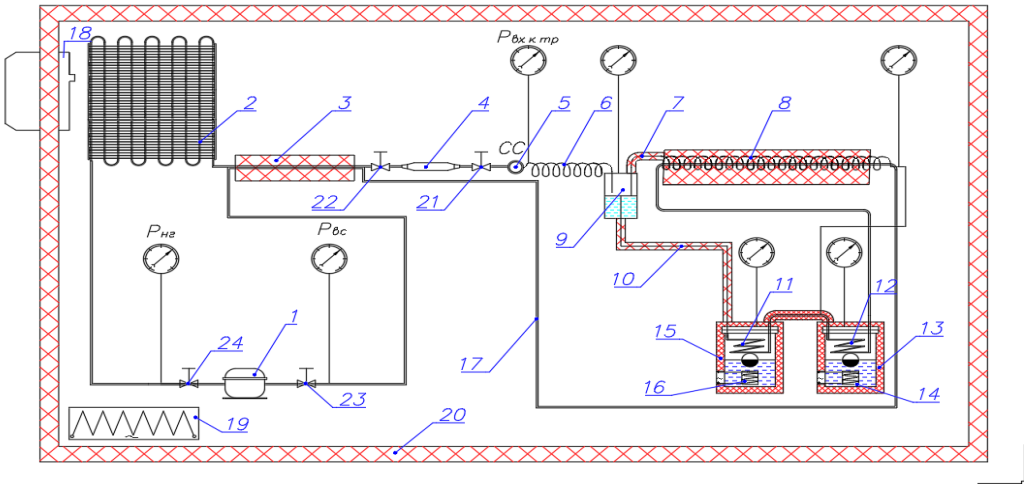


Рис.2. Схема стенда для определения холодопроизводительности модернизированного холодильного агрегата:

1 - компрессор, 2 - конденсатор, 3 - первый теплообменник, 4 - фильтр-осушитель, 5 -смотровое стекло, 6 - первая капиллярная трубка, 7 - вторая капиллярная трубка, 8 - второй теплообменник, 9 - пароотделитель, 10 - третья капиллярная трубка, 11 - испаритель низкотемпературной камеры, 12 - испаритель холодильной камеры, 13,15 - калориметры, 14,16 - нагреватели, 17 -всасывающий трубопровод, 18 - кондиционер, 19 - нагреватель, 20 - климатическая камера, 21-24 -запорные вентили

Fig.2. Scheme of the stand for determining the cooling capacity of the modernized refrigeration unit:

1 - compressor, 2 - condenser, 3 - first heat exchanger, 4 - filter-drier, 5 - sight glass, 6 - first capillary, 7 - second capillary, 8 - second heat exchanger, 9 - steam separator, 10 - third capillary , 11 - low-temperature evaporator, 12 - refrigeration evaporator, 13.15 - calorimeters, 14.16 - heaters, 17 - suction pipeline, 18 - air conditioner, 19 - heater, 20 - climatic chamber, 21-24 - stop valves

По данной схеме был спроектирован и собран калориметрический стенд, модель которого представлена на рис. 3.

Рис.3. Модель калориметрического стенда для определения холодопроизводительности энергоэффективного холодильного агрегата
Fig.3. Model of a calorimetric stand for determining the cooling capacity of an energy-efficient refrigeration unit

Представленный стенд (рис. 2 и 3) функционирует следующим образом: компрессор 1 нагнетает пары хладагента в конденсатор 2, где они охлаждаются и конденсируются при температуре и давлении конденсации.

После конденсатора трубопровод заключен в теплоизоляцию и образует совместно с всасывающим трубопроводом теплообменник 3, выход которого через фильтр-осушитель 4 и смотровое стекло 5 соединен с капиллярной трубкой 6. Капиллярная трубка 6 соединена с входом пароотделителя 9.

В связи с тем, что в процессе дросселирования в капиллярной трубке 6 часть хладагента переходит в паровую фазу, на вход в пароотделитель хладагент поступает в двух агрегатных состояниях.

Жидкий хладагент по теплоизолированной капиллярной трубке 10 направляется к испарителю 11, который располагается в калориметре 15. Парожидкостная смесь хладагента, через капиллярную трубку 7 направляется на вход в испаритель 12 калориметра 13. Нижняя часть калориметров заполнена вторичным холодильным агентом, в который погружены электрические нагреватели 14 и 16. Определение холодопроизводительности холодильного агрегата осуществляется по количеству тепла, подведенному для испарения жидкого хладагента в испарителе.

При испытании мощность нагревателей с помощью ЛАТРов регулируют таким образом, чтобы количество полученного холода было равно количеству подведенного тепла. В качестве вторичного холодильного агента в калориметрах используют фреон R-134a. По ходу движения газообразного хладагента применяется второй теплообменник 8, в котором происходит частичный переход газообразного хладагента в жидкое состояние. После кипения хладагента в испарителях 11 и 12 газообразный хладагент через теплообменники 8 и 3 направляется в компрессор 1, после чего цикл повторяется.

Для возможности быстрой замены компрессора и фильтра-осушителя используют запорные вентили 21 – 24 и специализированные герметичные муфты. Для исключения влияния окружающей среды и поддержания заданных значений температур окружающего воздуха, калориметрический стенд помещают в климатическую камеру 20. Заданные значения температур внутри камеры поддерживаются с помощью кондиционера 18 и нагревателя 19. Давление фреона определяют с помощью датчиков избыточного давления ОВЕН ПД 100-ДИ, которые для надежности дублируются образцовыми манометрами класса 0,6; температуру фреона определяют термопреобразователями, а также ртутными термометрами с ценой деления 0,1°С; температуру окружающего воздуха − термопреобразователями и термометрами с ценой делений 0,5°С . Термометровые гильзы для ртутных термометров устанавливают так, чтобы поток жид-

кости набегал на конец гильзы и шел снизу вверх (в обратном случае поток иногда заполняет сечение трубы не полностью, что вызывает ошибки в измерениях).

Датчики давления и термопреобразователи подключают к универсальным восьмиканальным приборам ОВЕН ТРМ 138. С помощью автоматического преобразователя интерфейсов RS-232/RS-485 данные с датчиков поступают на компьютер.

Вывод. Спроектированный калориметрический стенд позволит проводить комплексные экспериментальные исследования по определению холодопроизводительности модернизированного холодильного агрегата при работе на различных холодильных агентах. Экспериментальная установка позволяет также производить измерение температуры и давленая в процессе работы холодильного агрегата, а также определять влияние различных факторов на его характеристики.

Библиографический список:

1. Способ повышения энергоэффективности холодильников / Сучилин В.А., Максимов А.В., Сумзина Л.В., Бурцева Л.А.: пат. 2630813 С2 Рос. Федерация. №F25B 1/00 (2006.01); заявл. 30.10.2015; опубл. 04.05.2017, Бюл. №13; 7 с.
2. Анализ методов увеличения энергоэффективности компрессионных холодильников. Резников В.С., Романов П.В. Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2014. № 23. С. 143-146.
3. Оценка эффективности термодинамических циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Холодильная техника. 2006. No3. С. 16-25.
4. Лемешко М.А. Технологии повышения энергетической эффективностибытовых холодильных приборов //Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. –2014. –No 13. –С. 188-196.
5. Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А., Аржанов П.А., Бурцев И.А., Литвиненко А.А. Влияние рекуперативного теплообмена на эффективность цикла холодильного агрегата // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» Том 3, №2 (2016) http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
6. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В., Кочетков А.С. Энергоэффективный холодильный агрегат для двухкамерных холодильников и морозильников бытового и промышленного назначения // Промышленный сервис. 2019. № 1 (70). С. 24-26.
7. Максимов А.В., Коляда В.В., Сиротенко Я.А. Зависимость показателей термодинамической эффективности цикла холодильного агрегата от температуры переохлаждения в теплообменнике // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. №2, С.60-64.
8. Сумзина Л.В. Повышение энергетической эффективности бытовых компрессионных холодильников с двухиспарительной системой охлаждения. Диссертация ... кандидата технических наук : 05.02.13. - Москва, 1994.
9. Demenev A., Naberezhnykh A. Research of the process of formation of noise in Household Refrigerators (2019) Akustika, 32, pp. 135-137.
10. Кудров Ю.В., Сиротенко Я.А., Сумзина Л.В. Экспериментальные установки для исследования процесса дросселирования в капиллярных трубках бытовых холодильников // В сборнике: Современные проблемы туризма и сервиса Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых ученых. 2013. С. 198-202.;
11. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. Сравнительный анализ циклов бытового холодильника на хладагентах R134A, R600A // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 2. С. 57-59.;
12. Сумзина Л.В., Максимов А.В. Анализ потерь эксергии в цикле компрессионного бытового холодильника // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 37-39.;
13. Максимов А.В., Кудров Ю.В., Равилов Ф.А., Бурцева Л.А. Особенности процесса дросселирования хладагента в капиллярных трубках//Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» Том 3, №2 (2016) http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
14. Холодильный агрегат с теплообменником-докипателем / Максимов А.В., Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А.: пат. 155867 Рос. Федерация. №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 29.05.2015; опубл. 20.10.2015, Бюл. №29; 5 с.
15. Холодильный агрегат // Сумзина Л.В., Максимов А.В., Супрунов К.С. пат. 75232 Рос. Федерация. №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 18.12.2007; опубл. 27.07.2008
16. Особенности идеализированных циклов парокомпрессорных холодильных машин. Вассерман А.А., Лавренченко Г.К., Слынько А.Г. Технические газы. 2014. № 6 (2014). С. 30-36.
17. Холодильный агрегат морозильника бытового назначения: пат. 1155868 Рос. Федерация. №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 29.05.2015; опубл. 20.10.2015, Бюл. №29; 6 с.
18. Экспериментальные установки для исследования процесса дросселирования в капиллярных трубках бытовых холодильников. Кудров Ю.В., Сиротенко Я.А., Сумзина Л.В. В сборнике: Современные проблемы туризма и сервиса. Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых ученых. 2013. С. 198-202.
19. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., KudrovYu.V. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. Volume 8. №8, August 2020.
20. Патент РФ № 2018125056, №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 10.07.2018 Холодильный агрегат для двухкамерного холодильника / Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. //опубл. 15.01.2019, Бюл. №2

References:

1. A way to increase the energy efficiency of refrigerators / Suchilin V.A., Maksimov A.V., Sumzina L.V., Burtseva L.A.: pat. 2630813 C2 Ros.Federation. No. F25B 1/00 (2006.01); application 30.10.2015; publ. 04.05.2017; Bul. 13: 7. (In Russ)

2. Analysis of methods for increasing the energy efficiency of compression refrigerators. Reznikov V.S., Romanov P.V. [Intellektualʹnyy potentsial XXI veka: stupeni poznaniya] *Intellectual potential of the XXI century: stages of cognition.* 2014; 23: 143-146. (In Russ)
3. Evaluation of the efficiency of thermodynamic cycles of steam compression refrigerating machines and heat pumps. Kalnin I.M., Fadekov K.N. [Kholodilʹnaya tekhnika] *Refrigeration technology.* 2006; 3: 16-25. (In Russ)
4. Lemeshko, M.A. Technologies for increasing the energy efficiency of household refrigerating appliances. [Fundamentalʹnyye i prikladnyye issledovaniya: problemy i rezulʹtaty] Fundamental *and applied research: problems and results*. 2014; 13: 188-196. (In Russ)
5. Sumzina L.V., Kochetkova Ya.A., Arzhanov P.A., Burtsev I.A., Litvinenko A.A. Influence of regenerative heat exchange on the efficiency of the refrigeration unit cycle. Online magazine *"Waste and Resources"* 2016; 3(2) http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf (access is free). Cover from the screen. 6. Sumzina (In Russ)
6. L.V., Maksimov A.V., KudrovYu.V., Kochetkov A.S. Energy-efficient refrigeration unit for two-chamber refrigerators and freezers for domestic and industrial use [Promyshlennyy servis] *Industrial Service.* 2019; 70(1): 24-26. (In Russ)
7. Maksimov A.V., Kolyada V.V., SirotenkoYa.A. Dependence of the thermodynamic efficiency indicators of the refrigeration unit cycle on the temperature of supercooling in the heat exchanger. [Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy] *Electrotechnical and information complexes and systems.* 2012; 8(2):60-64 (In Russ)
8. Sumzina L.V. Improving the energy efficiency of household compression refrigerators with a two-vapor cooling system. dissertation ... Candidate of Technical Sciences : 05.02.13. - Moscow, 1994. (In Russ)
9. Demenev A., Naberezhnykh, A. Research of the process of formation of noise in Household Refrigerators Akustika, 2019; 32: 135-137.
10. KudrovYu.V., SirotenkoYa.A., Sumzina L.V. Experimental installations for the study of the throttling process in capillary tubes of household refrigerators/ In the collection: Modern problems of tourism and service Materials of the All-Russian Scientific Conference of graduate students and young scientists. 2013; 198-202. (In Russ)
11. Sumzina L.V., Maksimov A.V., KudrovYu.V. Comparative analysis of cycles of household refrigerator on refrigerants R134A, R600A. [Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy] *Electrotechnical and information complexes and systems.*. 2012; 8(2): 57-59. (In Russ)
12. Sumzina L.V., Maksimov A.V. Analysis of exergy losses in the cycle of a compression household refrigerator. [Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy] *Electrotechnical and information complexes and systems.* 2012; 8(1): 37-39.; (In Russ)
13. Maksimov A.V., KudrovYu.V., Ravilov F.A., Burtseva L.A. Features of the process of throttling refrigerant in capillary tubes . Online journal "*Waste and resources"* 2016; 3(2) http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf (access is free). Cover from the screen. Yaz.rus., Eng.; (In Russ)
14. Refrigerating unit with heat exchanger. Maksimov A.V., Sumzina L.V., KochetkovaYa.A.: pat. 155867 Ros.Federation. No. F25D 11/00 (2006.01); application.29.05.2015; publ. 20.10.2015, Bul. No. 29; 5 p. (In Russ)
15. Refrigerating unit // Sumzina L.V., Maksimov A.V., Suprunov K.S. pat. 75232 Ros.Federation.No.F25D 11/00 (2006.01); application. 18.12.2007; publ. 27.07.2008(In Russ)
16. Features of idealized cycles of steam compressor refrigerating machines. Wasserman A.A., Lavrenchenko G.K., Slynko A.G. [Tekhnicheskiye gazy] *Technical gases.* 2014; 6: 30-36. (In Russ)
17. Refrigerator unit freezer for household use: pat. 1155868 Ros.Federation. No. F25D 11/00 (2006.01); application 29.05.2015; publ. 20.10.2015, Bul. 29:6. (In Russ)
18. Experimental installations for the study of the throttling process in the capillary tubes of household refrigerators. KudrovYu.V., SirotenkoYa.A., Sumzina L.V. In the collection: Modern problems of tourism and service. Materials of the All-Russian Scientific Conference of graduate students and young scientists. 2013; 198-202. (In Russ)
19. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., KudrovYu.V. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. August 2020;
20. 8(8), RF Patent No. 2018125056, No. F25D 11/00 (2006.01); application 10.07.2018 Refrigeration unit for a two-chamber refrigerator / Sumzina L.V., Maximov A.V., KudrovYu.V. publ. 15.01.2019, Bul. 2(In Russ)

Сведения об авторах:
Кудров Юрий Владимирович, старший преподаватель Высшей школы сервиса; yurakudrov@yanex.ru
Сумзина Лариса Владимировна, кандидат технических наук, доцент, директор Высшей школы сервиса; byttech1@yandex.ru
Максимов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы сервиса; maksimovav52@yandex.ru
Филимонов Сергей Леонидович, доцент Высшей школы сервиса; filimser@mail.ru
Information about authors:
Kudrov Yury V., Senior Lecturer, Higher School of Service; yurakudrov@yanex.ru
Larisa V. Sumzina, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Higher School of Service; byt-tech1@yandex.ru
Alexander V. Maksimov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Higher School of Service; maksimovav52@yandex.ru
Sergey L. Filimonov, Assoc. Prof., Higher School of Service; filimser@mail.ru
Конфликт интересов/Conflict of interest.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 25.05.2022.
Одобрена после рецензирования/ Reviced 17.06.2022.
Принята в печать/Accepted for publication 17.06.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-24-32 Обзорная статья / Review article

К вопросу анализа существующих методов доступа штатных пользователей к информационным ресурсам автоматизированных систем органов внутренних дел

В.А. Вольф[1], В.С. Наседкина[1], А.Д. Попов[1], Е.А. Рогозин[1], В.А. Хвостов[2]
[1] Воронежский институт МВД России,
[1]394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,
[2]Воронежский университет инженерных технологий,
[2]394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время доступ к информационному ресурсу АС ОВД реализован через подсистему управлению доступом СЗИ на основе мандатного и дискреционного методов разграничения доступа, разработанных в 70-х годах прошлого столетия, и требующих улучшения. Целью исследования является анализ существующих методов и выбор на этой основе оптимального метода доступа штатных пользователей к информационным ресурсам автоматизированных систем ОВД. **Метод**. Системный анализ, метод теории графов, и вербальное (словесное) моделирование. **Результат**. Раскрыт новый аспект метода доступа штатных пользователей к информационным ресурсам автоматизированных систем ОВД, основанный на применении иерархических метрик семантической близости. **Вывод**. Применение метода, основанного на семантической близости, значительно сокращает обработку большого количества информации, соответственно, повышая производительность автоматизированных систем.

Ключевые слова: автоматизированные системы, системы защиты информации, метод доступа

Для цитирования: В.А. Вольф, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.А. Хвостов. К вопросу анализа существующих методов доступа штатных пользователей к информационным ресурсам автоматизированных систем органов внутренних дел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):24-32. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-24-32

To the question of analysis of existing methods of access of regular users to information resources of automated systems of internal affairs bodies

V.A.Wolf [1], V.S. Nasedkina[1], A.D. Popov[1], E.A. Rogozin[1], V.A. Khvostov[2]
[1]Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
[1]53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,
[2]Voronezh University of Engineering Technologies,
[2]19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russia

Abstract. Objective. Currently, access to the information resource of the ATS AS is implemented through the access control subsystem of the information security facility based on the mandatory and discretionary methods of access control developed in the 70s of the last century and requiring improvement. The purpose of the study is to analyze existing methods and, on this basis, select the optimal method for regular users to access information resources of automated systems of internal affairs bodies. **Method.** System analysis, graph theory method, and verbal (verbal) modeling. **Result.** A new aspect of the method of access of regular users to information resources of automated ATS systems, based on the use of hierarchical metrics of semantic proximity, is disclosed. **Conclusion.** The use of a

method based on semantic proximity significantly reduces the processing of a large amount of information, respectively, increasing the performance of automated systems.

Keywords: automated systems, information security systems, access method

For citation: V.A.Wolf , V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.A. Khvostov. To the question of analysis of existing methods of access of regular users to information resources of automated systems of internal affairs bodies. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 24-32. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-24-32

Введение. В настоящее время доступ к информационным ресурсам автоматизированных систем ОВД в соответствии с документацией Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [1-3] осуществляется через подсистему управления доступом системы защиты информации (СЗИ).

В зависимости от класса защищенности определяется количество функционала в этой системе, то есть чем выше класс защищенности, тем больше функционала содержится в подсистеме управления доступом существующих СЗИ.

На основе общепринятых подходов принято считать, что защищённой системой является система, в которой поддерживается определенный уровень конфиденциальности (исключение несанкционированного доступа к защищаемой информации), целостности (исключение возможности модифицировать защищаемую информацию) и доступности [4, 8].

Постановка задачи. Для более эффективного и безопасного обращения штатных пользователей кафедр, рассмотреных на примере ВИ МВД необходимо:

1. Проанализировать существующие методы доступа к информационным ресурсам АС ОВД;
2. На основе результатов анализа определить основные имеющиеся недостатки у каждого анализируемого метода доступа;
3. Путем сравнения основных недостатков и положительных моментов, с точки зрения применения этих методов, выбрать наилучший по определенному критерию, который необходимо обосновать.

Проведенный анализ открытых источников показал, что первостепенной задачей в области защиты информации (ЗИ) в АС ОВД является именно защита от несанкционированного доступа (НСД) к информационным ресурсам.

Методы исследования. Для формализованного описания требований, предъявляемых к СЗИ, применяются соответствующие модели разграничения доступа.

Основными являются [5]:

1. Модель дискреционного разграничения доступа, примером служит модель Хааррисона Руззо-Ульмана.
2. Модель мандатного разграничения доступа, классическим примером является модель Белла-Лападула.
3. Ролевая модель разграничения доступа, включающая в себя признаки, как мандатной, так и дискреционной модели.

В основе любой модели разграничения доступа лежат такие понятия, как объект доступа и субъект доступа. В качестве объекта может выступать документ, файл, архив и др.; субъектом, как правило, являются пользователи системы.

Дискреционная модель разграничения доступа. Сущность дискреционного метода разграничения доступа заключается в проверке прав доступа субъекта к объекту, в момент открытия субъектом этого объекта.

Матрица доступа является основой дискреционного метода. Строки матрицы соответствуют субъектам ($S_{1\ldots4}$), а столбцы матрицы – объектам ($O_{1\ldots4}$). То есть, права доступа субъекта к объекту определяются элементами матрицы (рис. 1).

Главным недостатком матрицы доступа является ее большая размерность, которая влияет на время вычисления уровней доступа. То есть, чем больше записей в матрице, тем больше нужна производительность компьютерной системы.

Более того, все взаимосвязи и ограничения необходимо учитывать вручную, что порядком усложняет администрирование. Права доступа субъекта к объекту являются статичными, то есть независимо от изменения состояния компьютерной системы, права доступа субъекта останутся неизмененными, что также принимается как недостаток рассматриваемого метода разграничения доступа.

объект / субъект	O_1	O_2	O_3	O_4
S_1	read			
S_2				print
S_3		read	execute	
S_4	read write		read write	

Рис. 1. Матрица доступа
Fig. 1. Access Matrix

В методе дискреционного разграничения доступа не осуществляется проверка безопасности выполнения действий субъекта (разрешение доступа субъекта S к объекту O), что не позволяет обеспечивать защиту от утечки конфиденциальной информации. Другими словами, если субъект S_1, являясь владельцем базой данных, наделяет правом чтения субъекта S_2, то фактически субъект S_2 становится владельцем всей защищаемой информацией.

Модель мандатного разграничения доступа. Классическая модель Белла–Лападулы впервые была использована в 70-х годах прошлого века и по настоящее время является основной моделью многоуровневого разграничения доступа, применяемой в большинстве СЗИ, в том числе и на объектах информатизации ОВД [7-9].

Структурно-функциональная модель мандатного разграничения доступа представлена на рис. 2.

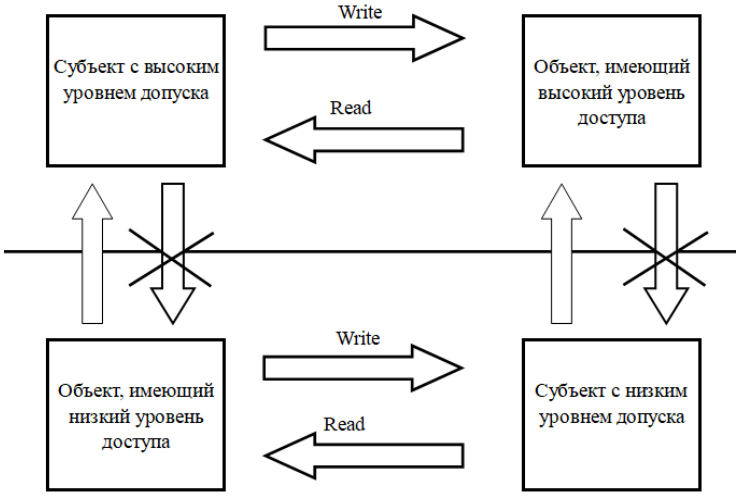


Рис. 2. Структурно-функциональная модель мандатного разграничения доступа
Fig. 2. Structural and functional model of mandatory access control

Основной задачей подсистемы управления доступом пользователей в СЗИ на объектах информатизации ОВД, построенной по мандатному принципу разграничения доступа, является обеспечение конфиденциальности.

Сохранение целостности является не менее важной задачей в обеспечении безопасности информации, однако в рассматриваемой модели вопрос обеспечения целостности защищаемых информационных ресурсов не является приоритетным, и реализуется только как второстепенный признак защиты информации ограниченного доступа [4]. Более того, не исключением является возможность возникновения диссонанса.

Обеспечение безопасности информационных потоков является одной из первостепенных проблем реализации мандатной модели разграничения доступом. Причиной чему является сложность самого процесса выявления запрещенных информационных потоков по памяти, а тем более, по времени.

Частым случаем появления таких потоков является тот факт, что при администрировании СЗИ, построенной на основе мандатной политики безопасности акцент делается на ограничении доступа субъекта с низким уровнем допуска к объекту с высоким уровнем доступа. В то время как малое значение уделяется не менее важной проблеме, связанной с возникновением запрещенных информационных потоков от объектов с большим уровнем конфиденциальности к объектам с меньшим уровнем конфиденциальности.

Решение задач, требуемых коллективного принятия решения в режиме реального времени, подразумевают наличие доступа субъектов, имеющих различные уровни секретности к одним и тем же задачам и функциям системы. Однако, модель на такую сложившуюся ситуацию, не реагирует [7].

К тому же, субъекты заданного уровня секретности одновременно как по времени, так и по задачам и функциям, выполняющимся в реальном масштабе времени, имеют доступ к системе без ограничения, а это является нарушением основных принципов безопасности [8].

Не без внимания остается вопрос изменения классификации сведений, относящихся к какому-либо уровню секретности. Применение мандатной модели разграничения доступа предполагает, что данные, отнесенные к одному из уровней секретности, остаются неизменными, что на практике не является действительным.

Таким образом, применение мандатной модели разграничение доступом более целесообразно для рассматриваемых статическим систем, а для моделей в динамике данный способ требует доработки.

По правилам мандатного разграничения доступа пользователи системы имеет полномочия на чтение тех документов, уровень доступа которых не превышает их уровень допуска, и также, не имеют возможности создавать документы ниже своего уровня допуска [8]. Таким образом, пользователь сталкивается с ситуацией, когда запрещается право чтения документа, который он сам создал, то есть осуществляется санкционированная работа с данными, просмотр которых заращен системой.

Ролевая модель разграничения доступа. Совместила в себе признаки мандатного и дискреционного разграничения доступа, однако ни к одному из них данную модель отнести нельзя. Помимо классических понятий «объект» и «субъект» доступа, появляется такое понятие как «роль».

По своей сути «роль» выступает как набор полномочий, которыми наделен пользователь, в зависимости от выполняемых должностных (обязанностей) задач. Полномочия содержат права осуществлять функционально-логические процедуры над всей совокупностью объектов системы или над определенной их группой.

Основой разграничения доступа является усовершенствованная матрица, задача которой заключается в назначении прав доступа для ролей. В добавлении к этому имеются заранее определенные правила, на основе которых осуществляется назначение роли для каждого пользователя и активирование этих ролей во время начала работы.

Структурно-функциональная модель дискреционного разграничения доступа представлена на рис. 3.

На практике, нередко возникают случаи, в частности в системе ОВД, когда пользователи занимают одну (одинаковую) должность, но при этом каждый из них имеет отличные друг от друга, уникальные права. Подобная ситуация значительно усложняет построение и администрирование ролевой модели разграничения доступа.

Также модели имеют избыточность прав на доступ, и дублирование в предоставлении прав доступа пользователей к объектам. При этом, проектирование защищенной системы с множеством рабочих групп достаточно трудозатратно, и требует применения дополнительных теоретико-графовых алгоритмов и пространственно-векторных моделей [10].

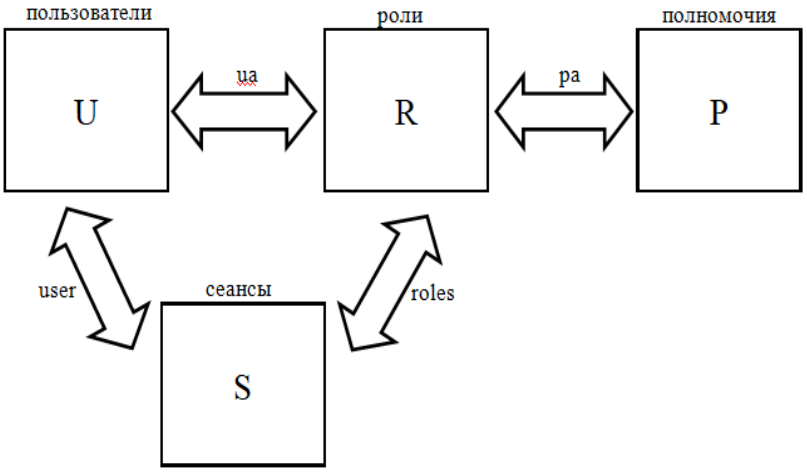


Рис. 3. Структурно-функциональная модель дискреционного разграничения доступа
Fig. 3. Structural and functional model of discretionary access control

Обсуждение результатов. Рассмотренные модели является основополагающими для построения СЗИ, однако нельзя не отметить тот факт, что создание таких моделей и их проработка в СЗИ началась в 1970г., и применяются по настоящее время практически в неизменном виде.

Учитывая динамику развития способов нарушения безопасности информации, возникновения новых угроз НСД к информации. Все это способствует созданию новых критериев разграничения доступа, позволяющих усовершенствовать существующие модели управления доступом, повысить степени защищенности информации, циркулирующей в АС ОВД.

Одним из перспективных аспектов совершенствования существующих методов доступа, учитывая недостатки рассмотренных методов, является метод, основанный на использовании иерархических метрик семантической близости, сущность которого раскрыт в [9].

Такой метод доступа впервые был рассмотрен и в медицинских системах [10] и образовательных системах [9]. В то же время вопросы, связанные с адаптацией данного метода в АС ОВД требуют дальнейшей проработки. Связано с тем, что при доступе в АС ОВД штатные пользователи этих систем осуществляют работу с многоуровневым иерархическим информационным ресурсом, который можно представить в виде модели, (математической модели, вербальной и др.).

Анализ информационного ресурса АС ОВД показал, что структуру этого ресурса и взаимодействующих с ним штатных сотрудников АС ОВД можно формализовать в виде графовой модели (рис. 4) [6].

$$H = (S, E), \quad (1)$$

где

$S = \{s_1, s_2 \ldots s_{12,20}\}$ – элементы (субъекты) информационного ресурса;

$E = \{e_1, e_2, \ldots e_l\}$ – связи между элементами или подмножествами элементов информационного ресурса.

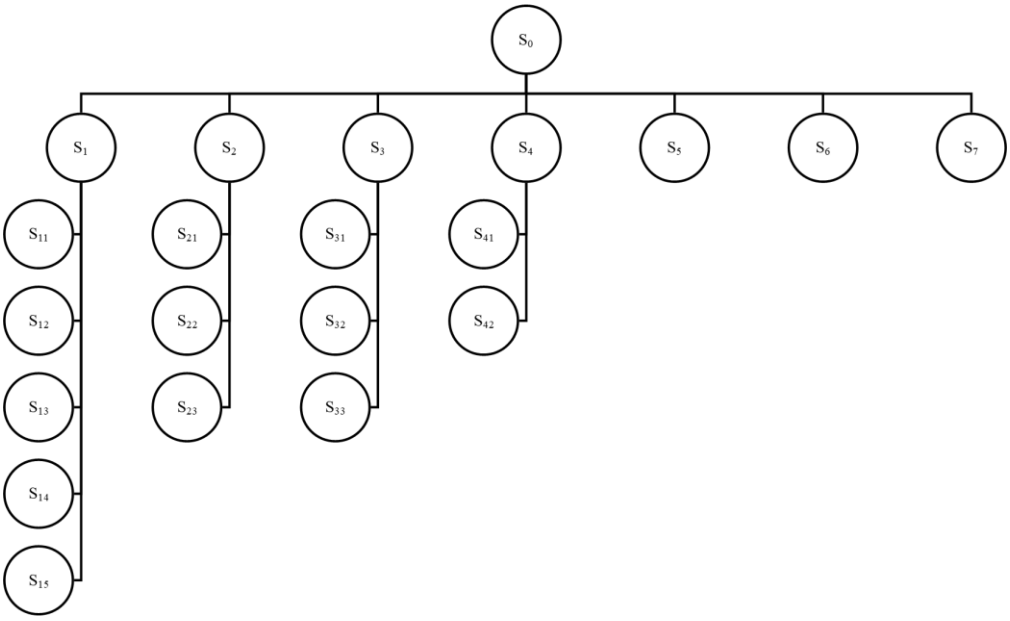


Рис. 4. Графовая модель структуры информационного ресурса института
Fig. 4. Graph model of the structure of the information resource of the Institute

В табл. 1 представлено описание элементов s_i.

Таблица 1. Перечень вершин графа
Table 1. List of graph vertices

S_0	Начальник подразделения (начальник института); Head of the department (head of the institute);
S_1	Заместитель начальника по учебной работе; Deputy Head for Academic Affairs
S_2	заместитель начальника института по научной работе; Deputy Head of the Institute for Research
S_3	Заместитель начальника по работе с личным составом; Deputy Chief of Human Resources
S_4	Заместитель начальника по организации службы; Deputy Head of Service Organization
S_5	Тыл; rear
S_6	Финансово-экономический отдел; Financial and economic department
S_7	Отдел делопроизводства и режима; Office work and regime department
S_{11}	Учебный отдел; Training Division
S_{12}	Кафедры; Departments
S_{13}	Факультеты; Faculties
S_{14}	Библиотека (общая); Library (shared)
S_{15}	Специальная библиотека; Special library
S_{21}	Научно-исследовательский отдел; Research department
S_{22}	Редакционно-издательский отдел; Editorial and publishing department
S_{23}	Адъюнктура; Postgraduate education
S_{31}	Отдел морально-психологической подготовки; Department of moral and psychological preparation
S_{32}	Отдел кадров; Human Resources Department
S_{33}	Инспекция по личному составу; Personnel inspection
S_{41}	Комендантское отделение; Commandant's office

Ресурсы Воронежского института МВД России проклассифицированы по видам деятельности сотрудником. Особое внимание уделяется тому, что в информационной системе органов внутренних дел циркулирует не только информация, отличающаяся по сфере деятельности, но и по уровням конфиденциальности.

Заменим позицию S, выступающую как субъект информационной системы, на значение t – рубрика. Таким образом, корневой граф, представленный на рис. 5, (табл. 2) можно озаглавить как иерархический тематический классификатор информационных объектов воронежского института МВД России.

При организации доступа к информационным ресурсам (библиотекам, документам, архивам) применяется тематический классификатор, который представляет собой совокупность тематических рубрик и отражает логическую архитектуру всех информационных ресурсов.

При наделении правами доступа пользователей системы устанавливается частичный порядок на сформированном классификаторе, представленным в виде корневого дерева [10]. Тематическая классификация на основе отображения множества рубрик ($T=t_1, t_2,\ldots t_m$) на множестве объектов и субъектов определяется на корневом дереве иерархического рубрикатора.

Функция тематического окрашивания f_m, работа которой заключается в том, чтобы в каждый момент времени для любого субъекта и объекта определить соответствующую рубрику:

$$f_M[x] = t^M \text{ , где } x \in S \cup O, t_i^M \in T^M .$$

Реализация тематико-иерархического разграничения доступа заключается в переходе из состояния в момент времени t_k в момент времени t_{k+1}.

В свою очередь, такие переходы приводят к новым отношениям доступа между уже существующими сущностями (создают новые или удаляют субъекты и объекты).

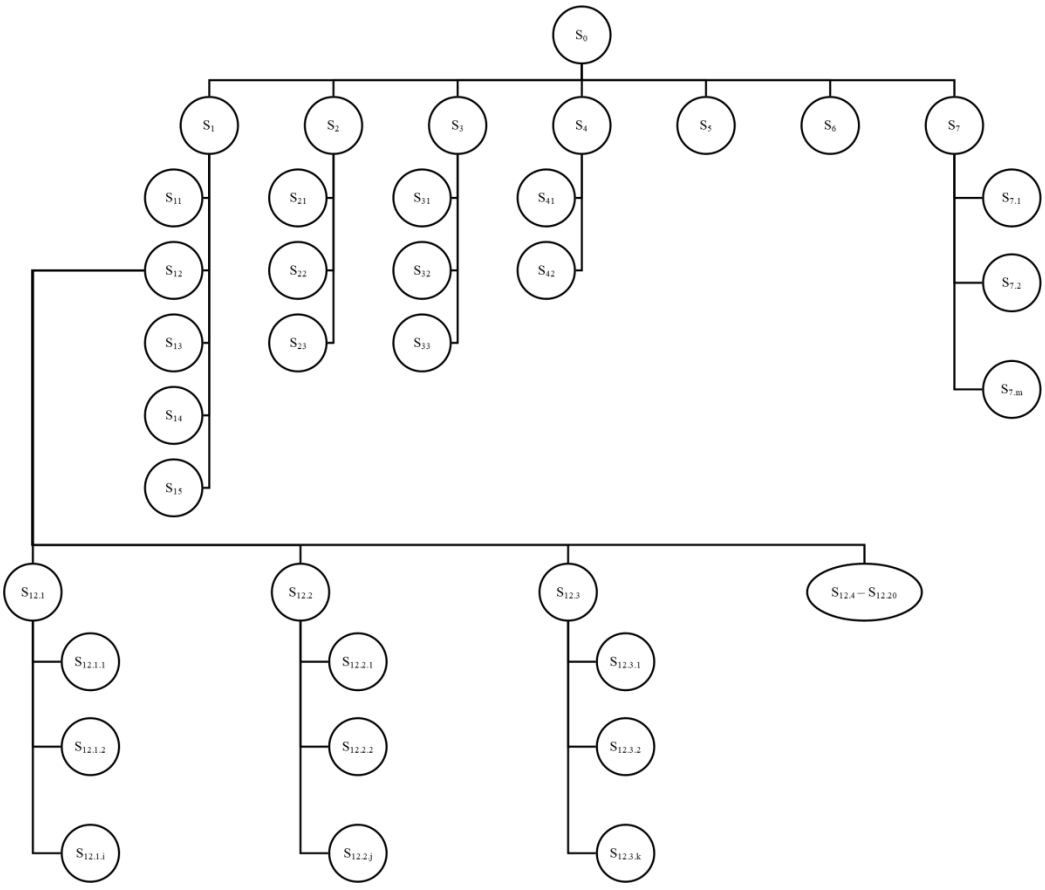


Рис. 5. Иерархический тематический классификатор
Fig. 5. Hierarchical Topic Classifier

Таблица 2. Перечень вершин графа
Table 2. List of graph vertices

S_{71}-S_{7m}	Сотрудники отдела делопроизводства и режима; Office work and regime department employees
$S_{12.1}$	Кафедра информационной безопасности; Department of Information Security
$S_{12.1.1}$- $S_{12.1.i}$	Сотрудники кафедры информационной безопасности; Employees of the Department of Information Security
$S_{12.2}$	Кафедра компьютерной безопасности; Department of Computer Security
$S_{12.2.1}$- $S_{12.2.j}$	Сотрудники кафедры компьютерной безопасности; Employees of the Department of Computer Security
$S_{12.3}$	Кафедра оперативно-разыскной деятельности; Department of operational-search activity
$S_{12.3.1}$- $S_{12.3.k}$	Сотрудники кафедры оперативно-разыскной деятельности; Employees of the department of operational-investigative activities
$S_{12.4.}$- $S_{12.20}$	Кафедры института; Departments of the institute

При таком управлении доступом реализуется принятие решения о правомочности доступа субъекта S к объекту O, обеспечивающее транзитивность потоков при реализации требуемого подмножества безопасных по определенному критерию информационных потоков. Применение такого метода значительно сокращает обработку большого количества информации, соответственно, повышается производительность АС.

Вывод. Таким образом, в статье проведен анализ открытых литературных источников и специальной литературы ФСТЭК России, посвященных вопросам защиты информации в АС ОВД. Анализ показал, что в существующих СЗИ используемых в системах критического применения к которым, несомненно, относятся и ОВД, в соответствии с приказами и директивами ФСТЭК используются дискреционный и мандатный методы доступа.

В то же время, эти методы были разработаны в 70-х годах прошлого столетия и требуют, в соответствии с существующими реалиями, к которым можно отнести случаи, когда в качестве штатного пользователя может выступать человек с экстремистскими убеждениями, действия которого могут привести к нежелательным последствиям жизни российского общества.

Существующие методы, в соответствии с их достоинствами и недостатками, на таких типов пользователей не реагируют. Поэтому, предлагаемый новый метод, основанный на семантической близости [9], поможет устранить такие недостатки. Сущность такого метода, применимая к объектам информатизации ОВД, будет рассмотрена в дальнейших исследованиях.

Библиографический список:

1. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Электронный ресурс]. — URL: https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkomissii-rossii-ot-30-marta-1992-g (дата обращения 20.06.2022).
2. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. — URL:http://fstec.ru/component/attachment s/ 299 (дата обращения: 26.06.2022).
3. Гостехкомиссия РФ. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. М.: Воениздат, 1992. – 29 с.
4. Анализ угроз безопасности информации при обработке персональных данных в мобильной медицине / В.П. Гулов, В.А. Хвостов, А.В. Скрыпников, В.П. Косолапов, Г.В. Сыч // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. – Т.19, №2. – С. 129-138.
5. Зегжда Петр Дмитриевич. Основы информационной безопасности: учебное пособие / П. Д. Зегжда, Е. А. Рудина; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. - 224 с.
6. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. - М.: Мир, 1978. - 432 с.
7. Лепешкин, О. М. Мандатная модель разграничения доступа на основе среды радикалов / О. М. Лепешкин, Р. С. Гаппоев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 12(125). – С. 70-77.
8. Медведев, Н. В. Модели управления доступом в распределенных информационных системах / Н. В. Медведев, Г. А. Гришин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 1. – С. 1.

9. Модели управления доступом пользователя информационной системы с использованием иерархических метрик семантической близости / Е. А. Рогозин, А. А. Хвостов, А. В. Калач [и др.] // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2021. – № 4. – С. 110-120.
10. Модель индивидуально группового назначения доступа к иерархически организованным объектам медицинских информационных систем с использованием мобильных технологий / В. П. Гулов, В. А. Хвостов, В. П. Косолапов, Г. В. Сыч // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2021. – Т. 20. – № 1. – С. 135-146..

References:

1. FSTEC RF. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for the protection of information [Electronic resource].URL:https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkomissii-rossii-ot-30-marta-1992-g (accessed 20.06.2022). (In Russ)
2. FSTEC RF. Guidance document. The concept of protection of computer equipment and automated systems from unauthorized access to information [Electronic resource]. URL: http://fstec.ru/component/attachment s/ 299 (date of access: 06/26/2022). (In Russ)
3. State Technical Commission of the Russian Federation. Guidance document. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security from unauthorized access to information. M.: [Voyenizdat] *Military Publishing House*, 1992: 29. (In Russ)
4. Analysis of threats to information security in the processing of personal data in mobile medicine. V.P. Gulov, V.A. Khvostov, A.V. Skrypnikov, V.P. Kosolapov, G.V. Sych. [Sistemnyy analiz i uprav-leniye v biomeditsinskikh sistemakh.]*System analysis and management in biomedical systems.* 2020; 19(2): 129-138. (In Russ)
5. Zegzhda Petr Dmitrievich. Fundamentals of information security: textbook. P. D. Zegzh-da, E. A. Rudina; St. Petersburg State Polytechnic University. St. Petersburg: [Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta.] *Publishing house of Politekhn. University.* 2008: 224. (In Russ)
6. Christofides N. Graph Theory. [Algoritmicheskiy podkhod] *Algorithmic approach*. M.: Mir, 1978: 432. (In Russ)
7. Lepeshkin, O. M., Gappoev R. S. Mandatory model of access control based on the environment of radicals [Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki] *Izvestiya SFedU. Technical Science*. 2011; 125 (12): 70-77. (In Russ)
8. Medvedev, N. V. Models of access control in distributed information system. N. V. Medvedev, G. A. Grishin. [Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana] *Science and education: scientific edition of MSTU im. N.E. Bauman*. 2011; 1: 1. (In Russ)
9. Rogozin E. A., Khvostov A. A., Kalach A. V. [et al.] Models of information system user access control using hierarchical semantic proximity metrics. [Vestnik Vo-ronezhskogo instituta FSIN Rossii] *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2021; 4:110-120. (In Russ)
10. Gulov V. P., Khvostov V. A., Kosolapov V. P., Sych G. V. Model of individually group assignment of access to hierarchically organized objects of medical information systems using mobile technologies. [Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh] *System Analysis and Management in biomedical systems*. 2021; 20(1):135-146. (In Russ)

Сведения об авторах:

Вольф Владимир Андреевич, адъюнкт; volf.vladimir2010@yandex.ru

Наседкина Валерия Сергеевна, адъюнкт; valeriya.sn@mail.ru

Попов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; anton.holmes@mail.ru

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

Хвостов Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности; hvahva1@mail.ru

Information about authors:

Vladimir A.Volf, adjunct; volf.vladimir2010@yandex.ru

Valeria S. Nasedkina, adjunct; valeriya.sn@mail.ru

Anton D. Popov, Cand.Sci. (Eng.), Lecturer, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; anton.holmes@mail.ru

Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; evgenirogozin@yandex.ru

Victor A. Khvostov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Information Security; hvahva1@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.05.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 18.06.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 18.06.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05653
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-33-45 Оригинальная статья /Original Paper

Алгоритм применения кроссплатформенного мобильного приложения для защиты информации в облачном хранилище

А.Р. Газизов
Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Качественное «облачное хранилище» данных должно обеспечивать конфиденциальность, целостность и доступность информации в «хранилище». Использование «облачных хранилищ» для хранения информации в резервных копиях сопряжено с их возможной утратой. Обеспечение конфиденциальности информации в «облачном хранилище» предполагает, что, «выгружая» данные в «облачное хранилище», пользователь должен быть уверен, что злоумышленник не сможет получить информацию из хранилища. Целью исследования является разработка алгоритма применения кроссплатформенного мобильного приложения для защиты информации в «облачном хранилище» ИС. **Метод.** Исследование основано на использовании кроссплатформенного подхода создания приложений. **Результат.** Проведен анализ существующих подходов и фреймворков разработки кроссплатформенных мобильных приложений. Предложено создавать приложение на основе фреймворка Xamarin. Для обеспечения конфиденциальности информации предлагается перед выгрузкой данных и резервных копий файлов шифровать их. Шифрование предполагает сокрытие исходного вида файла от неавторизованного использования при помощи крипто-алгоритмов, когда авторизованным пользователем будет являться обладатель ключа шифрования. Для реализации функции шифрования данных и резервных копий файлов, выгружаемых в «облачное хранилище», предлагается к применению симметричный алгоритм блочного шифрования Rijndael, принятый в качестве стандарта шифрования по результатам конкурса Advanced Encryption Standard (США). **Вывод.** Кроссплатформенное мобильное приложение может компилироваться и эффективно работать под управлением операционных систем iOS и Android, выполнять шифрование файлов и выгружать их в «облачное хранилище» с возможностью последующей дешифровки.

Ключевые слова: доступность информации; информационная безопасность; информационная система; конфиденциальность информации; облачное хранилище; облачные технологии; пользователь информации; провайдер облачных услуг; целостность информации; шифрование информации.

Для цитирования: А.Р. Газизов. Алгоритм применения кроссплатформенного мобильного приложения для защиты информации в облачном хранилище. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):33-45. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-33-45

An algorithm for using a cross-platform mobile application to protect information in cloud storage

A.R. Gazizov
Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. A high-quality "cloud storage" of data should ensure the confidentiality, integrity and availability of information in the "storage". The use of "cloud storage" for storing information in backups is associated with their possible loss. Ensuring the confidentiality of information in

the "cloud storage" implies that by "uploading" data to the "cloud storage", the user must be sure that an attacker will not be able to obtain information from the storage. The aim of the study is to develop an algorithm for using a cross-platform mobile application to protect information in the "cloud storage" of IS. **Method.** The study is based on the use of a cross-platform approach to creating applications. **Result.** The analysis of existing approaches and frameworks for the development of cross-platform mobile applications was carried out. It is proposed to create an application based on the Xamarin framework. To ensure the confidentiality of information, it is proposed to encrypt them before uploading data and backup copies of files. Encryption involves hiding the original type of the file from unauthorized use using crypto-algorithms, when the owner of the encryption key is the authorized user. To implement the function of encrypting data and backup copies of files uploaded to the "cloud storage", it is proposed to use the Rijndael symmetric block encryption algorithm, adopted as an encryption standard according to the results of the Advanced Encryption Standard (USA) competition. **Conclusion.** A cross-platform mobile application can be compiled and run efficiently under iOS and Android operating systems, encrypt files and upload them to the "cloud storage" with the possibility of subsequent decryption.

Keywords: information availability; information security; information system; information confidentiality; cloud storage; cloud technologies; information user; cloud service provider; information integrity; information encryption

For citation: A.R. Gazizov. An algorithm for using a cross-platform mobile application to protect information in cloud storage. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 33-45. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-33-45

Введение. На сегодняшний день существует множество различных фреймворков и сред разработки, на которых можно успешно разрабатывать кроссплатформенные мобильные приложения. Однако следует определить, почему именно кроссплатформенный подход представляется наиболее приемлемым [1,4,5].

Противоположностью кроссплатформенному подходу является нативный подход, представляющий разработку приложения под конкретную платформу, используя определенные инструменты. Из преимуществ данного подхода следует выделить увеличенную производительность приложения, меньший размер и прочее. При этом в сравнении с кроссплатформенным подходом выделяются недостатки, связанные со сложностью разработки и совместимостью приложения; по причине того, приложения, написанные под определенную операционную систему, не будут совместимы с другими. Таким образом, разработчикам следует разделять человеческие ресурсы для параллельного создания различных версий приложения под разные операционные системы.

Постановка задачи. Решение проблемы при этом очевидно – использование кроссплатформенного подхода создания приложений, т.к. при его использовании исключается необходимость разработки различных версий приложения, ведь исходный код в итоге компилируется под разные платформы [1,2,3,6].

При этом важным этапом разработки является выбор инструмента разработки, т.к. каждый из них имеет свои особенности; инструменты могут различаться функциональностью, а так же языком программирования, на котором и происходит разработка.

Методы исследования. Алгоритм применения кроссплатформенного мобильного приложения. К основному преимуществу кроссплатформенного подхода следует отнести сокращение периода разработки приложения; что позволит в «больших» проектах сэкономить значительную часть бюджета, а также так же сократить затраты человеко-часов [10,11].

До недавнего времени нативный подход был единственным подходом к разработке приложений из-за того, что применение кроссплатформенного подхода сопровождалось значительным количеством ошибок и трудностей, возникавших в процессе разработки. Однако, ми-

ровые IT-гиганты (Google, Microsoft, Adobe и пр.) начали поддерживать данное направление, что существенно повлияло на развитие и распространение кроссплатформенного подхода, сделав его простым и эффективным методом разработки приложений под различные платформы [7].

На основе статистических данных портала Statista, денежный оборот приложений, созданных с помощью инструментов кроссплатформенной разработки, будет превышать 10 млрд. долларов США [8]. В настоящее время существует множество инструментов, позволяющих выполнять кроссплатформенную разработку мобильных приложений. Рассмотрим наиболее популярные из них (рис. 1) [11].

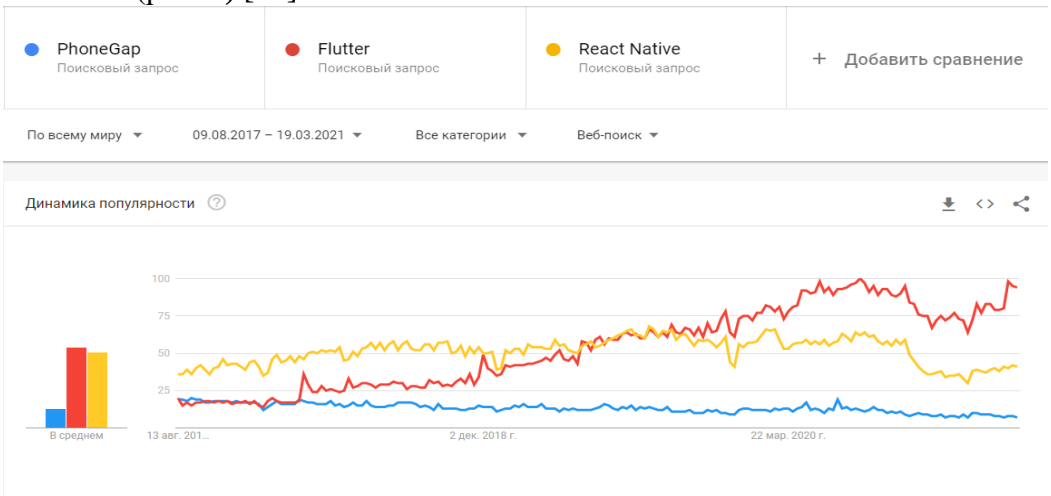


Рис.1. Статистика сайта Google по поисковым запросам PhoneGap, Flutter, React Native
Fig.1. Google site statistics for search queries PhoneGap, Flutter, React Native

PhoneGap (рис. 2). Adobe PhoneGap – это стандартизированная среда разработки с открытым исходным кодом для создания кроссплатформенных мобильных приложений с использованием HTML, CSS и JavaScript для iOS.

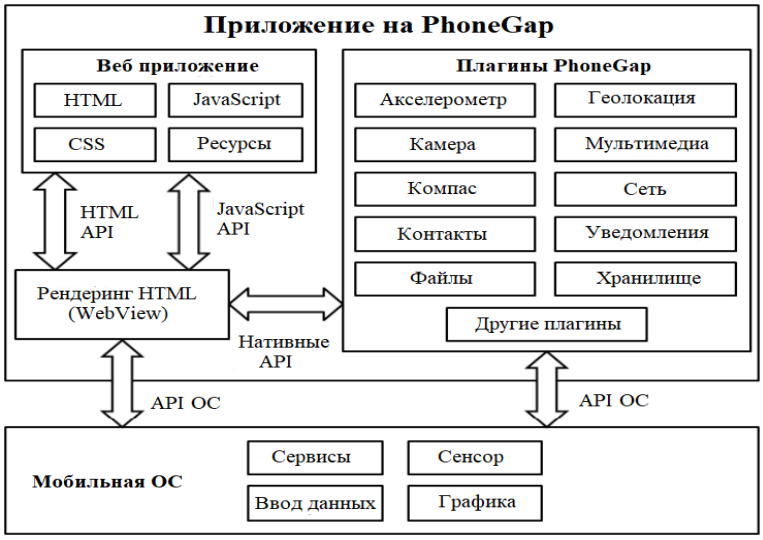


Рис. 2. Структура компонентов Adobe PhoneGap
Fig. 2. The structure of Adobe PhoneGap components

Данная среда разработки не требует специализированного аппаратного обеспечения, компиляторов, а также предполагает низкие системные требования, что делает ее эффективной и доступной.

Особенностью данного инструмента является то, что итогом разработки приложения являются классические HTML страницы, которые впоследствии открываются встроенным в мобильное устройство браузером. Интерактивность и создание пользовательского интерфейса

ложится на плечи JavaScript, который связывает созданные разработчиком функции с элементами DOM и аппаратными частями конечного устройства пользователя.

Adobe PhoneGap является наиболее удобным вариантом, если необходимо создать легкое и быстрое приложение с простым интерфейсом, либо WebView сайта [1-7].

React Native (рис. 3). Также, как и Adobe PhoneGap, React Native представляет собой инструмент с исходным кодом для разработки кроссплатформенных мобильных приложений. Для написания приложения могут использоваться как чистый JavaScript, так и его библиотеки (TypeScript и ReactJS). Знание и применение библиотек значительно упрощает и ускоряет разработку из-за имеющихся в них готовых функций и методов.

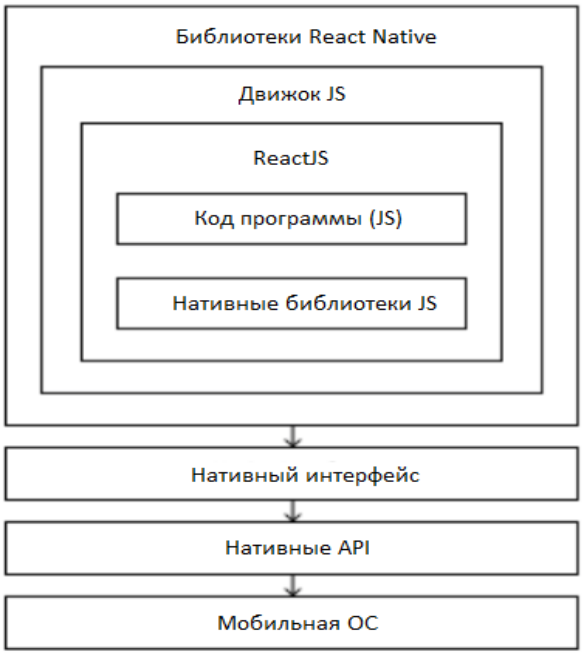


Рис. 3. Структура компонентов React Native
Fig. 3. Structure of React Native Components

React Native разрабатывается Facebook, Inc. и на сегодняшний день применяется для написания различных приложений – от простых (одностраничных) вариантов, до полноценных мобильных платформ разного рода. Из-за того, что готовое приложение открывается встроенным браузером устройства, то сохраняется быстродействие приложение сравнимое с нативным. При этом React Native поддерживает горячую перезагрузку; это означает, что внесенные в код изменения сразу же отобразятся на тестируемом устройстве, либо эмуляторе [1-7].

Flutter (рис. 4). Слоган инструмента кроссплатформенной разработки Flutter – «Красивые приложения в рекордное время». Flutter выпускается и разрабатывается компанией Google и представляет набор инструментов для создания легких и оптимизированных приложений с единой кодовой базой, которая впоследствии компилируется и предстает для конечной платформы в качестве нативного приложения.

Разработка приложения с инструментом Flutter по сравнению со многими другими подобными инструментами не происходит на языке JavaScript и его производных, в чем и заключается его основная особенность. В качестве основного языка разработки выступает Dart, который в процессе компиляции транслируется в двоичный код.

Таким образом, достигается «та самая» нативная производительность. Flutter включает в себя виджеты, которые оптимизируют процесс разработки, делают его более простым и понятным. Данные виджеты позволяют удобно выстраивать элементы пользовательского интерфейса, а также создавать различные 2D анимации. Готовые приложения занимают на конечном устройстве небольшое пространство, относительно других подобных инструментов кроссплатформенной разработки. Для отрисовки графики Google разработала собственный «движок»

Skia, написанный на языке C++. Он позволяет обрабатывать графические элементы, компилируя их для конечной системы [1-7].

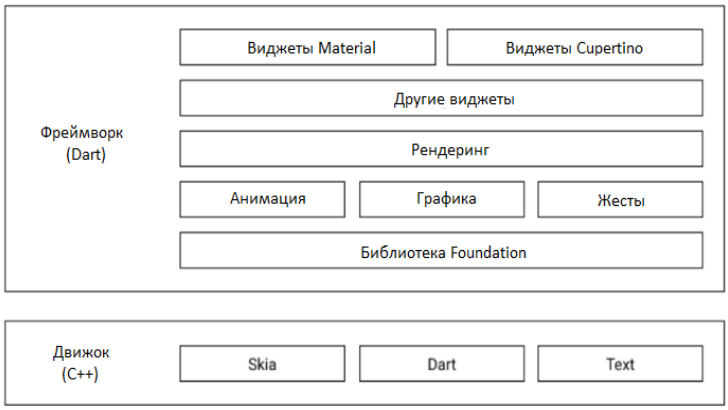


Рис. 4. Архитектура Flutter
Fig. 4. Flutter architecture

Xamarin.Forms (рис. 5). Xamarin Forms является «продукцией» компании Microsoft и распространяется через среду разработки Microsoft Visual Studio. Представляет собой инструмент кроссплатформенной разработки мобильных и дектопных приложений с использованием языка программирования C# и языка разметки XAML.

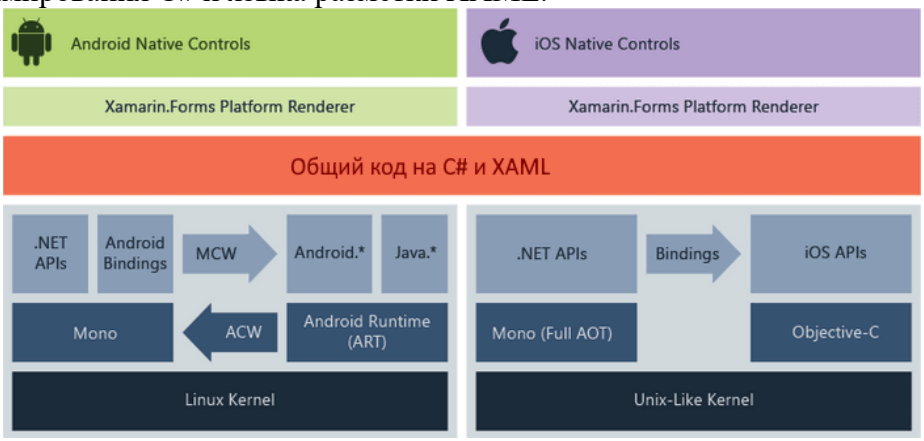


Рис.5. Компоненты инструмента Xamarin.Forms
Fig.5. Xamarin.Forms Tool Components

Использование Xamarin.Forms предполагает создание приложений под платформы iOS, Android, а также UWP, которые включают в себя Windows 10 и 8 (как на архитектуре x86, так и на архитектуре ARM), а также системы семейства Windows Phone 8 версии и старше.

Использование Xamarin является бесплатным и распространяется по лицензии MS Visual Studio. Начиная с пятой версии Xamarin.Forms появилась встроенная библиотека Xamarin.Essentials, которая облегчает доступ к аппаратным и программным компонентам любого поддерживаемого конечного устройства. С помощью этой библиотеки приложение может использовать в своей работе файловую систему устройства, акселерометр, телефон, воспринимать речь, а также управлять блокировкой устройства, если конечно пользователь даст на это права.

Также Xamarin.Essentials включает в себя собственную оболочку для пользовательского интерфейса, что многократно сокращает затраты времени на ее написание. 5 января 2021 года вышла последняя версия данной платформы – Xamarin Forms 5.0 и, собственно, она и будет рассматриваться.

Компиляция языка C# в нативный код для конечного устройства происходит благодаря фреймворку Mono, который является реализацией библиотек .NET Framework с открытым исходным кодом [1-7].

У Xamarin.Forms есть четкая структура, каждый элемент которой отвечает за последующую компиляцию кода:

1) Xamarin.Android – библиотека, реализующая компиляцию исходного кода для платформы Android

2) Xamarin.iOS – библиотека, реализующая компиляцию исходного кода для платформы iOS

3) Xamarin.UWP – библиотека, реализующая компиляцию исходного кода для Windows 10 и 8 (как на архитектуре x86, так и на архитектуре ARM), а также системы Windows Phone.

Эти библиотеки отвечают за обращение к компонентам конечного устройства – через них приложения могут направлять запросы к API устройства, а также к аппаратным компонентам Android или iOS.

При компиляции приложения под Androind код C# при помощи библиотеки Xamarin.Android компилируется в, так называемый, «высокоуровневый ассемблер», который в последствии переходит в нативную сборку системы.

Для запуска приложений в среде ОС Android используется Mono, который не может напрямую обращаться к программным компонентам операционной системы и аппаратной части устройства, однако для осуществления этих операций происходит обращение к пространствам имен Java. Таким образом, запросы от Mono могут транслироваться в нативные вызовы и, тем самым, обращаться к недосягаемым иным путем компонентам.

Приложения на iOS в отличие приложений на Android, который применяет для работы «приложения компиляцию на лету», используют технологию компиляции перед исполнением. Xamarin использует специальные запросы, которые именуются селекторами и регистраторами, которые представляют собой промежуточный слой между приложением на Xamarin и операционной системой на Objective-C.

Xamarin.Forms объединяет Xamarin.Android и Xamarin.iOS, тем самым, организуя общую кодовую базу, которая впоследствии компилируется для необходимой платформы. Таким образом, имеется возможность создавать единый пользовательский интерфейс на языке разметки XAML, к которому привязана некоторая логика на C#. Затем с помощью специфичных для каждой платформы визуальных интерпретаторов интерфейс будет преобразован с учетом его нативной стилизации [1-7].

Основные преимущества использования инструмента Xamarin.Forms:

1) Общий пакет технологий для всех платформ.

Xamarin использует язык C#, XAML и Mono, для разработки приложения под наиболее популярные на сегодняшний день платформы. Из-за единой кодовой базы имеется возможность повторно использовать до 80% исходного кода. Все приложения Xamarin могут создаваться средствами Visual Studio [15].

2) Высокая и около-нативная производительность создаваемых приложений [15].

Кроссплатформенное приложение, разрабатываемое с помощью фреймворка Xamarin, можно классифицировать как нативное. По проводимым тестам приложения, созданные под Xamarin 5 версии, сопоставимы с традиционными приложениями, созданными с помощью Java и Swift для Android и iOS, соответственно. На основе облачных технологий Microsoft Azure имеется возможность создавать производительные эмуляции устройств. Помимо этого, имеется возможность запускать автоматические тесты записывающие ошибки в логи, что дает возможно заблаговременно отловить ошибки и найти проблемы, ограничивающие производительность.

3) Нативный пользовательский интерфейс [15].

Использование Xamarin Shell дает возможность быстро и эффективно создавать красивые и производительные пользовательские интерфейсы, которые будут отображаться с нативной стилизацией на каждой используемой платформе. Однако имеется возможность использо-

вать отдельный рендер интерфейса для каждой платформы, что значительно повышает гибкость процесса написания приложения.

4) Совместимость с оборудованием [15].

Благодаря специальным запросам прослойкам между исходным кодом C# и конечной операционной системой обеспечивается полная совместимость всех компонентов приложения с устройством. Помимо стандартных реализаций Xamarin поддерживает множество дополнительных плагинов, которые распространяются через менеджера пакетов NuGet и корректно встраиваются даже в уже завершенное приложение, тем самым обеспечивая возможность дополнить его функциональность.

5) Технологии с открытым исходным кодом [15].

После приобретения компанией Microsoft, Xamarin стал полностью бесплатным инструментом, который распространяется по лицензии Microsoft Visual Studio, тем самым давая полную свободу разработчикам ПО.

6) Простая поддержка уже готовых решений [15].

Из-за того, что Xamarin имеет единую кодовую базу, то для внесения изменений в приложение необходимо только пересобрать исходное решение для каждой платформы. Однако учитывая, что имеется возможность вносить корректировки для каждой платформы отдельно, то желательно следить за разработкой с помощью системы контроля версий. Таким образом для команд разработчиков всегда будет понятно, для какой платформы и какие конкретно изменения были произведены.

7) Готовый инструментарий для разработки приложений [15].

Так как Xamarin распространяется через Microsoft Visual Studio, то и он является основной средой разработки. Помимо наличия самой IDE и упомянутой ранее облачной эмуляции, и хранения решения, с помощью Microsoft Azure, в инструментарий входят также аналитические инструменты.

8) Инструмент автодополнения, корректировки и отслеживания ошибок [15].

Главным преимуществом использования Microsoft Visual Studio является IntelliSense – инструмент автодополнения, корректировки и отслеживания ошибок до начала процесса компиляции. Он позволяет производить отладку приложения с отслеживанием всех параметров, функций и методов, вызываемых в определённый шаг программы.

Недостатки использования инструмента Xamarin:

1) Задержки обновления дополнительных компонентов [20-22].

Так как зачастую необходимо использовать сторонние плагины, то возникает ситуация, когда версия проекта обновилась на новую версию, а используемые в проекте плагины ее не поддерживают или работают со сбоями. В такой ситуации разработка проекта может замедлиться, вплоть до момента выпуска свежего обновления разработчиками плагина.

2) Ограниченный доступ к библиотекам с исходным кодом [20-22].

При разработке приложений с использованием нативных инструментов появляется возможность использовать все доступные технологии с исходным кодом. В случае с Xamarin остается довольствоваться только предоставляемыми компонентами, а также некоторыми реализациями функций .NET. Однако ничего не мешает написать собственные реализации тех или иных компонентов на C#. Либо в случае необходимости обратится к магазину расширений, которые включают в себя тысячи компонентов для написания логики, элементов пользовательского интерфейса, сниппеты, миксины и валидаторы.

3) Ограниченная функциональность внутренней среды платформы [20-22].

Несмотря на бурный рост Xamarin при поддержки такого гиганта как Microsoft, очевидно, что система не может предложить разработчикам весь спектр той функциональности, что могут предложить нативные инструменты. Также это относится и к общему числу разработчиков. На сегодняшний день может быть затруднительно найти опытного специалиста, имеющего

богатый опыт разработки на Xamarin. По статистическим данным, количество разработчиков на Xamarin составляет не более восьми процентов от общего числа. Однако следует отметить тот факт, что с 2016 года сообщество выросло более чем на 300%, что описывает данный инструмент как особо перспективный, а при поддержке Microsoft он будет активно развиваться в будущем.

4) Больший размер приложений [20-22].

Одной из основных проблем при компиляции приложения может быть то, что даже приложения с небольшой функциональностью могут иметь большой объем в связи с используемыми пакетами Mono, которые служат для работы приложения на конечной системе, а даже самые простые приложения по типу «Привет, мир!» могут иметь объем больше 20 Мб. Таким образом, если имеется такая необходимость, то разработчикам необходимо тратить дополнительные ресурсы для оптимизации приложения.

Обсуждение результатов. Алгоритм шифрования данных. Rijndael – это итерационный блочный симметричный шифр с архитектурой «Квадрат». Шифр имеет различную длину блоков и различные длины ключей. Длина ключа и длина блока могут быть равны: 128, 192 или 256 битам независимо друг от друга. Выявим основные преимущества алгоритма Rijndael [26].

Так как Rijndael блочный шифр, то, как и любому блочному шифру, ему соответствуют следующие принципы:

Рассеивание (diffusion) – т.е. изменение любого знака открытого текста или ключа влияет на большое число знаков шифротекста, что скрывает статистические свойства открытого текста;

Перемешивание (confusion) – использование преобразований, затрудняющих получение статистических зависимостей между шифротекстом и открытым текстом.

Rijndael не подвержен многим видам криптоаналитических атак, таких как дифференциальный и линейный криптоанализ, Square-атака, метод интерполяции и др.

Исследования, проведённые различными сторонами, показали высокое быстродействие Rijndael на различных платформах. Ценным свойством этого шифра является его байт-ориентированная структура, что обещает хорошие перспективы при его реализации в будущих процессорах и специальных схемах [27].

Некоторым недостатком можно считать то, что режим обратного расшифрования отличается от режима зашифрования порядком следования функций, и сами эти функции отличаются своими параметрами от применяемых в режиме зашифрования. Данный факт сказывается на эффективности аппаратной реализации шифра. Однако Rijndael имеет более цельную структуру, за один раунд в нём преобразуются все биты входного блока, в отличие от шифров Фейстеля, где за один раунд изменяется, как правило, лишь половина бит-входного блока. По этой причине Rijndael может позволить себе меньшее число раундов преобразования, что можно рассматривать, как некоторую компенсацию за потери при реализации режима обратного шифрования. Гибкость, заложенная в архитектуре Rijndael, позволяет варьировать не только длину ключа, что используется в стандарте AES, но и размер блока преобразуемых данных, что хотя и не нашло применения в стандарте, автором рассматривается, как вполне нормальное расширение этого шифра.

Таким образом, алгоритм Rijndael является на настоящий момент одним из наиболее надёжных и криптостойких алгоритмов [28].

Программное обеспечение. Для разработки кроссплатформенного мобильного приложения будет использоваться интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio, а конкретно Xamarin – фреймворк для кроссплатформенной разработки мобильных приложений (iOS, Android, Windows Phone) с использованием языка C# [6-8].

Проект на Xamarin.Forms представляет собой набор элементов, которые создаются средой разработки по умолчанию и участвуют в процессе компиляции и обеспечивают кроссплат-

форменность кода. Основой приложения служат страницы разметки с расширением .xaml, которые отвечают за графический интерфейс той или иной страницы приложения, и файлы логики страницы, названия которых соответствуют страницам, за которые они отвечают, но с расширением .cs.

Код файлов логики выполняется на языке программирования C#, в то время как файлы, отвечающие за графический интерфейс, редактируются с использованием расширенного языка разметки XAML.

Основные файлы, отвечающие за работу приложения, представлены в обозревателе решений, который показан на рис. 6 и включают в себя:

1) App.xaml – инициализация приложения.
2) AppShell.xaml – создание навигационного меню.
3) Storage.xaml – страница, связанная с сервисом облачного хранения файлов.
4) Encryption.xaml – страница для проведения операций шифрования/дешифрования данных.

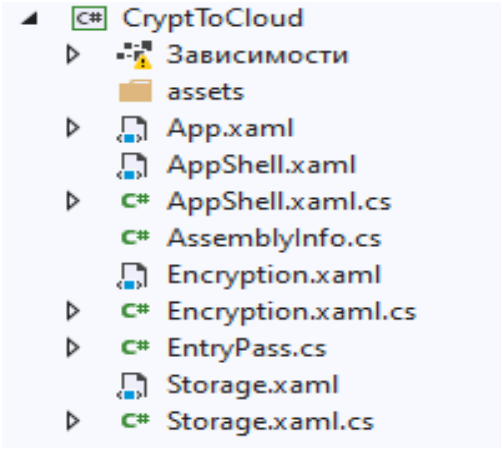


Рис. 6. Обозреватель решений
Fig. 6. Solution Explorer

App.xaml. Все инструкции, заложенные в этот файл, исполняются при запуске приложения, таким образом именно он ответственен за его инициализацию. Файл разметки не содержит кода, а в файле логики содержится единственная команда по инициализации навигационной оболочки AppShell.

AppShell.xaml. Этот файл представляет собой встроенный в среду разработки инициализатор навигационной оболочки. Оболочка Xamarin.Forms упрощает разработку мобильных приложений, предоставляя основные возможности, которые необходимы для большинства мобильных приложений, такие как:

– единое место для описания визуальной структуры приложения;
– единый пользовательский интерфейс навигации;
– схема навигации на основе URI, которая позволяет переходить на любую страницу в приложении;
– обработчик интегрированного поиска.

Кроме того, приложения оболочки получают более высокую скорость отрисовки и снижение потребления памяти [6-8].

Приложения оболочки Xamarin.Forms определяют визуальную иерархию приложения, описанную в классе, подклассом которого является класс Shell. Этот класс может состоять из трех основных объектов иерархии:

1) FlyoutItem или TabBar. Объект FlyoutItem представляет один или несколько элементов всплывающего меню. Он требуется, если шаблон навигации требует использования всплывающего меню. Объект TabBar представляет нижнюю панель вкладок. Он требуется, если

навигация в приложении начинается с нижней панели вкладок (когда всплывающее меню не требуется).

2) Tab представляет сгруппированное содержимое с навигацией по нижним вкладкам.

3) Объект ShellContent, представляющий объекты ContentPage для каждой вкладки.

Эти объекты не представляют собой какие–либо элементы пользовательского интерфейса, они служат лишь для организации визуальной структуры приложения. На основе этих объектов оболочка создает пользовательский интерфейс навигации по содержимому [6-8].

В этом проекте используется элемент Tab и основной контент приложения располагается в двух страницах, переключаться между которыми можно с помощью панели, находящийся в нижней части экрана.

Файл AppShell.xaml содержит в себе стилизацию оболочки в целом (цветовые схемы текста, фона, выделенных и не выделенных элементов):

```
BackgroundColor="#118AB2"
ForegroundColor="Black"
TitleColor="#06D6A0"
DisabledColor="#B4FFFFFF"
UnselectedColor="#95FFFFFF"
Shell.NavBarHasShadow="true"
Shell.TabBarTitleColor="#06D6A0"
```

Также в него входит сама разметка навигации:

```
<TabBar>
<Tab Title="Хранилище"
Icon="storage_icon.png">
<ShellContent>
<app3:Site />
</ShellContent>
</Tab>
<Tab Title="Шифрование"
Icon="crypt_icon.png">
<ShellContent>
<app3:Encryption />
</ShellContent>
</Tab>
</TabBar>
```

Таким образом тег TabBar включает в себя 2 вкладки Tab, содержащие информацию о заголовке и иконке вкладки, а также имя страницы содержимого для привязывания вкладки к ней.

Файл логики страницы содержит в себе только команду для самой инициализации страницы.

Storage.xaml. Данный файл представляет собой страницу доступа к веб–сервису облачного хранилища. Он работает путем открытия в этой вкладке страницы с помощью встроенного в систему (Android или iOS) браузера. Достигается это благодаря имеющимся в библиотеке Xamarin.Forms тегу WebView.

```
<WebView x:Name="webView" Navigating="WebView_OnNavigating"
Source="https://serikov.tk/cloudshot/" VerticalOptions="FillAndExpand" />
```

Encryption.xaml. В данном файле содержится наибольшая доля кода, как с точки зрения графического пользовательского интерфейса, так и с точки зрения программной логики. Страница включает в себя функциональность шифрования и дешифрования данных.

Графический интерфейс представляет собой поле для ввода ключа шифрования, а также кнопки для шифрования и дешифрования выбранных данных.

Поле ввода является специально стилизованным и прописывается отдельно для каждой используемой платформы через класс EntryPassRenderer, который наследуется от базового EntryRenderer, позже он вызывается в основной интерфейс. Также для этого поля назначен обработчик события (TextChanged), который обновляет переменную, хранящую в себе текст, введенный в поле.

```
<local:EntryPass x:Name="PasswordEntry" TextChanged="PassChanged"
Placeholder="Введите ключ шифрования" HorizontalOptions="Center" WidthRequest="350" Hori-
zontalTextAlignment="Center" PlaceholderColor="#073B4C" IsPassword="True"
></local:EntryPass>
```

Кнопки реализуются с помощью тега Button, в свойствах которых указываются стилевые особенности, имя элемента (x:Name), а также имя обработчика событий (Clicked) при нажатии пользователем этой кнопки.

Стилевые особенности для элемента типа Button были установлены глобально для всех элементов такого типа на странице посредством тега ResourceDictionary и включенного в него тега Style.

```
<ResourceDictionary>
<Style x:Key="buttonStyle" TargetType="Button">
<Setter Property="TextColor" Value="#06D6A0" />
<Setter Property="BackgroundColor" Value="#073B4C" />
<Setter Property="FontSize" Value="Large" />
<Setter Property="CornerRadius" Value="30"></Setter>
<Setter Property="WidthRequest" Value="150"></Setter>
<Setter Property="FontAttributes" Value="Bold"></Setter>
</Style>
</ResourceDictionary>
```

Файл логики страницы Encryption.xaml.cs включает в себя обработчики событий при взаимодействии с графическим интерфейсом, метод шифрования данных, а также переменные, необходимые для корректного функционирования кода.

При нажатии на кнопку (Шифрование/Дешифрование) происходит выбор файла, с которым будут проводится операции. Выбор файла осуществляется посредством встроенного в используемой системе инструмента и происходит с помощью дополнительно подключаемой кроссплатформенной библиотеки Plugin.FilePicker.

При выборе файла, полный путь к файлу передается в переменную, и после вызывается метод Encrypt/Decrypt. Методы Encrypt/Decrypt представляют собой реализацию алгоритма Rijndael с помощью стандартных криптосервисов .NET Core.

.NET Core включает набор криптографических сервисов, расширяющих аналогичные сервисы Windows и других поддерживаемых платформ через CryptoAPI. Пространство имен System.Security.Cryptography открывает программный доступ к самым разнообразным криптографическим сервисам, с помощью которых приложения могут шифровать и дешифровать данные, обеспечивать их целостность, а также обрабатывать цифровые подписи и сертификаты [6-8].

Вывод. В ходе работы был представлен алгоритм применения кроссплатформенного мобильного приложения для защиты информации в «облачном хранилище» ИС, а также обосновано его применение для хранения резервных копий данных. С учетом распространения смартфонов предлагается их использование в качестве терминальных устройств для выгрузки резервных копий файлов в «облачное хранилище» с применением кроссплатформенного мобильного приложения, которое бы могло компилироваться и эффективно работать под управ-

лением операционных систем iOS и Android, выполнять шифрование файлов и выгружать их в «облачное хранилище» с возможностью последующей дешифровки. Проведен анализ существующих подходов и фреймворков разработки кроссплатформенных мобильных приложений и было принято решение создавать приложение на основе фреймворка Xamarin [14-16].

Предлагаемое приложение связано с виртуальным выделенным сервером, которое выступает в роли «облачного хранилища». Поддерживается предварительное шифрование и последующие дешифрование по стандарту AES (алгоритм шифрования Rijndael) [23].

Библиографический список:

1. Aws.Amazon. Что такое облачное хранилище файлов? [Электронный ресурс]. URL: https://aws.amazon.com/ru/what-is-cloud-file-storage/ (дата обращения: 25.06.2022).
2. Blesson Varghese, Rajkumar Buyya Next Generation Cloud Computing: New Trends and Research Directions, Future Generation Computer Systems, 2017.
3. EMC Corporation. Резервное копирование и архивирование: Учебное пособие. 2012. – 56 с.
4. Flutter. официальный сайт разработчиков Flutter. [Электронный ресурс]. URL: https://flutter.dev/ (дата обращения: 25.06.2022).
5. iXBT. Виртуализация: новый подход к построению IT-инфраструктуры [Электронный ресурс]. URL: https://www.ixbt.com/cm/virtualization.shtml (дата обращения: 25.06.2022).
6. Jiyi WU, Lingdi PING Cloud Storage as the Infrastructure of Cloud Computing, International Conference on Intelligent Computing and Cognitive Informatics, 2010.
7. Metanit.com. Руководство по программированию для Xamarin Forms. [Электронный ресурс]. https://metanit.com/sharp/xamarin/ (дата обращения: 25.06.2022).
8. Microsoft Docs. Выполнение дедупликации данных [Электронный ресурс]. URL: https://docs.microsoft.com/ru-ru/windows-server/storage/data-deduplication/run (дата обращения: 25.06.2022).
9. Microsoft Docs. Документация по Xamarin. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.microsoft.com/ru-ru/xamarin/ (дата обращения: 25.06.2022).
10. PhoneGap. официальный сайт разработчиков PhoneGap. [Электронный ресурс]. URL: http://www.build.phonegap.com (дата обращения: 25.06.2022).
11. React Native. официальная страница React Native на сайте GitHub. [Электронный ресурс]. URL: https://facebook.github.io/react-native/ (дата обращения: 25.06.2022).
12. Statista: Доходы от мобильных приложений по всему миру. [Электронный ресурс]. URL: https://www.statista.com/statistics/269025/worldwide-mobile-app-revenue-forecast (дата обращения: 25.06.2022).
13. Алиев А. А., Самедов Р. Б. Алгоритм создания полного резервного копирования в облачных вычислениях // Вестник Бакинского Университета, 2013 - 306 с.
14. Андреевский И. Л. Технологии облачных вычислений: Учебное пособие. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2018. – 80 с.
15. В. В. Бастрикина Обзор фреймворка Xamarin // Моделирование и анализ информационных систем – Красноярск. : Изд-во Сибирский государственный университет науки и технологий, 2015 – 579 с.
16. В.Г. Казаков, С.А. Федосин Технологии и алгоритмы резервного копирования. – М. : Изд-во МГУ, 2016 – 40 с.
17. Гребнев Е. Облачные сервисы: взгляд из России, Издательство: Cnews, 2011, с. 282.
18. Клементьев И. П. Устинов В. А. Введение в Облачные вычисления, Изд-во : УГУ, 2009 – 223 с.
19. Ковалева О.В. Облачные хранилища данных, их особенности и модели обслуживания // Информационные технологии. Эволюционные процессы – Королев : Изд-во МГОТУ, 2018. – 130 с.
20. Леонов В. GoogleDocs, WindowsLive и другие облачные технологии, Изд-во: Эксмо-Пресс, 2012 – 304 с.
21. Резервное копирование (Backup) // Администрирование серверов и техническая поддержка сайтов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://itfb.com.ua/backup/ (дата обращения: 25.06.2022).
22. Савин И.В. Инкрементальное резервное копирование. Преимущества и недостатки // Современные инновации – Иваново: Изд-во Олимп, 2018 – 80 с.
23. Свентицкий П. Инструменты кроссплатформенной разработки мобильных приложений // Инновации в науке: сб. ст. по матер. XL междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск. : Изд-во СибАК, 2014 – 402 с.
24. Таранин С. М. Резервное копирование с хранением в базе данных // Моделирование и анализ информационных систем – Ярославль. : Изд-во Ярославский государственный университет, 2016 – 507 с.
25. Хабр. Архитектура хранилищ данных: традиционная и облачная [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/441538/ (дата обращения: 25.06.2022).
26. Хабр. Обзор IT-рынка облачных решений для бизнеса [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/417193/ (дата обращения: 25.06.2022).
27. Хабр. Описание основ криптопреобразования AES [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/497672/ (дата обращения: 25.06.2022).
28. Шарапов Р.В. Аппаратные средства хранения больших объёмов данных // Инженерный вестник Дона. – Р-н-Д. : Изд-во Южный федеральный университет, 2012 – 304 с.

References:

1. Aws.Amazon. What is cloud file storage? [electronic resource]. URL: https://aws.amazon.com/ru/what-is-cloud-file-storage / (accessed: 06/25/2022).

2. Blesson Varghese, Rajkumar Buyya Next Generation Cloud Computing: New Trends and Research Directions, Future Generation Computer Systems, 2017.
3. EMC Corporation. Backup and Archiving: A tutorial. 2012: 56.
4. Flutter. official website of Flutter developers. [electronic resource]. URL: https://flutter.dev / (accessed: 06/25/2022).
5. iXBT. Virtualization: a new approach to building IT infrastructure [Electronic resource]. URL: https://www.ixbt.com/cm/virtualization.shtml (accessed: 06/25/2022).
6. Jiyi WU, Lingdi PING Cloud Storage as the Infrastructure of Cloud Computing, International Conference on Intelligent Computing and Cognitive Informatics, 2010.
7. Metanit.com. Programming Guide for Xamarin Forms. [Electronic resource]. https://metanit.com/sharp/xamarin / (accessed: 06/25/2022).
8. Microsoft Docs. Performing data deduplication [Electronic resource]. URL: https://docs.microsoft.com/ru-ru/windows-server/storage/data-deduplication/run (accessed: 06/25/2022).
9. Microsoft Docs. Xamarin documentation. [Electronic resource]. URL: https://docs.microsoft.com/ru-ru/xamarin / (accessed: 06/25/2022).
10. PhoneGap. the official website of PhoneGap developers. [Electronic resource]. URL: http://www.build.phonegap.com (accessed: 06/25/2022).
11. React Native. The official React Native page on GitHub. [Electronic resource]. URL: https://facebook.github.io/react-native / (accessed: 06/25/2022).
12. Statista: Mobile app revenue worldwide. [Electronic resource]. URL: https://www.statista.com/statistics/269025/worldwide-mobile-app-revenue-forecast (accessed: 06/25/2022).
13. Aliev A. A., Samedov R. B. Algorithm for creating a full backup in cloud computing [Vestnik Bakinskogo Universiteta] *Bulletin of Baku University*, 2013: 306.
14. Andreevsky I. L. Cloud Computing Technologies: A textbook. St. Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State University, 2018: 80. (In Russ)
15. V. V. Bastrikina Overview of the Xamarin framework. [Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem] *Modeling and analysis of information systems.* Krasnoyarsk. : Publishing house of the Siberian State University of Science and Technology, 2015:579. (In Russ)
16. V.G. Kazakov, S.A. Fedosin Technologies and algorithms of backup. M. : Publishing House of Moscow State University, 2016: 40. (In Russ)
17. Grebnev E. Cloud services: a view from Russia, Publishing House: Cnews, 2011: 282. (In Russ)
18. Klementyev I. P. Ustinov V. A. Introduction to Cloud computing, Publishing House : UGU, 2009: 223. (In Russ)
19. Kovaleva O.V. Cloud data warehouses, their features and service models. [Informatsionnyye tekhnologii. Evolyutsionnyye protsessy] *Information technologies. Evolutionary processes/* Korolev : MGOTU Publishing House, 2018:– 130. (In Russ)
20. Leonov V. GoogleDocs, Windows Live and other cloud technologies, Publishing House: Eksmo-Press, 2012: 304. (In Russ)
21. Backup. Server administration and technical support of sites. [Electronic resource]. Access mode: https://itfb.com.ua/backup / (accessed: 06/25/2022).
22. Savin I.V. Incremental backup. Advantages and disadvantages. [Sovremennyye innovatsii*] Modern innovations* – Ivanovo. : Olympus Publishing House, 2018: 80. (In Russ)
23. Sventitsky P. Tools for cross-platform development of mobile applications. Innovations in science: collection of articles on Mater. XL International Scientific and Practical Conference – Novosibirsk. : SibAK Publishing House, 2014: 402. (In Russ)
24. Taranin S. M. Backup with storage in a database [Modelirovaniye i analiz informatsionnykh sistem] *Modeling and analysis of information systems* – Yaroslavl. : Publishing house of Yaroslavl State University, 2016: 507. (In Russ)
25. Habr. Data storage architecture: traditional and cloud [Electronic resource]. URL: https://habr.com/ru/post/441538 / (accessed: 06/25/2022).
26. Habr. Overview of the IT market of cloud solutions for business [Electronic resource]. URL: https://habr.com/ru/post/417193 / (accessed: 06/25/2022).
27. Habr. Description of the basics of AES crypto conversion [Electronic resource]. URL: https://habr.com/ru/post/497672 / (accessed: 06/25/2022).
28. Sharapov R.V. Hardware for storing large amounts of data [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*. – R-n-D. : Publishing House of the Southern Federal University, 2012: 304. (In Russ)

Сведения об авторе:
Газизов Андрей Равильевич, кандидат педагогических наук, доцент, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; gazandre@yandex.ru

Information about author:
Andrey R. Gazizov, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Computing Systems and Information Security; gazandre@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 08.05.2022.
Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.05.2022.
Принята в печать/Accepted for publication 30.05.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-46-55 Оригинальная статья /Original Paper

Информационная безопасность предпринимательских сетей

А.С. Лосев
Институт прикладной математики Дальневосточного отделения РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является повышение информационной безопасности сетей предпринимательского вида, как наиболее подверженных внешним угрозам с целью коммерческого шпионажа. **Метод.** Исследование основано на использовании оригинального математического алгоритма, позволяющего проводить кластеризацию сетей произвольной топологии и строить матрицу частичного порядка. С одной стороны, кластеризация позволяет выявить агентов сети, имеющих одинаковый информационный доступ к сети, с другой стороны, частичный порядок отражает положение отдельно взятого кластера в иерархической структуре всей сети. **Результат.** Данный подход позволяет оценить потенциальную угрозу сети в зависимости от положения агента в сети, подвергшегося атаке. На основе данного подхода разработана методика определения степени открытости предпринимательской сети к воздействию со стороны внешних факторов для каждого агента сети. Она позволяет выделить агентов сети, требующих усиления безопасности по отношению к внешнему воздействию, так как потенциальная атака на них имеет максимально негативные последствия для всего соединения, что подчеркивает практическую значимость результата. **Вывод.** Разработанная методика практически значима и может быть использована для оценки информационной безопасности или целостности сети любой природы, представимой в виде ориентированного графа.

Ключевые слова: информационная безопасность, агент сети, предпринимательские сети, кластеризация, частичный порядок, ориентированный граф, степень открытости сети, методика

Для цитирования: А.С. Лосев. Информационная безопасность предпринимательских сетей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):46-55. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-46-55

Information security of business networks

A.S. Losev
Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
7 Radio Str., Vladivostok 69004, Russia

Abstract. Objectives. The aim of the work is to improve the information security of business-type networks, as the most susceptible to external threats for the purpose of commercial espionage. **Method.** The study is based on the use of an original mathematical algorithm that allows clustering networks of arbitrary topology and constructing a partial order matrix. On the one hand, clustering allows you to identify network agents that have the same information access to the network, on the other hand, partial order reflects the position of a single cluster in the hierarchical structure of the entire network. **Result.** This approach allows assessing the potential threat to the network depending on the position of the agent in the network that has been attacked. On its basis, a methodology has been developed to determine the degree of openness of an entrepreneurial network to the influence of external factors for each agent of the network. It allows you to identify network agents that require increased security in relation to external influences, since a potential attack on them has the most negative consequences for the entire connection, which emphasizes the practical significance of the result. **Conclu-**

sion. The developed technique is practically significant and can be used to assess the information security or integrity of a network of any nature, represented as a directed graph.

Keywords: information security, network agent, business networks, clustering, partial order, directed graph, degree of network openness, methodology

For citation: A.S. Losev. Information security of business networks. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 46-55. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-46-55

Введение. Процесс всемирной глобализации по различным сферам и направлениям деятельности человечества требует новых форм взаимодействия, позволяющих быстро и оперативно принимать управленческие решения, доводить их до исполнения и реализации. Естественным образом в современном информационном обществе практически все формы взаимодействия находятся в плоскости сетевых технологий, в том числе и вновь созываемых компаний, корпораций и т.д.

Появление такого объекта хозяйственно управления, как предпринимательская сеть, имеет достаточно большую историю в мировой экономической практике [1], но именно с появлением сетевых технологий их потенциал увеличился в разы. Начав свой путь с сетевизации различных отраслевых рынков [2] и до появления институционального анализа сетевых объединений хозяйственной природы [3; 4], понимание сетей в экономическом контексте претерпело различные трансформации. Естественным образом, что в зависимости от различных аспектов (функциональное назначение, сфера деятельности, число участников и т.д.) возникает различное понимание феномена предпринимательской сети [1; 5-9]. Данное многообразие в подходах полностью коррелирует с видами и природой рассматриваемых сетей, в частности, от случайных сетей огромных размерностей [10], до статических малой, где появляется возможность изучить каждый элемент сети и его связь [11]. Существующая теория сетей в экономических исследованиях, разделяет сети на группы, в зависимости от физического, экономического или институционального расстояния между участниками сети [3]. В частности, к первой группе относятся исследования в области штандорта промышленных предприятий [12] и развития территориально-промышленных комплексов [13], а ко второй индустриальных районов [14] и промышленных комплексов [15].

Относительно предпринимательских сетей, больший интерес представляют динамические модели, характеризующие сеть в отдельные моменты времени с заданной степенью вероятности [16]. Большинство данных исследований посвящено решению задачи управления сетевых соединений [17; 18], которая практически неразрешима, как только мы говорим об онлайн соединениях произвольного вида, так как в этом случае практически все параметры принимают вероятностный характер.

Достаточно очевидно, что в современных цифровых условиях, особенно последних лет, когда многие производства переведены в дистанционный формат, предпринимательские сети теперь ассоциируются с онлайн структурами, подобно социальным. Наравне с этим необходимо подчеркнуть, что в отличие от социальных онлайн сетей, предпринимательские сети, даже построенные посредством Интернет - связей, формируются на других принципах, а значит и организованы не так хаотично.

В содержательном смысле наиболее близким определением «предпринимательская сеть» представляется, как группа организаций-участников того или иного рынка, объединившихся для эффективного использования ресурсов и специфических преимуществ для совместной реализации предпринимательских проектов [19].

Интеграция предпринимательской сферы в сетевое образование естественным образом порождает новые принципы организации и взаимодействия:

– потребность в реализации принципа заинтересованности всех участников предпринимательской сети;

– рассмотрение интеграционной деятельности организации как новаторской;

– потребность в нового рода координации средств производства, выходящие за рамки одного предпринимательского субъекта;

– рассмотрение возможностей интегрированного поведения в предпринимательской сети по передаче части функций от собственника менеджерам-профессионалам;

– использование вхождения в предпринимательскую сеть для более эффективного регулирования взаимоотношений с внешней средой;

– использование возможностей предпринимательской сети для разделения труда, специализации, кооперации, как производственного процесса, так и управленческих процессов, происходящих в субъектах предпринимательской деятельности [19].

Как результат, в отличие от традиционных холдингов, концернов, трестов, с явно выраженными громоздкими аппаратами управления, зачастую «оторванными» от производственной составляющей, сетевое объединение позволяет оптимизировать имеющийся экономический потенциал и нарастить его за счет новых возможностей и проявления синергетических эффектов сетевой структуры, которые являются предметом самостоятельных исследований [5-7].

В свою очередь это позволяет решить ряд задач, стоящих перед каждым субъектом предпринимательства: снижение производственных затрат; повышение качества управления и эффективности сбыта продукции; снижение рисков; создание новых направлений деятельности; модернизация производственной базы развитие системы сервиса и сбыта.

Наиболее распространёнными сетевыми образованиями считаются кластерные модели, в состав которых входит широкий круг участников. В общем смысле, применительно к предпринимательским сетям, считается что кластер – это объединение субъектов предпринимательской деятельности, функционирующих в пределах четко очерченных территориальных образований [2, 3]. Данное представление продиктовано естественными ограничениями правого поля, действующего на конкретной территории (город, регион, страна), в рамках которого организуется предпринимательская деятельность. Естественным образом, такие кластерные объединения приводят к дополнительным экономическим эффектам по сравнению с рядовыми предпринимательскими сетями за счет сетевых форм организации производительного цикла.

Наравне с этим велик и риск информационного шпионажа или сетевой атаки, которая в случае кластерного образования, может привести не только к нарушению работы административно-управленческого аппарата, но и негативно отразиться на самом производстве, остановка которого зачастую намного опаснее своими последствиями. И, несмотря на различные меры безопасности, формы и методы которых постоянно совершенствуются, необходимо отметить, что в случае сетевых образований они ориентированы на типовые структуры.

В то же время, замещение имущественных связей информационными, отсутствие строгих ограничений на проявление сетевых объединений, позволяют говорить об уникальности каждой отдельной предпринимательской сети. Естественным образом, актуальность приобретают задачи из теории графов, направленные на исследование различных сетевых топологий, решение которых необходимо для определения наиболее оптимальных параметров функционирования сети в целом и образующих элементов в отдельности, в частности ориентированных на устойчивость к агрессивному воздействию со стороны внешних факторов.

Постановка задачи. В настоящей статье вводиться понятие «степени устойчивости» предпринимательской сети к воздействию со стороны внешних факторов и предложена методика её расчёта.

Рассматривается алгоритм поиска агентов потенциально благоприятных с точки зрения внешнего агрессивного влияния и нанесения ущерба. Основная идея состоит в анализе топологии сети с помощью ранее разработанных алгоритмов и определения процента достижимых

вершин из вершины, которая подверглась атаке. В отличие от прямых задач перебора всевозможных путей, предложенный алгоритм отличается быстродействием и позволяет выделить иерархическую структуру сети на основе действующего информационного потока, а не формального представления.

Алгоритм открыт к добавлению новых вершин без необходимости перезапуска с самого начала, обладая тем самым свойством динамичности. Полученный результат, позволяет существенно повысить информационную безопасность и устойчивость предпринимательской сети в целом к потенциальным угрозам.

Введем в рассмотрение предпринимательскую сеть через математическое представление, как ориентированный граф, узлами (вершинами) которого являются агенты, а направленными дугами (ребрами) – наличие связи между ними.

Под связью между агентами с позиции информационной безопасности сети в целом положим наличие прямого доступа, для агента, который устанавливает связь (выходит ребро) ко всей информации располагающейся у агента, принимающего связь (входит ребро).

Рассмотрим в данном сетевом образовании вопрос информационной безопасности, под которой будем понимать защищенность информации и поддерживающей инфраструктуры от преднамеренных воздействий искусственного характера, направленных на нанесение ущерба владельцам информации или поддерживающей структуре. Соответственно информационной атакой на предпринимательскую сеть со стороны внешнего воздействия будем считать любое целенаправленное нарушение информационной безопасности по отношению к любой вершине сети.

Степень устойчивости выделенной вершины (агента) обозначим через *s*, и будем определять её через степень изолированности по отношению ко всей сети, исходя из того, что чем меньше она имеет связей с другими узлами, тем меньше потенциальный ущерб всей сети в результате информационной атаки по отношению к ней. А именно, для каждой вершины *i* ориентированного графа определим степень устойчивости, следующим образом:

$$s_i = 1 - h_i,$$

где h_i – доля вершин от общего числа в графе, в которые можно попасть по путям в графе из вершины *i*.

Из определения достаточно очевидно, что $s \in [0; 1]$, при этом если из выделенной вершины можно попасть в любую другую вершину графа, то $s=0$, если из нее нет путей ни в какую другую вершину графа, т.е. в нее только входят ребра, то $s=1$.

Положим, что две вершины в ориентированном графе эквивалентны, если существует цикл, содержащий эти вершины, где цикл – это замкнутый путь, состоящий из последовательности вершин, соединённых ребрами, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же вершине. Данное бинарное отношение является отношением эквивалентности на множестве всех вершин графа, т.к. обладает свойствами рефлективности, симметричности и транзитивности.

Введем понятие сетевого кластера, отличное от выше рассмотренного и основанного на функциональном разбиении сети на подсети. А именно, кластером назовем множество вершин, относящихся к одному классу эквивалентности. Соответственно, множество кластеров – есть множество классов эквивалентности.

Методы исследования. Введем на множестве классов эквивалентности вершин графа бинарное отношение: $p \prec q$, если в исходном графе существует путь из любой вершины класса p в любую вершину класса q.

Очевидно, что это бинарное отношение рефлексивно, транзитивно и антисимметрично и потому является отношением частичного порядка. Сопоставим частичному порядку "$\prec$" на множестве кластеров матрицу, в которой в клетке (p,q) стоит единица, если $p \prec q$, иначе в

этой клетке стоит ноль.

В работе [20] разработан алгоритм построения кластеров и матрицы частичного порядка.

Шаг 1. Имеется вершина 1, она первая и единственная, поэтому образует кластер 1, который добавляется во множество кластеров K={1}.

Шаг 2. Вводится матрица $a = \| a(p,q) \|_{p,q \in K}$, характеризующая отношение частичного порядка "$\prec$":

$a(p,q) = 1$, если $p \prec q$, иначе $a(p,q) = 0$, для которой верно, что $a(1,1) = 1$.

Шаг 3. Каждая последующая вершина $(n+1)$ из которой выходит не более m ребер, попадающих в множество кластеров P и в которую $(n+1)$ входит не более m ребер из кластеров, содержащихся в множестве Q, образует новый кластер в I_{n+1}, и инициирует переобозначения следующих множеств:

$$A_1 = K' \setminus A,\ A_2 = R' \setminus A,\ B = I_n \setminus (A \cup A_1 \cup A_2),$$

где

$$K' = \bigcup_{p \in P} K_p,\ R' = \bigcup_{q \in Q} R_q,\ A = K' \bigcap R',$$

$$K_p = \{k \in I_n : p \prec k\},\ p \in P,\ R_q = \{k \in I_n : k \prec q\},\ q \in Q.$$

Матрицы a перерасчитывается на обновленном множестве кластеров K по следующему правилу:

$$a(n+1, n+1) = 1,\ a(n+1, A_1) = E,\ a(A_2, n+1) = E,\ a(A_2, A_1) = E,$$
$$a(A_1, n+1) = O,\ a(A_1, B) = O,\ a(A_1, A_2) = O,\ a(n+1, A_2) = O,$$
$$a(n+1, B) = O, a(B, n+1) = O,\ a(B, A_2) = O.$$

где O – нулевая матрица соответствующего размера.

Обсуждение результатов. В ходе реализации представленного алгоритма происходит разбиение исходной сети на кластеры (рис. 1), особенностью которых является наличие пути между двумя любыми вершинами, что естественным образом позволяет рассчитать степень устойчивости сети к воздействию со стороны внешних факторов.

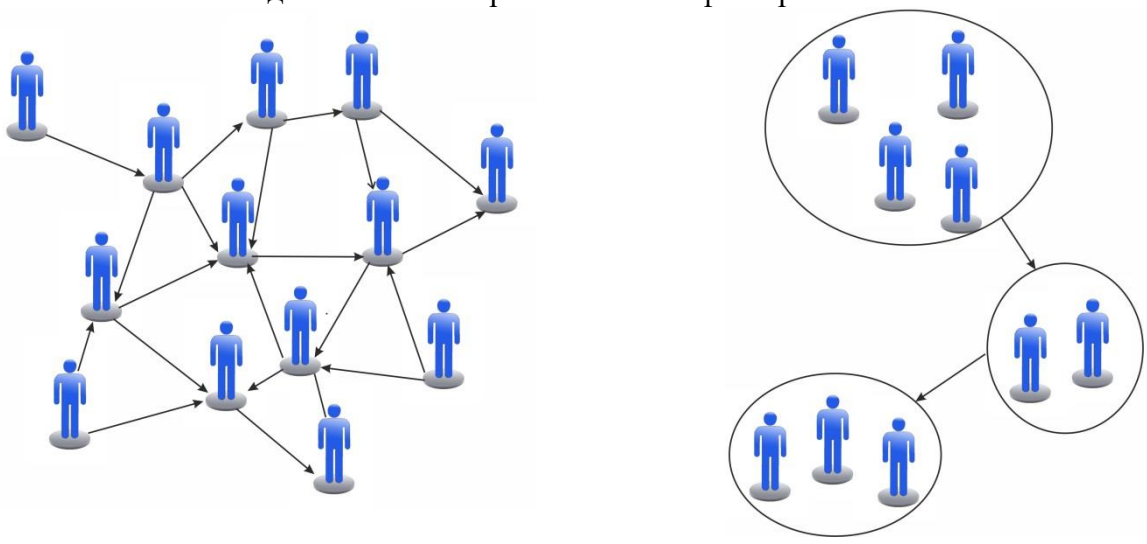


Рис. 1. Пример графического представления сети (слева) и её кластерного разбиения (справа)
Fig. 1. An example of a graphical representation of the network (left) and its cluster splits (right)

Следовательно, принадлежность агента к кластеру позволяет получить доступ к информации любого другого агента из этого кластера, либо напрямую, либо опосредованного через других агентов из этого кластера. Наравне с этим выделенный частичный порядок позволяет выделить множество кластеров, достижимых из выделенного кластера. Таким образом, доля вершин от общего числа в графе, в которые можно попасть по путям в графе из вершины *i*, определяется, следующим образом

$$h_i = \bigcup_{\{p \in K:\, p \prec i+1\}} \bigcup_{a \in K_p} a,$$

где $\{p \in K : p \prec i+1\}$ – множество, состоящее из номера кластера, содержащего вершину *i* и номеров кластеров достижимых из него; $a \in K_p$ – множество элементов из кластера K_p.

Заложенная в основе сетевого образования некоторая иерархия подчинения и разделения функциональных обязанностей не позволит получить доступ ко всей сети любому агенту. А именно, если проведена информационная атака на агента из нижестоящего кластера, то информация, расположенная у агентов выше в кластерной структуре, будет в безопасности. Однако если успешная информационная атака проведена в отношении агента из самого верхнего кластера, то вся информация сети подвергается угрозе (рис. 2).

Соответственно, степень устойчивости вершины в первом случае будет максимальной $s=1$, а во втором равна $s=0$.

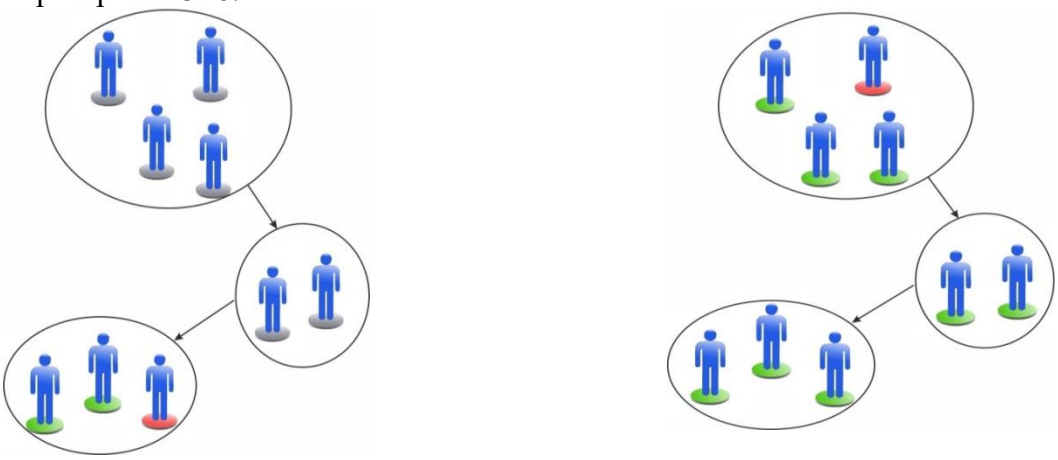


Рис. 2. Пример нарушения информационной безопасности агентов сети (зеленым) при угрозе по отношению к выделенному агенту (красным)

Fig. 2. An example of information security violation of network agents (green) in case of a threat against a selected agent (red)

Естественным образом предположить, что наиболее привлекательными со стороны внешних воздействий являются агенты с минимальной степенью устойчивости к угрозам. В основном к ним относятся сотрудники из административно-управленческого аппарата, но и уровень безопасности зачастую у них на порядок выше, чем у остальных агентов. Однако необходимо отметить, что начальное структурное разбиение, основанное на разделении обязанностей и функций, зачастую не совпадает с кластерным разбиением, основанным на наличии информационных связей. Обоснованно это тем, что функциональное разбиение носит чисто формальный характер и является статической структурой, в то время как любая информационная сеть является динамическим образованием, в которой происходит появление или нарушение связей, исходя из тех задач, которые перед ней стоят. Соответственно, организация информационной безопасности также руководствуется статистической информацией, которая обновляется периодически, но не в режиме реального времени:

– перечень требований, составляющих коммерческую тайну;

– перечень и характеристики рабочих мест, серверов и т.д.;
– описание информационных потоков и технологии обработки информации; порядок её хранения и т.п. [19]

Следовательно, вопрос информационной безопасности предпринимательской сети, большой размерности с явно выраженной иерархической структурой или малой с постоянно меняющейся топологией, намного эффективнее решать с использованием соответствующих алгоритмов, обладающих быстродействием и отражающих реальную кластеризацию, основанную на действующем информационном обороте в сети. Особенно, если учесть, что помимо прямого анализа сетевого соединения, данный алгоритм позволяет получить оценки различных характеристик сети, задействованных в её информационной безопасности, например, степень централизации сети, гетерогенность сети, ранг сети, степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу.

Степень централизации сети характеризуется мерой группирования агентов вокруг единого центра [5]. С другой стороны, централизация – это концентрация прав принятия решений, сосредоточение властных полномочий на верхнем уровне руководства организации. Следовательно, степень централизации сети, является второстепенным показателем, участвующим в информационной безопасности. И она должна определяться не только наличием или отсутствием управляющей верхушки, но и её численностью, концентрацией и возможностью передачи решений на все уровни сети, т.е. отдаленностью самого низкого уровня сети от центра.

Предложенный алгоритм позволяет разбить сеть на кластеры, элементы которых образуют компоненты связности в ориентированном графе, порожденные исходной сетью. Помимо этого, каждый кластер, полученный в предпринимательской сети, образует совокупность агентов сети одного уровня, а отношение частичного порядка, однозначно определяет иерархию между ними. Кластер больше всех остальных по отношению частичного порядка, однозначно, определяется как управляющая верхушка, имеющая только исходящие связи и не находящиеся в подчинение, а количество выходящих связей данного кластера можно буквально считать, как степень централизации сети.

Гетерогенность сети – показатель неоднородности элементов сети. Естественным образом предположить, что функционирующая предпринимательская сеть не должна состоять только из агентов экономической сферы. Следовательно, данный показатель определяет степень агентов, связанных с предпринимательской деятельностью, но не занимающихся ею напрямую. Речь идет о вспомогательных задачах, которые необходимо решать для поддержания функционирования любой сети и не только предпринимательской. Предложенный подход в работе [5] позволяет определить процент гетерогенности сети, но мало информирует нас о расположении не предпринимательских агентов в сети, что является принципиальным с позиции информационной безопасности сети, так как именно эти агенты требуют повышенного внимания.

На основе предложенного алгоритма логично предположить, что агенты, работающие над вспомогательными задачами, в данной сети будут представляться в виде кластеров, содержащих один элемент, замыкая на себе связи, выступая связующими элементами различных отделов с внешним миром или другими сетями. Также правомерно предположить, что агенты не предпринимательской природы не должны образовывать отдельные кластеры на верхних и средних уровнях иерархии сети, в противном случае, возникает серьезное подозрение о легальности данной сети.

Следовательно, использование комбинированной оценки гетерогенности сети посредством оценки доли агентов не предпринимательской природы и их расположением в кластеризованном представлении сети, позволяет более точно охарактеризовать природу деятельности сети, предположить о законности и некой стрессоустойчивости к воздействиям на неё извне.

Ранг сети – длина общей многоступенчатой связи, в которой одни элемент сети связан с другими элементами [5]. В традиционном представлении ранг рассчитывается как среднее чис-

ло связей, входящих в маршрут связи между двумя элементами сети по кратчайшему пути, что больше соответствует средней длине между любыми двумя агентами сети. Полученный алгоритм позволяет в качестве характеристики ранга оценить длину иерархической цепочки в кластеризованной сети, тем самым определяя ранг, через количество уровней в сети, представленной через кластеры. Данное представление ранга более обоснованно с позиции практики, логики и природы сети, так вопрос об установлении количества связей, необходимых между двумя агентами одного кластера или одного уровня не актуален и в большинстве случаев решается напрямую, что нельзя сказать о порядке согласований между отделами. Следовательно, ранг будет характеризовать необходимое число уровней, которое следует согласовать или пройти для установления связи между двумя агентами сети различных уровней.

Степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу – данный показатель может быть рассчитан в случае, если при изучении предпринимательской сети удастся установить наличие сетеобразующего элемента и однозначно его определить [5].

Определение данного показателя осложняется предварительной задачей по установлению факта присутствия сетеобразующего элемента, который не обладает четкими критериями, тем самым, носит вероятностный смысл и, в частном случае, трактуется как непосредственная связь всех элементов сети с сетеобразующим элементом. В условиях отсутствия формальных критериев поиска сетеобразующиего элемента, можно рассмотреть его в зависимости от степени централизации сети.

Из вышесказанного, степень централизации сети определяется посредством разбиения сети на кластеры и построения соответствующей иерархии.

Следовательно, если речь идет о высокоцентрализованной сети, кластеризация которой представляется в виде дерева (четкая вертикаль управления) или радиальной сети (все кластеры в непосредственном подчинении выделенного элемента), то, без сомнения, сетеобразующим элементом будет выступать кластер агентов, определяющий управление всей сети.

Соответственно, степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу может быть определена как высокая, а численная оценка будет равна рангу сети. В случае низкоцентрализованной сети, кластеризация будет содержать неявно выраженную иерархию с большим число элементов на каждом уровне, что можно интерпретировать, как отсутствие единого сетеобразующего элемента. Соответственно, степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу считать низкой.

В случае децентрализованной сети, в результате кластеризации будет получен один кластер, содержащий все элементы сети, следовательно, степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу можно считать нулевой в силу отсутствия такого. Следовательно, степень структурной близости сети к сетеобразующему элементу будет отражать особенности базовой топологии сети, заложенной в основе кластерного представления сети.

Вывод. Использование данного алгоритма при оценке степени устойчивости сети к внешним воздействиям, имеет ряд преимуществ по отношению к известным подходам кластеризации сетевых соединений.

Во-первых, наличие кластерного порядка позволяет оценить потенциальное влияние внешних угроз, установив степень устойчивости каждого агента предпринимательской сети к воздействию со стороны внешних факторов.

Во-вторых, выделение кластеров высших порядков, в случае сетей большой размерности, позволит установить круг агентов, которые требуют более высокого уровня информационной безопасности, не по формальным признакам, принадлежащих административно-управленческому аппарату, а реально имеющих доступ к информации всей сети. В случае сетей малой размерности без явно выраженного административно-управленческого аппарата, кластеризация позволит аналогично дифференцировать уровень используемой информационной защиты, что, несомненно, в обоих случае позволит уменьшить соответствующие затраты.

В-третьих, невысокая трудоёмкость алгоритма по сравнению с традиционными подходами позволяет использовать его в реальном времени для оценки безопасности всей сети в ходе её периодического мониторинга на предмет попадания тех или иных агентов в кластер, не соответствующий их уровню допуска, в результате выполнения каких-либо оперативных поручений.

В-четвертых, в отличие от традиционных алгоритмов выделения кластеров или подсетей, предложенный алгоритм не требует каждого перезапуска в случае добавления новых вершин и формирует иерархическую структуру взаимного расположения полученных кластеров.

На основе отмеченных особенностей можно разработать соответствующую методику мониторинга потенциально привлекательных агентов сети с позиции внешнего влияния. Идея состоит в мониторинге сетевого соединения предложенным алгоритмом в режиме реального времени, направленного на:

- усиление безопасности отдельных агентов сети, меняющих свое положение в кластеризованном графе с нижнего на высший уровень;
- усиление безопасности отдельных агентов сети, способных инициировать связи, приводящие, возможно к временному, но появлению новых кластеров в результате объединения уже имеющихся;
- ограничение функциональной возможности, направленной на создание новых связей, агентов, состоящих в кластерной структуре с максимальным числом агентов.

Предложенный подход позволяет существенно повысить информационную безопасность и устойчивость предпринимательской сети в целом к потенциальным угрозам через выделение и усиление информационной защиты наиболее важных и значимых агентов сети не с позиции их формального положения и статуса в структуре, а с позиции их потенциальной угрозы для всей сети в случае атаки или взлома.

Вопрос информационной безопасности соединений различной природы является приоритетным и требует индивидуального подхода, так как методы защиты, используемые в глобальной сети, в первую очередь, ориентированы на поддержание стабильной работы сети в целом. В то время как информационная безопасность отдельно взятых соединений зависит не только от методов защиты, но и от природы данного соединения, которая априори отражается в целеполагании потенциальной угрозы.

Соответственно, предложенный подход по мониторингу потенциально привлекательных агентов сети с позиции внешнего влияния не является универсальным, но сам алгоритм может быть использован при разработке соответствующих индивидуальных методик для оценки информационной безопасности, или целостности сетей различной природы, представимой в виде ориентированного графа и наложении соответствующих характеристик на его связи.

Библиографический список:

1. Асаул А.А. Методологические аспекты формирования и развития предпринимательских сетей. – СПб.: «Гуманистика», 2004. – 256 с.
2. Шерешева М.Ю. Формы сетевого взаимодействия компаний. М.: Изд. дом ГУ–ВШЭ, 2010. – 339 с.
3. Жаркова Е.С. Экономические теории размещения производства: от штандорта к кластерам // Вестник СПбГУ. – 2011. – Сер. 5. – Вып. 1. – С. 145–150.
4. Уильямсон О. Экономические институты капитализма: фирмы, рынки, «отношенческая» контрактация. – СПб.: Лениздат, 1996. – 702 с.
5. Радаев В.В. Рынок переплетение социальных сетей // Российский журнал менеджмента. – 2008. – Т.6. – №2. – С. 47–54.
6. Granovetter M. Business Groups. The Handbook of Economic Sociology. – N.Y., 1994.
7. Катькало В.С. Межфирменные сети: проблематика исследований новой организационной категории в 1980–90е гг. // Вестник СПбГУ. Сер.5: Экономика. – 1999. – № 2. – С. 21–38.
8. Elfring T., Hulsink W. Networks in entrepreneurship: The case of high-technology firms // Small Business Economics. – 2001. – Vol. 21(4). – P. 409–422.
9. Davidsson P., Honig B. The role of social and human capital among nascent Entrepreneurs // Journal of Business Venturing. – 2003. – Vol. 18(3). – P. 301–331.

10. Erdos P., Renyi A. On random graphs // Publicationes Mathematica. – 1959. – Vol. 6. – P. 290–297.
11. Newman M.E. The structure and function of complex networks. – SIAM Review, 2003.
12. Леш А. Пространственная организация хозяйства. – М.: Наука, 2007. – 663 с.
13. Штульберг Б.М., Введенский В.Г. Региональная политика России: теоретические основы, задачи и методы реализации. – М.: Гелиос АРВ, 2009. – 208 с.
14. Marshall A. Principles of Economics. Variorum edition overseen be C. Guillebaud. – L.: McMillan Press, 1961. – 450 p.
15. Porter M.E. On Competition. – Boston: Harvard Business School Press, 1998. – 485 p.
16. Albert R., Barabasi A. Statistical mechanics of complex networks // Reviews of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74. – P. 47–97.
17. Aggarwal C.C. Social Network Data Analytics. – Kluwer Academic Publishers, 2011. – 502 p.
18. Everton S.F. Disrupting Dark Networks (Structural Analysis in the Social Sciences). – Cambridge University Press, 2012. – 482 p.
19. Асаул А.А. Организация предпринимательской деятельности. – Москва: Проспект, 2016. – 400 с.
20. Tsitsiashvili G., Bulgakov V., Osipova M., Losev A., Kharchenko Yu. Construction of subgraph from graph shortest way//Applied Mathematical Sciences. – 2015. – Vol. 79(9). – P. 3911–3918.

References:

1. Asaul A.A. Methodological aspects of the formation and development of entrepreneurial networks. SPb.: «*Gumanistika»*, 2004: 256. (In Russ)
2. Sheresheva M.Yu. Forms of network interaction of companies. M.: Izd. dom GU–VShE`, 2010: 339. (In Russ)
3. Zharkova E.S. Economic theories of production location: from standort to clusters. [Vestnik SPbGU] *Bulletin of St. Petersburg State University*, 2011; 5(1): 145–150. (In Russ)
4. Uil`yamson O. Economic institutions of capitalism: firms, markets, "relational" contracting. *SPb.: Lenizdat*, 1996: 702. (In Russ)
5. Radaev V.V. The market for the interweaving of social networks. *Rossijskij zhurnal menedzhmenta*, 2008; 6(2): 47–54 (In Russ)
6. Granovetter M. Business Groups. *The Handbook of Economic Sociology. N.Y.*, 1994.
7. Kat`kalo V.S. Interfirm Networks: Research Issues of a New Organizational Category in the 1980–90s. [Vestnik SPbGU Bulletin of St.] *Petersburg State University*. Ser.5: E`konomika, 1999; 2:21–38. (In Russ)
8. Elfring T., Hulsink W. Networks in entrepreneurship: The case of high-technology firms. *Small Business Economic*s. 2001; 21(4): 409–422.
9. Davidsson P., Honig B. The role of social and human capital among nascent Entrepreneurs. *Journal of Business Venturing*. 2003; 18(3): 301–331.
10. Erdos P., Renyi A. On random graphs. *Publicationes Mathematica*. 1959; 6: 290–297.
11. Newman M.E. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 2003.
12. Lesh A. Spatial organization of the economy. M.: *Nauka*, 2007: 663. (In Russ)
13. Shtul`berg B.M., Vvedenskij V.G. Regional Policy of Russia: Theoretical Foundations, Tasks and Methods of Implementation. *M.: Gelios ARV*, 2009: 208. (In Russ)
14. Marshall A. Principles of Economics. Variorum edition overseen be C. Guillebaud. *L.: McMillan Press*, 1961: 450.
15. Porter M.E. On Competition. Boston: *Harvard Business School Press*, 1998: 485.
16. Albert R., Barabasi A. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002; 74: 47–97.
17. Aggarwal C.C. Social Network Data Analytics. *Kluwer Academic Publishers*, 2011: 502.
18. Everton S.F. Disrupting Dark Networks (Structural Analysis in the Social Sciences). *Cambridge University Press*, 2012: 482.
19. Asaul A.A. Organization of entrepreneurial activity. Moskva: *Prospekt*, 2016. 400 p. (In Russ)
20. Tsitsiashvili G., Bulgakov V., Osipova M., Losev A., Kharchenko Yu. Construction of subgraph from graph shortest way. *Applied Mathematical Sciences*, 2015; 79(9): 3911–3918.

Сведения об авторе:

Александр Сергеевич Лосев, кандидат физико-математических наук, старший научный научно-исследовательской группы вероятностных методов и системного анализа; A.S.Losev@yandex.ru

Information about author:

Aleksandr S. Losev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Research Group of Probabilistic Methods and System Analysis; A.S.Losev@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.04.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 23.05.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 23.05.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.931;004.932
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-56-66 Оригинальная статья /Original Paper

Инварианты в задачах распознавания образов и контроля состояний сложных объектов

В.Б. Мелехин[1], В.М. Хачумов[2-4], М.В. Хачумов[2-4]
[1]Дагестанский государственный технический университет,
[1]367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,
[2]Институт программных систем им. А.К.Айламазяна РАН,
[2]152021, Ярославская обл., Переславский р-н, с. Веськово, ул. Петра Первого, д.4а, Россия,
[3]Федеральный исследовательский центр «Информатика и управления» РАН,
[3]119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2, Россия,
[4]Российский университет дружбы народов (РУДН),
[4]117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение эмуляторов основных датчиков малого космического аппарата (КА). **Метод.** Качество восстановления определяется среднеквадратичным отклонением (СКО) данных от эталонов. Исследование основано на применении метода динамического программирования. **Результат.** Проведен обзор работ в области применения устойчивых характеристик – инвариантов, в прикладных областях распознавания образов и контроля состояний сложных технических систем. Предложен и протестирован метод, направленный на выявление отказов и построение эмуляторов датчиков малого КА на основе анализа устойчивых показателей: коэффициентов корреляции и ковариации. Предложенный подход позволяет повысить в целом надежность информационно-измерительной системы малого космического аппарата. В дальнейшем для эмуляции вышедшего из строя датчика планируется применять множественную корреляцию временных последовательностей. **Вывод.** В общем случае, распознавание сводится к сравнению графовых структур объектов к корректному сопоставлению иерархических моделей изображений на основе различных инвариантов. Контроль состояний сложных систем основывается на применении устойчивых характеристик, выступающих в качестве инвариантных или субинвариантных дескрипторов. Инварианты в различных приложениях помогают распознавать текущую ситуацию с достаточной степенью точности, снижая, как правило, размерность задачи.

Ключевые слова: иерархия, изображение, граф, изоморфизм, инвариант, кортеж, критерий, сложный объект, измерение расстояний, пирамида видимости, контроль, состояние

Для цитирования: В.Б. Мелехин В.М. Хачумов, М.В. Хачумов. Инварианты в задачах распознавания образов и контроля состояний сложных объектов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):56-66. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-56-66

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00022-а «Разработка и исследование методов распознавания образов на основе инвариантов к яркостным и геометрическим преобразованиям в системах технического зрения беспилотных летательных аппаратов»).

Invariants in problems of pattern recognition and control of states of complex objects

V.B. Melekhin[1], V.M. Khachumov[2-4], M.V. Khachumov[2-4]
[1]Daghestan State Technical University,
[1]70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,
[2] A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems RAN,

[2]4a Peter the Great Str., Yaroslavl region, Pereslavl district, Veskovo 152021, Russia,
[3]Federal Research Center «Informatics and Management» of the Russian Academy of Sciences,
[3]44 Vavilova Str., build.2, Moscow 119333, Russia,
[4]Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
[4] 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to build emulators of the main sensors of a small spacecraft (SC). **Method.** The quality of recovery is determined by the standard deviation (RMS) of the data from the standards. The study is based on the application of the dynamic programming method. **Result.** A review of works in the field of application of stable characteristics - invariants, in the applied areas of pattern recognition and state control of complex technical systems is carried out. A method aimed at identifying failures and building small spacecraft sensor emulators based on the analysis of stable indicators: correlation and covariance coefficients is proposed and tested. The proposed approach makes it possible to increase the overall reliability of the information-measuring system of a small spacecraft (SC). In the future, to emulate a failed sensor, it is planned to use multiple correlation of time sequences. **Conclusion.** In the general case, recognition is reduced to comparing the graph structures of objects to the correct matching of hierarchical image models based on various invariants. Control of the states of complex systems is based on the use of stable characteristics that act as invariant or subinvariant descriptors. Invariants in various applications help to recognize the current situation with a sufficient degree of accuracy, usually reducing the dimension of the problem.

Keywords: hierarchy, image, graph, isomorphism, invariant, tuple, criterion, complex object, distance measurement, pyramid of visibility, control, state

For citation: V.B. Melekhin, V.M. Khachumov, M.V. Khachumov. Invariants in problems of pattern recognition and control of states of complex objects. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (2): 56-66. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-2-56-66

Acknowledgment. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-07-00022-a “Development and study of pattern recognition methods based on invariants to brightness and geometric transformations in vision systems for unmanned aerial vehicles”).

Введение. Свойство оставаться неизменными при определенных внешних воздействиях позволяет называть некоторые характеристики сложных объектов инвариантами или полуинвариантами в зависимости от степени устойчивости. Инварианты способны выступать в роли информативных признаков, сохраняющих и передающих характерные особенности объектов, подвергнутых преобразованиям, что увеличивает вероятность получения правильного решения. Применение инвариантов становится ключевым фактором при создании эффективных методов и алгоритмов распознавания и контроля ситуаций.

В задачах распознавания объекты могут быть представлены в виде графов и иерархий. Такие представления позволяют решать задачу распознавания как задачу поиска изоморфизма графов. В этом случае в качестве инвариантов могут выступать различные устойчивые числа-атрибуты, определяющие степень вершин, число ребер и их длину, вес и др. Определение изоморфизма графов на основе инвариантов – один из эффективных подходов к распознаванию объектов различной природы.

В работах [1,2] в качестве инвариантов предлагается использовать объединения локальных характеристик графа, например: плотность, хроматическое число, число Хадвигера и др. Важно отметить, что определение изоморфизма за полиномиальное время является одной из нерешенных проблем современной теории сложности вычислений. Сочетание точных алгоритм и эвристических, основанных на итерационном уточнении решений, рассмотрено, например, в

работе [3]. В статье [4] представлено решение проблемы изоморфизма графов методами вероятностного линейного программирования.

В настоящей работе представлены результаты поиска устойчивых эвристических характеристик, способствующих выявлению изоморфизма. Проблема нахождения полного инварианта графа находится центре внимания до настоящего времени [2, 5].

В работах [6,7] предлагаются подходы к сравнению эталонных моделей, представленных иерархиями в виде пирамид видимости с набором плоскостей из точки наблюдения. Первая иерархия (нижняя часть пирамиды) является наиболее полным описанием, далее изображение последовательно «сжимается» от слоя к слою по определенному правилу, что соответствует моделям изображения, наблюдаемого с разных расстояний. В случае распознавания объектов, наблюдаемых с разных сторон и расстояний, используют инвариантные моменты, что приводит к одинаковой размерности сравниваемых изображений; существенному сокращению размерности описаний сравниваемых объектов, устранению влияния поворотов и смещений изображений [8].

Вопросы корректного сравнения иерархий рассмотрены в работе [9], в которой предложена специальная мера, основанная на схеме динамического программирования. В настоящей работе проблема корректного сравнения эталонных моделей с реальными изображениями объектов, представленных иерархиями, решается на основе инвариантных моментов.

Представляют интерес вопросы применения инвариантов в задачах контроля и диагностики технических систем. Здесь в качестве субинвариантов выступают коэффициенты корреляции данных его датчиков. Корреляционный анализ и прогнозирование сбоя датчиков ориентации с помощью искусственных нейронных сетей выполнялись, например, в работе [10]. Места сбоев обнаруживаются в результате сравнения реального и прогнозного значений корреляции. В работе [11] описана нейросетевая технология решения задачи контроля датчиков положения космического аппарата. Контроль на основе анализа парных корреляций дает возможность выявить конкретный датчик, показания которого неверны. В работе [12] проверялась модель отказа датчика ориентации малого космического аппарата (КА), при которой его показания составляли некоторую постоянную величину.

Постановка задачи. В настоящей работе рассматривается задача построения эмуляторов основных датчиков малого КА. Качество восстановления определяется среднеквадратичным отклонением (СКО) данных от эталонов.

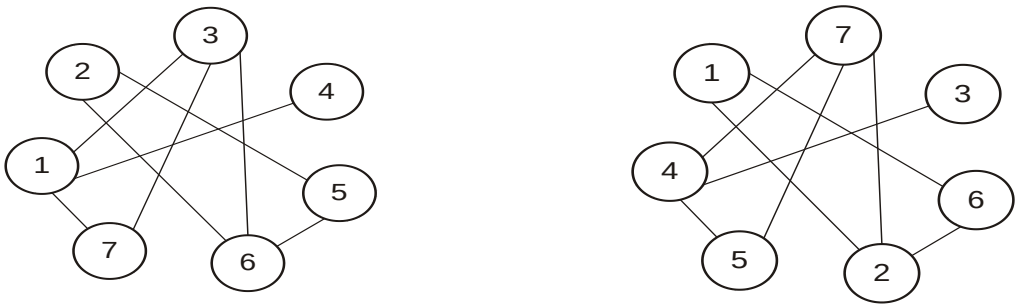
Методы исследования. 1. Сравнение графовых моделей объектов на основе инвариантов. Для решения задачи изоморфизма рассматриваются простые связные графы $G=(V,E)$, где V – множество вершин; E – множество ребер, содержащего n – вершин и m – ребер. В качестве метода инвариантных свойств выступает кортеж графа, характеризуемый минимумом суммарной длины всех связей в кортеже, а в качестве атрибута для определения изоморфизма, – собственно, упорядоченный вектор длин, приписываемых вершинам кортежа. Для оценки качества кортежа вводится понятие длины ребра как неотрицательной разности порядковых номеров вершин в кортеже инцидентных данному ребру.

Дадим некоторые определения. Функцию f, относящую каждому графу G некоторый элемент $f(G)$ из множества *M,* будем называть инвариантом, если на изоморфных графах ее значения совпадают, т.е. для любых G и $G^{/}$: $G \cong G^{/} \Rightarrow f(G)=f(G^{/})$.

Инвариант графа, удовлетворяющий необходимому и достаточному условию изоморфизма: т.е. $G \cong G' \Leftrightarrow f(G)=f(G')$,будем называть полным. Если на сравниваемых графах значения функции f отличаются на допустимые величины Δ, т.е. для любых L и $L^{/}$ $G \cong G^{/} \Rightarrow \left| f(G)-f(G^{/}) \right| \le \Delta$, то будем называть ее субинвариантом. Такой подход обеспечи-

вает возможность приближенного сравнения графовых моделей с допустимой погрешностью. Рассмотрим эвристический метод построения кортежа графа, суть которого состоит в формировании кортежа вершин графа G, в котором вершины с большим числом связей между собой размещаются в кортеже по соседству, а слабо связанные вершины – в отдаленных друг от друга позициях. Алгоритм, приведенный в работе [13], позволяет в цикле строить кортеж графа G с минимальной суммарной длиной ребер. Количество глобальных циклов n определяется числом вершин в графе. Алгоритм в каждом цикле (шаге) с номером r оперирует двумя подграфами D_1^r и D_2^r графа $G=(V,E)$ с выбранными и еще не выбранными вершинами графа, соответственно. На каждом r цикле выбирается и отмечается индексом r одна из неотмеченных вершин $a_i \in V$ подграфа D_2^r, связанная непосредственно с одной или несколькими вершинами подграфа D_1^r. Эта вершина переносится из подграфа D_2^r в граф D_1^r и служит очередной вершиной формируемого кортежа. При выборе r-ой компоненты картежа на r-ом цикле алгоритма отыскивается такая вершина a_i^r, для которой $\xi_{1i}^r - \xi_{2i}^r = \delta_{i\max}^r$, где ξ_{1i}^r - число дуг, связывающих вершину a_i с D_1^{r-1} а ξ_{2i}^r - число дуг, связывающих a_i с D_2^r. Каждый цикл связан с анализом и оценкой $n-r$ еще невыбранных вершин-кандидатов. Таким образом, в итоге получаем искомый кортеж с минимизированной суммарной длиной связей и соответствующую ему матрицу смежности. Вычислительную сложность алгоритма построения кортежа можно оценить как $n(n-1)$.

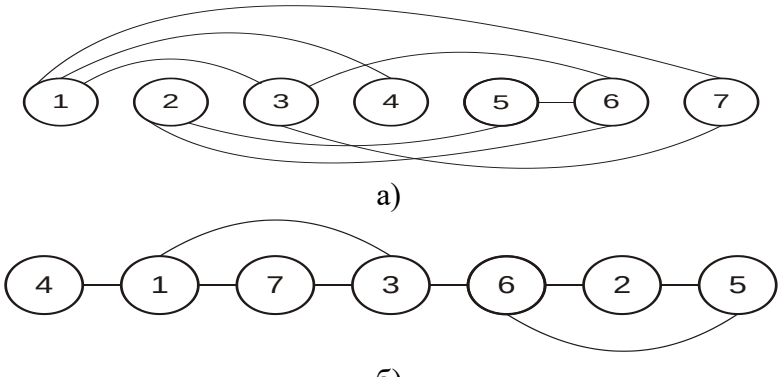
Пусть заданы два графа $G_1=(V_1,E_1)$ и $G_2=(V_2,E_2)$ причем второй получен путем переименования вершин (рис.1 и рис.2).



а) б)

Рис. 1. Графы G_1 (а) и G_2 (б)

Fig. 1. Columns G_1 (a) and G_2 (b)



а)

б)

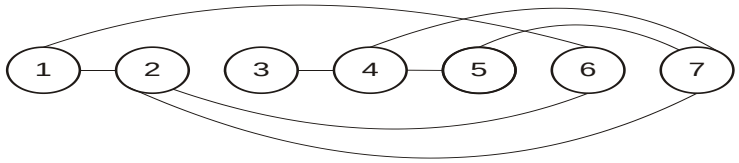
Рис. 2. Кортеж графа G_1 без оптимизации (а) и с минимальной суммарной длиной ребер (б)

Fig. 2. Graph G_1 tuple without optimization (a) and with the minimum total edge length (b)

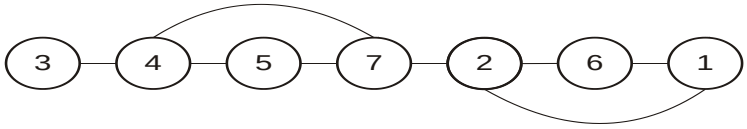
Вариант кортежа для графа G_1 имеет вид, представленный на рис. 2а. Применяя алгоритм построения кортежа с минимальной суммарной длиной ребер, получим результат, приве-

денный на рис. 2б. Суммарная длина ребер в кортеже графа G_1 на рис.2а составляет $L_1 = 26$. Суммарная длина ребер в оптимизированном кортеже (рис.2б) $L_1^o = 10$.

Аналогично поступим и для графа G_2. Результаты отображения графа G_2 в виде произвольного и упорядоченного кортежей в соответствии с алгоритмом представлены на рис.3а и рис.3б.



а)



б)

Рис. 3. Кортеж графа G_2 без оптимизации (а) и с оптимизацией (б)

Fig. 3. Graph G_2 tuple without optimization (a) and with optimization (b)

Общая длина ребер в графе рис.3а $L_2 = 22$. на рис. 3б. Общая длина ребер в оптимизированном кортеже на рис.3б составляет $L_2^o = 10$. Таким образом, в рассмотренном примере графы G_1 и G_2 в оптимизированных кортежах имеют равные показатели $L_1^o = L_2^o = 10$, что в интеграции с другими инвариантам и позволяет считать их изоморфными.

Отметим отдельно, что применяемый алгоритм построения кортежа [13] допускает в общем случае наличие нескольких альтернативных вариантов. Поэтому в сочетании с эвристикой может потребоваться ограниченный перебор порядка вершин с целью достижения равенства характеристик оптимизированных кортежей для G_1 и G_2.

2. Измерение расстояний между пирамидами видимости на основе инвариантов. Пусть, известны изображения (слои) наблюдаемых объектов с разных расстояний, образующих пирамиду видимости. Представим изображение слоя иерархического описания в виде графа – упорядоченного облака точек (пикселей), характеризуемых только одним значением (глубины, яркости).

Первым шагом в процедуре сравнения объектов является нахождение матрицы локальных расстояний $d(i, j)$ между иерархиями эталона и текущего объекта, процедура описана в работе [9]. Пусть, например, уровень i первой иерархии сравнивается с уровнем j второй иерархии. Последовательно сравниваем каждую вершину первой иерархии с вершинами второй иерархии и находим похожую по весу вершину на выбранных уровнях. Затем находим расстояние между вершинами (как модуль разности весов). Разности между похожими вершинами заносим в счетчик и суммируем. Если для вершины нет пары, то вводим дополнительные вершины с нулевым весом. Полученное значение счетчика с минимальной суммой заносится в соответствующую ячейку таблицы. После заполнения таблицы, в ней содержатся величины локальных расстояний между всеми парами уровней иерархий.

Расстояние между двумя объектами находят путем перевода уровней иерархии первого объекта в соответствующие уровни иерархии второго объекта. Для этого используем метод динамического программирования. Движение от верхней левой клетки к нижней правой клетке таблицы осуществляется по диагонали, горизонтали и вертикали. В проложенном пути производим суммирование чисел, находящихся в клетках, входящих в оптимальный путь. При этом учитываются дополнительно весовые коэффициенты перехода по горизонтали, вертикали и диагонали соответственно.

Для определенности будем пользоваться схемой, когда по диагонали движение осуществляется с коэффициентом 1, а по вертикали и горизонтали с коэффициентом 2 (по схеме 2-1-2). В случае неоднозначности движения по клеткам для измерения расстояния следует рассмотреть все альтернативные пути. Альтернативный метод сравнения, использующий вместо пиксельного представления значения инвариантных моментов предложен в работе [6]. Получение инвариантных моментов для каждой иерархии объекта приводит к одинаковой размерности сравниваемых изображений; существенному сокращению размерности описаний сравниваемых объектов; нивелированию возможных искажений, связанных с поворотами и смещениями изображений [8].

Рассмотрим в общем случае пространство признаков R^7 из семи инвариантных моментов. Ограничимся без потери общности тремя объектами O_1, O_2, O_3.

В принятой модели каждый объект представлен набором из n $(i = 1,...,n)$ изображений (ракурсов, слоев) иерархий. Расстояние между двумя точками i, j объектов O_1, O_2 пространства R^7 есть неотрицательное число, которое определим, как $R_{i,j}(X_i, Y_j) = \left|X_i - Y_j\right| = \sqrt{(x_1^i - y_1^j)^2 + ... + (x_7^i - y_7^j)^2}$ и назовем локальным. Для сравнения иерархий объектов O_1, O_2 вычислим все локальные расстояния и построим матрицу локальных расстояний. Пространство R^7 является метрическим, что легко можно показать.

$$R_{i,j}(X_i, Y_j) = \left|X_i - Y_j\right| = \left|X_i - Y_j + Z_k - Z_k\right| \le \left|X_i - Z_k\right| + \left|Z_k - Y_j\right|,$$

$$R_{i,j}(X_i, Y_j) \le R_{i,k}(X_i, Z_k) + R_{k,j}(Z_k, Y_j)$$

2. Расстояние между двумя объектами O_1, O_2 определяется как путь минимального веса по схеме динамического программирования (2:1:2).

Расстояние $R(O_1, O_2)$ вычислим следующим алгоритмом

Начало:

$i, j, l, m = 1$

$R(O_1, O_2) := R(X_1^1, Y_1^1),$

$R(O_1, O_2) := R(O_1, O_2) + \min\left(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)\right)$

Цикл:

$$\begin{cases} Если \quad \min\left(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)\right) = R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), \\ то \qquad i := i+1, \quad j := j, \quad l := l, \quad m := m+1; \\ Если \quad \min\left(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)\right) = R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), \\ то \qquad i := i+1, \quad j := j, \quad l := l, \quad m := m+1; \\ Если \quad \min\left(2R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), R(X_{i+1}^{l+1}, Y_{j+1}^{m+1}), 2R(X_i^{l+1}, Y_{j-1}^m)\right) = R(X_{i+1}^l, Y_j^{m+1}), \\ то \qquad i := i+1, \quad j := j, \quad l := l, \quad m := m+1. \end{cases}$$

Конец: $i = j = n, \quad l, m = 3$

Для рассмотренного случая

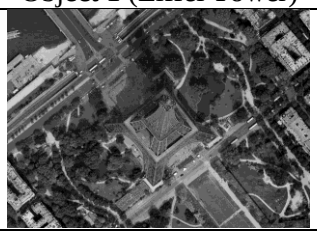
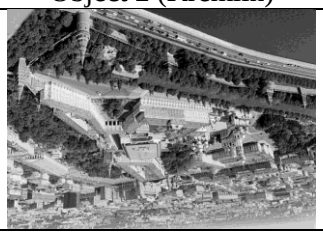
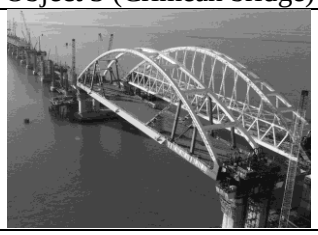
$R(O_1, O_2) \ge 0, \quad R(O_1, O_2) = R(O_2, O_1).$

Последнее равенство справедливо, т.к. транспонирование матрицы локальных расстояний, необходимое для сравнения иерархий O_2, O_1, не меняет веса проложенного пути. Правило треугольника: $R(O_1, O_2) \le R(O_1, O_3) + R(O_3, O_2)$ лежит за пределами рассмотрения настоящей работы. Пусть даны три полутоновых объекта, изображения размерности которых (639 x 472),

образуют первый уровень иерархии. Методом последовательного «сжатия» получены изображения других уровней пирамиды видимости. Уровни пирамиды видимости для каждого объекта представлены в табл.1, (всего по три уровня), они приведены в одном масштабе.

Таблица 1. Исходные графические объекты

Table 1. Source graphic objects

Объект 1 (Эйфелева башня) Object 1 (Eiffel Tower)	Объект 2 (Кремль) Object 2 (Kremlin)	Объект 3 (Крымский мост) Object 3 (Crimean bridge)
		
639 x 472		
320 x 236		
160 x 118		

Инвариантные моменты для полученных слоев (уровней иерархии) изображения внесены в табл.2., в которой приведены шесть основных моментов из установленных семи [8], т.к. первый момент исключен из рассмотрения как наименее информативный.

Таблица 2. Расчет инвариантных моментов

Table 2. Calculation of invariant moments

Уровни Levels	Инвариантные моменты для изображений/Invariant moments for images		
	Первый объект First object	Второй объект Second object	Третий объект Third object
1 (639 x 472)	9.3976e-02 7.8943e-04 5.6717e-04 2.0075e-07 -7.7095e-05 3.2207e-07	8.2227e-02 2.4902e-03 1.1548e-03 -1.2724e-06 -6.7270e-05 1.4885e-06	9.0056e-02 2.3284e-03 2.5347e-03 6.0836e-06 -6.3594e-04 -9.5224e-07
2 (320 x 236)	9.4928e-02 7.7041e-04 5.6738e-04 2.1076e-07 -7.3733e-05 3.1032e-07	8.3059e-02 2.4785e-03 1.1515e-03 -1.2659e-06 -6.7994e-05 1.4770e-06	9.1032e-02 2.3003e-03 2.5202e-03 5.9983e-06 -6.3611e-04 -9.1791e-07
3 (160 x 118)	9.5162e-02 6.9756e-04 5.5662e-04 2.2471e-07 -6.3840e-05 2.6420e-07	8.3033e-02 2.4769e-03 1.1373e-03 -1.1892e-06 -7.5499e-05 1.4933e-06	9.1373e-02 2.2292e-03 2.5307e-03 5.9351e-06 -6.3782e-04 -9.5030e-07

В табл. 3–5 приведены расстояния между всеми парами изображений трех объектов по метрике Евклида на основе вычисленных инвариантных моментов.

Таблица 3. Расстояния между уровнями первого и второго объектов
Table 3. Distances between the levels of the first and second objects

Уровни объекта 1 Object levels 1	Уровни объекта 2 Object levels 2		
	1	2	3
1	1.1886e-02	1.1062e-02	1.1087e-02
2	1.2830e-02	1.2006e-02	1.2031e-02
3	1.3072e-02	1.2248e-02	1.2006e-02

Расстояние между иерархиями объектов 1 и 2 по схеме 2-1-2 динамического программирования составит:

R12=1.1886e-02+1.2006e-02+1.2006e-02=3.5898e-02

Таблица 4. Расстояния между уровнями первого и третьего объектов
Table 4. Distances between the levels of the first and third objects

Уровни объекта 1 Object levels 1	Уровни объекта 3 Object levels 3		
	1	2	3
1	4.6818e-03	3.8830e-03	3.6078e-03
2	5.5093e-03	4.6530e-03	4.3516e-03
3	5.7423e-03	4.8796e-03	4.5746e-03

R13=4.6818e-03+4.6530e-03+4.5746e-03=1.3909e-02.

Таблица 5. Расстояния между уровнями второго и третьего объектов
Table 5. Distances between the levels of the second and third objects

Уровни объекта 2 Object levels 2	Уровни объекта 3 Object levels 3		
	1	2	3
1	7.9711e-03	8.9300e-03	9.2702e-03
2	7.1563e-03	8.1114e-03	8.4508e-03
3	7.1841e-03	8.1390e-03	8.4784e-03

R23=7.9711e-03+8.1114e-03+8.4784e-03=2.4561e-02

Таким образом, определяется близость объектов и решается задача распознавания. Не трудно проверить, что расстояние между иерархиями самого одного и того же объекта будет нулевым.

4. **Диагностика и эмуляция датчиков на основе устойчивой корреляции данных.**

Как показывают проведенные исследования, между показаниями некоторых датчиков КА существует устойчивая связь, выявляемая коэффициентом корреляции. Этот факт может служить основанием для выявления неисправности датчика, которая приводит к потере устойчивости этого значения. Кроме того, наличие такого субинварианта позволяет моделировать значения утраченного датчика, продлевая жизненный цикл всей системы в целом.

Пусть каждому датчику соответствует своя последовательность временных отсчетов в таблице.

Рассмотрим две строки B_1 и B_2, определенные на выделенном интервале времени. Каждое значение в строке привязано ко времени отсчета, которое опускаем без потери общности, опираясь на имеющееся соответствие элементов в столбце.

Коэффициент корреляции векторов B_1 и B_2 вычисляют по формуле $\gamma(B_1, B_2) = \dfrac{(B_1, B_2)}{\|B_1\| \cdot \|B_2\|}$

, где $\|B_j\|$ – норма вектора B_j.

Коэффициент корреляции позволяет установить соответствие между временными последовательностями: чем ближе по модулю к 1 коэффициент, тем сильнее связаны последовательности.

Наличие устойчивой во времени и сильной корреляции означает, что есть возможность достаточно точно воспроизводить одну последовательность через другую. Воспользуемся формулой линейной корреляции:

$$r_{xy} = \frac{\mathrm{cov}_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где cov_{xy} – коэффициент ковариации, σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения случайных величин x и y.

Из формулы (1) следует уравнение регрессии:

$$y(x) = r_{xy} \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \sigma_y + \bar{y} = bx + a, \quad (2)$$

где $\bar{y}$ и $\bar{x}$ – математические ожидания случайных величин x и y,

$$b = \frac{r_{xy}\sigma_y}{\sigma_x}, \; a = \frac{r_{xy}\bar{x}\sigma_y}{\sigma_x} + \bar{y}.$$

Оценим качество уравнения регрессии с помощью среднеквадратического отклонения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y(x) - y_i)^2}, \quad (3)$$

где y_i – фактические показания датчика, $y(x)$ – вычисленные показания.

В рамках исследования проведены эксперименты по эмуляции показаний датчиков на примере телеметрии, полученной от малого КА «Юбилейный». Эмуляция проводилась на основе показаний устойчиво коррелирующих датчиков с применением уравнения регрессии. Рассмотрим несколько графиков результатов эмуляции.

На рис. 4 представлен результат эмуляции вышедшего из строя датчика температуры 1-ой панели солнечной батареи (Plat1,C) по показаниям датчика напряжения тока на магнитометре (Uz,V).

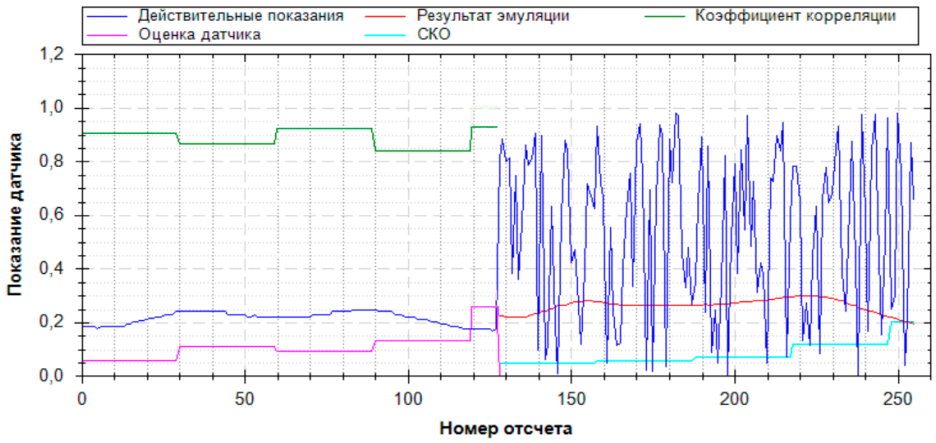


Рис. 4. Эмуляция показаний датчика температуры 1-ой панели солнечной батареи по показаниям датчика напряжения тока на магнитометре

Fig. 4. Emulation of the readings of the temperature sensor of the 1st solar panel according to the readings of the voltage sensor on the magnetometer

Видно, что часть показаний датчика Plat1,C сильно зашумлена (синий цвет). Зеленым цветом обозначен коэффициент корреляции показаний датчиков Plat1,C и Uz,V, вычисляемый на интервале из 30 отсчетов.

На графике (рис.4) видно, что коэффициент корреляции был высоким до появления шума. На зашумленном участке наблюдается отсутствие корреляции или изменение ее знака на обратный. Розовым цветом обозначена доля датчиков, показания которых коррелируют с датчиком Plat1, C с коэффициентом корреляции выше 0.7. Резкое снижение парного коэффициента корреляции между показаниями датчиков Plat1,C и Uz,V и уменьшение доли коррелирующих

датчиков с датчиком Plat1,C (формула (1)) являются показателями сбоя или выхода из строя датчика Plat1,C.

По формуле (2) выполнена эмуляция вышедшего из строя датчика (красный цвет). Голубым цветом обозначена оценка СКО (формула 3) на интервалах по $n = 30$ отсчетов. Среднее СКО рассмотренной эмуляции составило 0.0988. Как показывают исследования, при слабой корреляционной связи СКО при эмуляции больше, чем при высокой.

Вывод. В настоящей статье для определения изоморфизма графов применяется к известным инвариантам дополнительно минимум суммарной длины ребер по установленной метрике. На примере показано, что переименование вершин в графе не приводит к изменению величин суммарных длин и векторов длин ребер при вершинах оптимизированных кортежей графов. Эвристический алгоритм с необходимым критерием позволяет достаточно быстро строить такие кортежи, а полученные на его основе числовые характеристики целесообразно использовать в составе векторов инвариантов для определения изоморфизма.

Совмещение и сравнение пирамид видимости объектов представляет практический интерес для решения задач распознавания графических образов трехмерных объектов. Для сравнения плоскостей пирамиды применяют инвариантные моменты.

Применение инвариантов приводит к существенному сжатию признакового пространства и упрощает задачу распознавания объектов на трехмерных сценах. Рассмотренные подходы предоставляют возможность выбора различных постановок задач сравнения иерархий и методов их решения.

Предложен и протестирован метод, направленный на выявление отказов и построение эмуляторов датчиков малого КА на основе анализа таких устойчивых показателей как коэффициенты корреляции и ковариации. Предложенный подход позволяет повысить в целом надежность информационно-измерительной системы КА. В дальнейшем для эмуляции вышедшего из строя датчика планируется применять множественную корреляцию временных последовательностей.

Библиографический список:

1. Dehmer M., Grabner M., Mowshowitz A., Emmert-Streib F. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants. Advances in Computational Mathematics. 2013. Vol. 39. No. 2. Pp. 311–325. DOI: 10.1007/s10444-012-9281-0
2. Погребной А.В. Полный инвариант графа и алгоритм его вычисления // Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии. 2014. Т. 325. № 5. С.110–122.
3. Stoichev S.D. New exact and heuristic algorithms for graph automorphism group and graph isomorphism. Journal of Experimental Algorithmics (JEA). 2019. vol. 24. Pp. 1–27. DOI: 10.1145/3333250
4. Takapoui R., Boyd S. Linear Programming Heuristics for the Graph Isomorphism Problem // ArXiv.2016. [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/pdf/1611.00711.pdf (дата обращения: 18.01.22)
5. Хачумов М.В., Талалаев А.А., Хачумов В.М. Об одном эвристическом критерии в задаче определения изоморфизма графов на основе инвариантов // Современные наукоемкие технологии, 2022, №2. С..159–163. DOI: 10.17513/snt.39051
6. Фраленко В.П., Хачумов В.М., Хачумов М.В. Измерение расстояний между пирамидами видимости на основе инвариантов // Современные наукоемкие технологии, 2021, №5. С. 94–101. DOI: 10.17513/snt.38664
7. Watson A.B., Ahumada A. The pyramid of visibility // Journal of Vision, 16(12):567, 2016. DOI: 10.1167/16.12.567
8. Žunić D., Žunić J. Shape ellipticity from Hu moment invariants // Applied Mathematics and Computation, vol.226, 2014. Pp.406–414. DOI: 10.1016/j.amc.2013.10.062
9. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 1999. 270 с.
10. Талалаев А.А., Фраленко В.П. Контроль и диагностика датчиков положения космического аппарата // Искусственный интеллект и принятие решений, 2009? №3. С.49–52
11. Емельянова Ю.Г., Константинов К.А., Погодин С.В., Талалаев А.А., Тищенко И.П., Фраленко В.П., Хачумов В.М. Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата // Программные системы: теория и приложения, 2010, №1. С. 45–59
12. Емельянова Ю.Г. Алгоритмическое и программное обеспечение человеко-машинных интерфейсов с когнитивно-графическим отображением информации для систем космического назначения: дис. канд. техн. наук. Москва. 2019. 168 с.

13. Топольский Н.Г., Святенко И.Ю., Трефилов Г.Б., Сатин А.П. Интерактивный оптимизационный метод декомпозиции графов причинно-следственных связей в системах поддержки принятия решений // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности", 2009, № 5(27); URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/11-05-09.ttb.pdf (дата обращения: 18.01.2022).

References:

1. Dehmer M., Grabner M., Mowshowitz A., Emmert-Streib F. An efficient heuristic approach to detecting graph isomorphism based on combinations of highly discriminating invariants, *Advances in Computational Mathematics*, 2013; 39(2): 311–325. DOI: 10.1007/s10444-012-9281-0
2. Pogrebnoj A.V. A complete graph invariant and an algorithm for its calculation. [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Informacionnye tekhnologii] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Information Technology.* 2014; 325(5): 110–122. (In Russ)
3. Stoichev S.D. New exact and heuristic algorithms for graph automorphism group and graph isomorphism, *Journal of Experimental Algorithmics (JEA),* 2019; 24:1–27. DOI: 10.1145/3333250
4. Takapoui R., Boyd S. Linear Programming Heuristics for the Graph Isomorphism Problem, *ArXiv,* 2016. [Электронный ресурс]. URL: https:, arxiv.org/pdf/1611.00711.pdf (дата обращения: 18.01.22)
5. Hachumov M.V., Talalaev A.A., Hachumov . On one heuristic criterion in the problem of determining the isomorphism of graphs based on invariants. [Sovremennye naukoemkie tekhnologii] *Modern science-intensive technologies.* 2022; 2:159–163. DOI: 10.17513/snt.390516. (In Russ)
6. Fralenko V.P., Hachumov V.M., Hachumov M.V. Measurement of distances between pyramids of visibility based on invariants. [Sovremennye naukoemkie tekhnologii] *Modern science-intensive technologies.*2021; 5: 94–101. DOI: 10.17513/snt.38664. (In Russ)
7. Watson A.B., Ahumada A. The pyramid of visibility, *Journal of Vision,* 16(12):567, 2016. DOI: 10.1167/16.12.567
8. Žunić D., Žunić J. Shape ellipticity from Hu moment invariants. *Applied Mathematics and Computation*, 2014; 226: 406-414. DOI: 10.1016/j.amc.2013.10.062
9. Zagorujko N.G, Applied methods of data and knowledge analysis. [Izd-vo Instituta matematiki] *Publishing House of the Institute of Mathematics Novosibirsk*.1999; 270. (In Russ)
10. Talalaev A.A., Fralenko V.P. Control and diagnostics of spacecraft position sensors. [Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij] *Artificial intelligence and decision making*. 2009; 3:49–52. (In Russ)
11. Emel'yanova YU.G., Konstantinov K.A., Pogodin S.V., Talalaev A.A., Tishchenko I.P., Fralenko V.P., Hachumov V.M. Neural network control system for spacecraft orientation and range sensors. [Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya] *Program systems: theory and applications.* 2010;1: 45–59. (In Russ)
12. Emel'yanova YU.G.: Algorithmic and software for human-machine interfaces with cognitive-graphic display of information for space systems dis. kand. tekhn. nauk. Moskov, 2019; 168. (In Russ)
13. Topol'skij N.G., Svyatenko I.YU., Trefilov G.B., Satin A.P. Interactive optimization method for decomposition of graphs of cause-and-effect relationships in decision support systems [Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti] . *Internet journal "Technologies of technosphere safety"*. 2009; 5(27); URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/11-05-09.ttb.pdf (data obrashcheniya: 18.01.2022). (In Russ)

Сведения об авторах:

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

Хачумов Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ГНУ «Институт программных систем» им. А.К. Айламазяна РАН, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, профессор, ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов»; vmh@isa.ru

Хачумов Михаил Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ГНУ «Институт программных систем» им. А.К.Айламазяна РАН, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, доцент ФГБУ ВО «Российский университет дружбы народов»; khmike@inbox.ru

Information about the authors:

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems named RAS, Federal Research Center "Computer Science and Control" RAS; Prof., Federal State Budgetary Institution of Higher Education "Peoples' Friendship University of Russia"; vmh@isa.ru

Mikhail V. Khachumov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher, A.K. Ailamazyan Institute of Program Systems named RAS, Federal Research Center "Computer Science and Management" RAS, Assoc. Prof., Peoples' Friendship University of Russia; khmike@inbox.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.06.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 15.06.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 15.06.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 550.34.01
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75 Оригинальная статья /Original Paper

Определение скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей

Ю.А. Сидоркина[1], Т.Г. Асланов[2], Х.Д. Магомедов[3]
[1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
[1]105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,
[2]Дагестанский государственный технический университет,
[2]367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,
[3]Дагестанский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба» Российской академии наук,
[3]367008, г. Махачкала, ул. Белинского,16, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение скоростей сейсмических волн на местности. **Метод.** Для определения скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры при помощи выборки, полученной путем математического моделирования, была обучена искусственная нейронная сеть. Используя на входе обученной нейронной сети реальные значения разностей времен прихода сейсмических волн на местности, получаем на ее выходе значения скоростей сейсмических волн на местности. **Результат.** Предложен метод определения скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей. Получены зависимости среднеквадратической ошибки определения скоростей сейсмических волн на местности от эпохи обучения, а также распределение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения с использованием полученной информации о структуре земли. **Вывод.** Предложенный метод позволяет определять структуру земной коры более точно, чем ранее предложенные математические методы.

Ключевые слова: нейронная сеть, скорости сейсмических волн, закон Снеллиуса, сейсмология, сейсмический датчик

Для цитирования: Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов. Определение скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта Главы Республики Дагестан.

Determination of seismic wave velocities on the ground using artificial neural networks

Yu.A. Sidorkina[1], T.G. Aslanov[2], H.D. Magomedov[3]
[1]N.E. Bauman Moscow State Technical University (National research University),
[1]5/1 Second Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia,
[2]Daghestan State Technical University,
[2]70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,
[3]Daghestan Branch of the Federal Research Center
"Unified Geophysical Service" of the Russian Academy of Sciences,
[3]16 Belinsky Str., Makhachkala 367008, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the velocities of seismic waves on the ground. **Method.** To determine the velocities of seismic waves in different parts of the earth's crust, using a sample obtained by mathematical modeling, an artificial neural network was trained. Us-

ing at the input of the trained neural network, the real values of the differences in the times of arrival of seismic waves on the ground, we obtain at its output the values of the velocities of seismic waves on the ground. **Result.** A method for determining the velocities of seismic waves on the ground using artificial neural networks is proposed. Dependences of the root-mean-square error in determining the velocities of seismic waves on the ground on the training epoch, as well as the distribution of errors in determining the coordinates of the earthquake hypocenter using the obtained information about the structure of the earth, are obtained. Conclusion. The proposed method makes it possible to determine the structure of the earth's crust more accurately than previously proposed mathematical methods.

Keywords: neural network, seismic wave velocities, Snell's law, seismology, seismic sensor

For citation: Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov, H.D. Magomedov. Determination of seismic wave velocities on the ground using artificial neural networks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (2): 67-75. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75

Acknowledgments. The research was supported by a grant from the Head of the Republic of Daghestan.

Введение. В настоящее время координаты очага землетрясения определяются по времени вступления фаз сейсмических волн, записанных аппаратурой на сейсмических станциях с использованием различных методов (методы сфер или засечек и метод гиперболоидов) [1]. При этом в качестве исходных данных используются скорости сейсмических волн, разности времен пробега сейсмических волн до сейсмических датчиков, координаты мест расположения сейсмостанций, причем, считается, что скорости сейсмических волн для регионов известны. В то же время установлено, что они даже в пределах региона по разным участкам и направлениям отличаются друг от друга.

Ошибки определения координат гипоцентра землетрясения по существующим методам могут превышать десятки или даже сотни километров. Так при локации взрывов в Хибинском массиве проводимых в 1995-1997 годах, при использовании одномерной скоростной модели $IASPEI_{91}$, систематическая погрешность составляла около 50 километров [2]. Всероссийским научно-исследовательским институтом по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям (ВНИИ ГОЧС) МЧС России разработана программа, позволяющая по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек [3], времени суток и т.д. оценить людские потери, что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов [4 – 6].

Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности в основном из-за неверного определения глубины очага землетрясения, что вызвано, в том числе, неверными значениями скоростей сейсмических волн, принятых при расчетах [7]. Так, в частности, во время Иранского землетрясения (с эпицентром в районе г. Бам) 26 января 2003 года Федеральным центром науки и высоких технологий «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям» МЧС России были оценены как без потерь, хотя потери были.

Ошибка возникла в связи с тем, что геофизическими службами Ирана глубина очага была определена неверно (сначала считалось, что глубина равна 33 км, а в последующем – 15 км). После корректировки величины глубины очага землетрясения в исходных данных в программе, расчетные потери были оценены в количестве 30 000 человек. В то же время, только на второй день, по сообщениям официальных иранских властей потери были оценены в пределах от 2 до 40 тысяч человек, на третий день говорилось о 20 000 человек, и, только почти через месяц 21 января 2004 года предварительная оценка потерь составила 35 000 человек [8, 9].

Постановка задачи. В настоящей статье разработан метод определения скоростей сей-

смических волн на исследуемой местности с использованием искусственных нейронных сетей. Для определения скоростей сейсмических волн на разных участках земли была обучена искусственная нейронная сеть. С использованием обучающей выборки из 10 000 землетрясений было проведено обучение искусственной нейронной сети. После обучения нейронной сети на виртуальных землетрясениях с целью получения усредненных скоростей сейсмических волн, на каждом из участков через нейронную сеть были пропущены 10 реально произошедших сейсмических событий в 2020 году на территории Республики Дагестан. Используя скорости полученных сейсмических волн, были оценены ошибки локализации сейсмических событий с использованием данных от 100 реальных землетрясений, произошедших в Дагестане в 2017 году.

Методы исследования. Определяя координаты сейсмического события, используя формулу для нахождения расстояния от сейсмического датчика до гипоцентра землетрясения, получаем ошибку, поясняемую на рис. 1 [10].

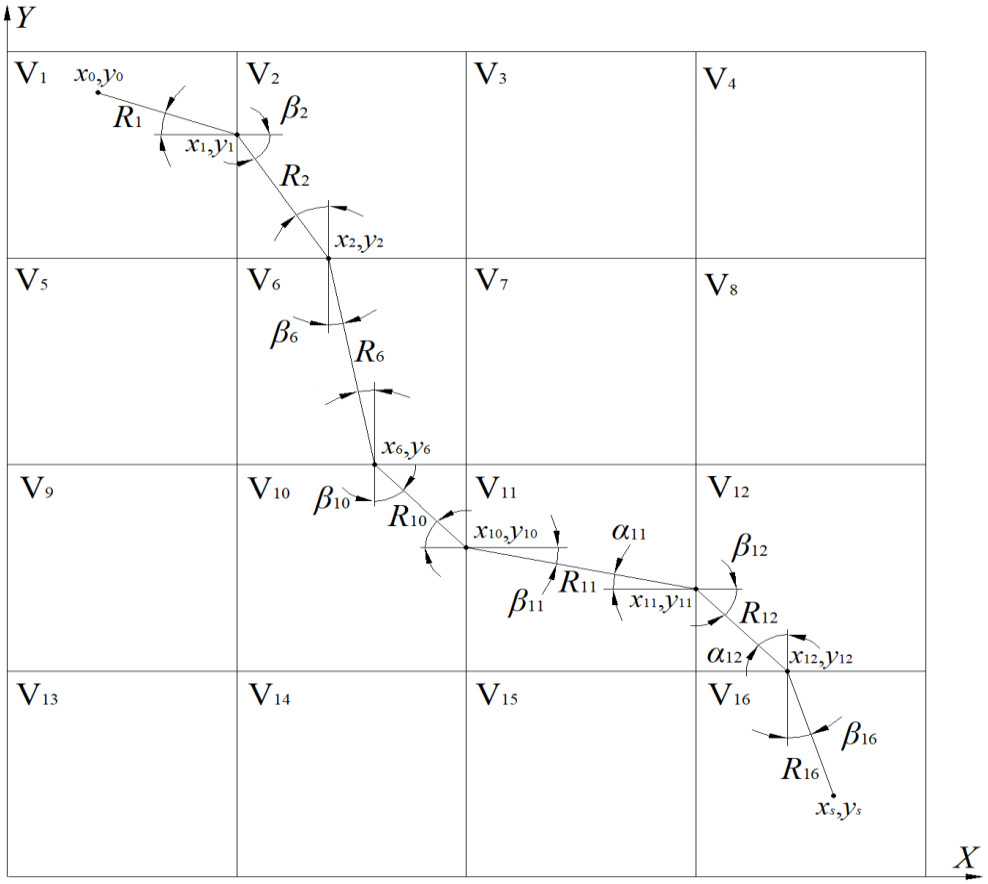


Рис. 1. Геометрические соотношения, поясняющие распространение сейсмической волны в неоднородной среде

Fig. 1. Geometric relations explaining the propagation of a seismic wave in an inhomogeneous medium

Так, сейсмическая волна распространяется не по прямой от очага землетрясения x_0, y_0, до сейсмического датчика с координатами x_s, y_s, а по кривой в соответствии с правилами геометрической оптики (в приведенном примере кривая описана точками x_0, y_0; x_1, y_1; x_2, y_2; x_6, y_6; x_{10}, y_{10}; x_{11}, y_{11}; x_{12}, y_{12} и x_s, y_s).

Исследуемая область представлена шестнадцатью участками с различными скоростями распространения сейсмической волны в каждой из них. В случае распространения сейсмической волны по диагонали с северо-запада на юго-восток, по закону Снеллиуса [11-13], возможные углы распространения сейсмической волны по азимуту будут лежать в диапазоне от 90 до 180 градусов и от 270 до 360 градусов, и, наоборот, при движении с северо-востока на юго-запад от 0 до 90 градусов и от 180 до 270 градусов.

По рис. 1 в соответствии со сказанным можно сделать вывод, что сейсмическая волна, зарегистрированная сейсмическим датчиком, может распространяться либо вправо, либо вниз, откуда вытекает, что для определения возможной траектории сейсмической волны следует рассматривать пересечение траекторий распространения сейсмической волны только с правыми и нижними гранями участков.

Для определения траектории движения сейсмической волны предположим, что нам известно каким образом меняется скорость распространения сейсмической волны по пути ее распространения, при этом участки с одинаковой скоростью имеют форму куба.

Тогда по закону Снеллиуса можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} V_1 \sin\alpha_1 = V_2 \sin\beta_2 \\ V_2 \sin\alpha_2 = V_6 \sin\beta_6 \\ V_6 \sin\alpha_6 = V_{10} \sin\beta_{10} \\ V_{10} \sin\alpha_{10} = V_{11} \sin\beta_{11} \\ V_{11} \sin\alpha_{11} = V_{12} \sin\beta_{12} \\ V_{12} \sin\alpha_{12} = V_{16} \sin\beta_{16} \end{cases} \quad (1)$$

При этом очевидно, что:

$$\begin{cases} \alpha_2 = 90^0 - \beta_2 \\ \alpha_6 = \beta_6 \\ \alpha_{10} = 90^0 - \beta_{10} \\ \alpha_{11} = \beta_{11} \\ \alpha_{12} = 90^0 - \beta_{11} \end{cases} \quad (2)$$

Подставив выражения (2) в систему уравнений (1), получим:

$$\begin{cases} V_1 \sin\alpha_1 = V_2 \sin\beta_2 \\ V_2 \cos\beta_2 = V_6 \sin\beta_6 \\ V_6 \sin\beta_6 = V_{10} \sin\beta_{10} \\ V_{10} \cos\beta_{10} = V_{11} \sin\beta_{11} \\ V_{11} \sin\beta_{11} = V_{12} \sin\beta_{12} \\ V_{12} \cos\beta_{12} = V_{16} \sin\beta_{16} \end{cases} \quad (3)$$

Используя определения тригонометрических функций, получим координаты пересечения сейсмической волны с границами участков с одинаковой скоростью:

$$\begin{cases} (y_s - y_{12})\mathrm{tg}\beta_{16} = (x_s - x_{12}) \\ (x_{12} - x_{11})\mathrm{tg}\beta_{12} = (y_{11} - y_{12}) \\ (x_{11} - x_{10})\mathrm{tg}\beta_{11} = (y_{10} - y_{11}) \\ (y_6 - y_{10})\mathrm{tg}\beta_{10} = (x_{10} - x_6) \\ (y_2 - y_6)\mathrm{tg}\beta_6 = (x_6 - x_2) \\ (x_2 - x_1)\mathrm{tg}\beta_2 = (y_1 - y_2) \\ (y_0 - y_1)\mathrm{tg}\alpha_1 = (x_1 - x_0) \end{cases} \quad (4)$$

В системе уравнений (4) известными являются переменные x_0, y_0, x_1, y_2, y_6, x_{10}, x_{11}, y_{12}, x_s и y_s. Произведя подстановку (3) в (4) после некоторых преобразований, получим уравнения вида:

$$\alpha_1 = f(x_0, y_0, x_1, y_2, y_6, x_{10}, x_{11}, y_{12}, x_s, y_s, V_1, V_2, V_6, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{16}) \quad (5)$$

В соответствии с уравнениями (3) и (4), зная угол α_1, может быть получена искомая траектория распространения сейсмической волны, заданной координатами ломаной кривой. Общее количество возможных комбинаций распространения сейсмических волн составляет – 20,

из которых после решения систем уравнений (1) – (4) количество комбинаций значительно сократится. При этом для дальнейшего анализа в качестве искомой траектории сейсмической волны используем только ту, которая имеет наименьшую разность времён прихода сейсмических волн.

Используем искусственные нейронные сети для определения скоростей сейсмических волн на разных участках земной коры. Для этого создадим компьютерную модель Дагестана, включающую в себя центральный, горный и южный территориальные округа размерами двести на двести километров с размещением на ней 17 сейсмических датчиков с координатами, соответствующими реальным. Исследуемая область была разбита на 16 участков (рис. 2).

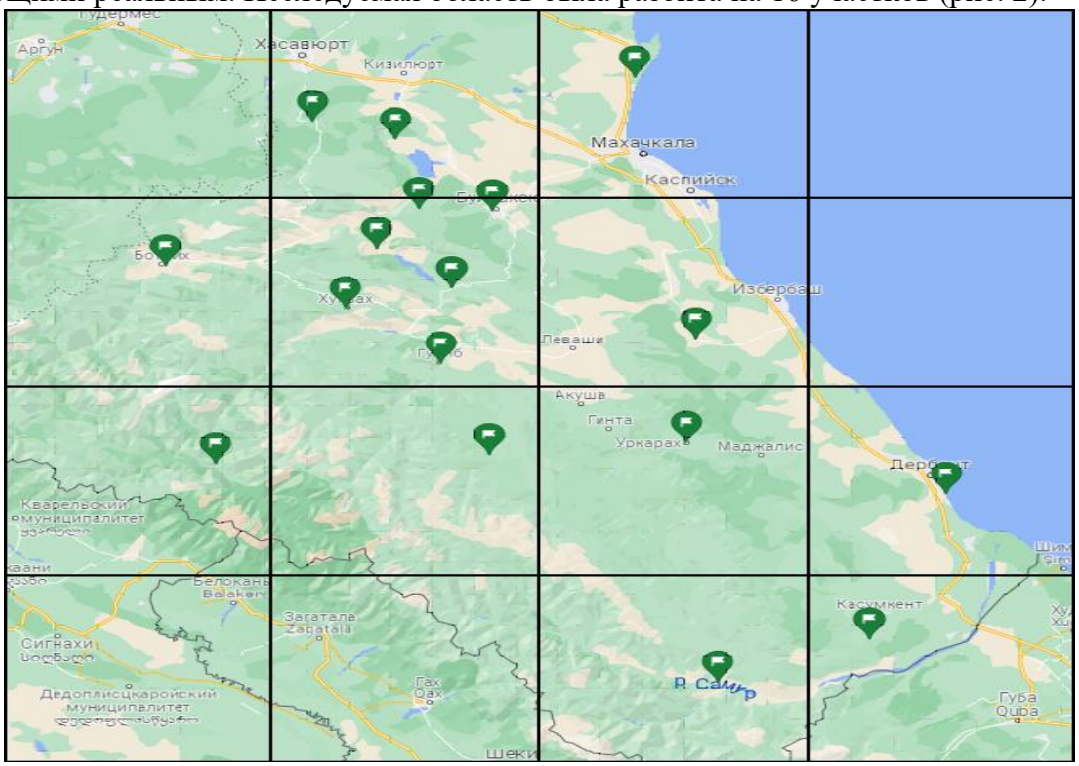


Рис. 2. Модель разбиения территории Республики Дагестан для определения скоростей сейсмических волн

Fig. 2. Model of division of the territory of the Republic of Dagestan to determine the velocities of seismic waves

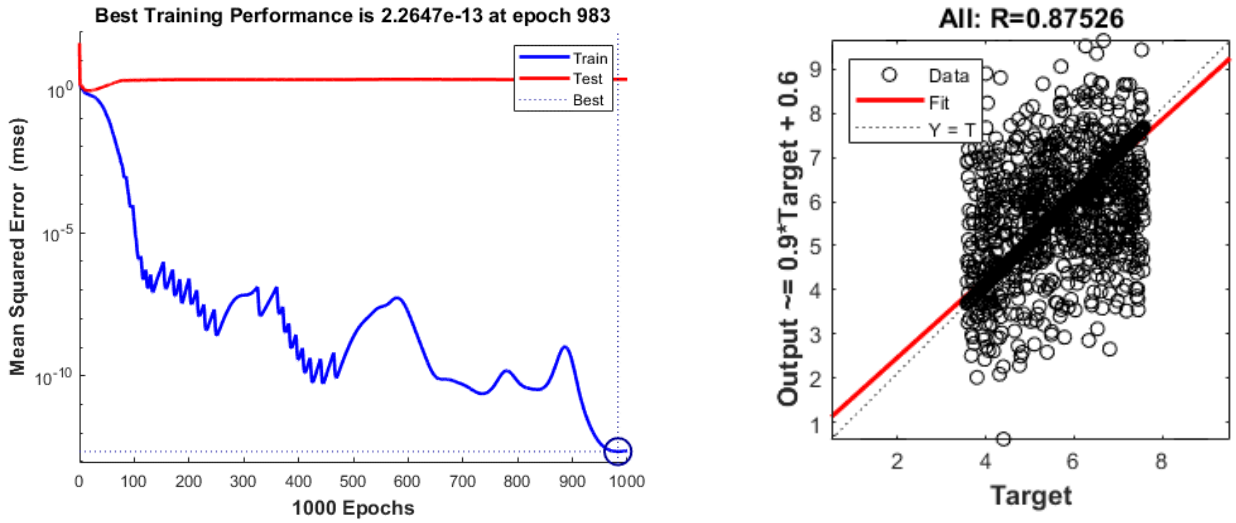
Меняя случайным образом скорости продольных и поперечных сейсмических волн для каждого из 16 исследуемых участков и задавая координаты очага землетрясений, определялись разности времен пробега сейсмических волн к каждому из 17 сейсмических датчиков. При этом для одной комбинации распределения скоростей сейсмических волн, случайным образом задавались координаты десяти сейсмических событий. Таким образом, для обучения искусственной нейронной сети была создана обучающая выборка из 10 000 землетрясений.

Для обучения искусственной нейронной сети использовался многослойная сеть с 50 скрытыми слоями с функцией активации – сигмоида [14-19]. В качестве входов в нейронную сеть использовались нормированные разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн десяти сейсмических событий от гипоцентра землетрясения до каждого сейсмического датчика. Таким образом, у нейронной сети имеется 170 входов. Выходами искусственной нейронной сети являлись скорость продольной сейсмической волны для каждого из 16 участков.

На рис. 3 приведены результаты обучения нейронной сети с 16 входами, на которую подавалась информация о разности времен прихода сейсмических волн на каждый сейсмический датчик, использованием базы из 1000 землетрясений.

Как видно из рис. 3а обучение нейронной сети на обучающей выборке прошло успешно (синяя линия), в тоже время тестовые данные показывают на ошибки работы нейронной сети на данных, обучение по которым не проводилось.

На рис. 3б также видно, что выходные значения нейронной сети (ось ординат) не соответствуют значениям выборки (ось абсцисс) и имеют большой разброс.



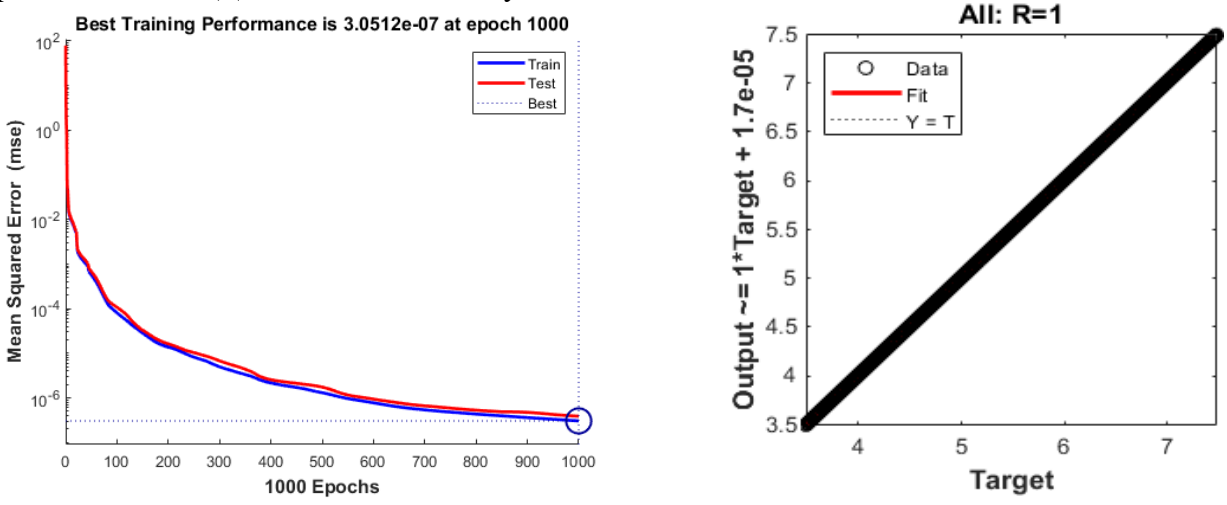
а) б)

Рис. 3. Результаты обучения нейронной сети с вводом одного сейсмического события
Fig. 3. Results of neural network training with input of one seismic event

Одной из причин такого разброса может являться недостаточность входов в нейронную сеть, для формирования результатов на ее выходе.

На рис. 4 приведены результаты обучения нейронной сети со 160 входами, на которую подавалась информация о разности времен прихода сейсмических волн десяти сейсмических событий на каждый сейсмический датчик, с использованием базы из 10 000 землетрясений.

После обучения нейронной сети на виртуальных землетрясениях с целью получения усредненных скоростей сейсмических волн на каждом из участков через нейронную сеть были пропущены 10 реально произошедших сейсмических событий в 2020 году на территории Республики Дагестан. Используя скорости полученных сейсмических волн, были оценены ошибки локализации сейсмических событий с использованием данных от 100 реальных землетрясений, произошедших в Дагестане в 2017 году.



а) б)

Рис. 4. Результаты обучения нейронной сети с вводом десяти сейсмических событий
Fig. 4. Results of training a neural network with the input of ten seismic events

На рис. 5 приведено распределение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения с использованием метода сфер [20].

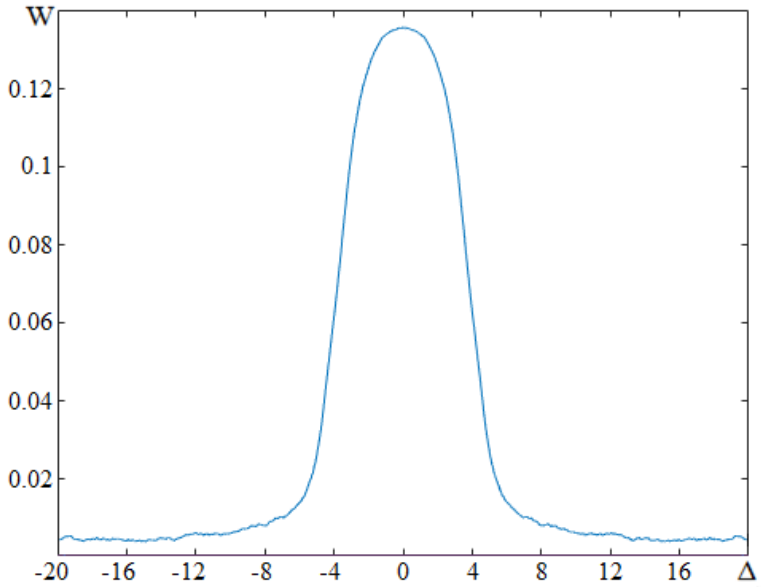


Рис. 5. Проверка адекватности результатов обучения нейронной сети
Fig.5. Checking the adequacy of neural network training results

Обсуждение результатов. Использование 160 входов в нейронную сеть вместо 16 обусловлено необходимостью корректного обучения нейронной сети. При этом для обучения нейронной сети со 160 входами было предпринято более 60 различных попыток обучения нейронной сети с различными распределениями скоростей сейсмических волн и расположением координат очага землетрясения, из которых только одно оказалось успешным.

Увеличение входов в нейронную сеть, либо увеличение обучающей выборки, а также увеличение числа участков, на которых необходимо определить структуру земной коры ведет к значительному увеличению времени обучения нейронной сети.

Как видно по распределению ошибок локализации координат 364 000 сейсмических событий, нейронная сеть, обученная определять скорости лишь на 16 участках земной коры, дает приемлемые результаты. Для более точного определения координат гипоцентра землетрясения необходимо производить правильный выбор сейсмических датчиков на местности [21].

Для более корректного обучения нейронной сети определению скоростей пробега сейсмических волн на различных участках земной коры, необходимо учитывать в расчетах помимо преломления волн на границах сред, еще и их отражения, для отслеживания распространения волны по естественным волноводам.

Информация о направлении движения сейсмической волны необходима для уменьшения необходимого машинного времени для сбора статистических данных.

Вывод. Приведенные результаты моделирования ни в коем случае не претендуют на окончательность, они, несомненно, нуждаются в уточнении и конкретизации. Однако следует отметить, что нейронная сеть, которая была обучена на математической модели Республики Дагестан и апробирована на 100 реальных землетрясениях, показала значительное уменьшение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения при использовании данных о скоростях сейсмических волн.

Библиографический список:

1. Кульчицкий, В. Е. Новые годографы сейсмических волн крымско-Черноморского региона / В. Е. Кульчицкий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Т. 4 (70). – № 4. – С. 164-173.

2. Скоростные модели. Кольский филиал Единной Геофизической службы РАН [сайт]. — URL: http://krsc.ru/?q=ru/Travel_time_models (дата обращения: 21.06.2022).
3. Шахраманьян, М. А. Технология оценки устойчивочти и сейсмостойкости зданий и сооружений / М. А. Шахраманьян, Г. М. Нигметов, М. Ю. Прошляков // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 2(6). – С. 27-37.
4. Шахраманьян, М. А. Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения: (теория и практика) / М. А. Шахраманьян. 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2000. – 192 с. – ISBN 5-93970-001-2.
5. Морозов, В. Н. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений: (теория и практика) / В. Н. Морозов, М. А. Шахраманьян. – Москва: УРСС, 1998. – 230 с.
6. Асланов Г.К., Алимерденов В.С., Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. Математическая модель для расчета энергетического класса, интенсивности и магнитуды землетрясения в реальном времени. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015;37(2):66-71. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-37-2-66-71
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок определения координат фокуса землетрясения от расчетных методов (сферы и гиперболоиды). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98
8. Рогожин, Е.А. Землетрясение в Иране. География. Электронный журнал, 5 [сайт]. — URL: http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503 (дата обращения: 21.04.2022).
9. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Аномальные ошибки в определении координат очага землетрясений и предложения по их устранению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(4):78-88. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88
10. Артемьев А.Е. Физические основы сейсморазведки: Учебное пособие – Саратов: ООО Издательский Центр «Наука», 2012. – 56с.
11. Дучков, А. А. Геометрическая сейсмика 1. Лучевой метод: учебное пособие / А. А. Дучков. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 63 с. — ISBN 978-5-7782-3842-8. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/99176.html (дата обращения: 21.04.2022)
12. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 306 с.
13. Гольдин С.В. Введение в геометрическую сейсмику: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2005. 264 с.
14. Павлова, А. И. Искусственные нейронные сети: учебное пособие / А. И. Павлова. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 190 с. — ISBN 978-5-4497-1165-6. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/108228.html (дата обращения: 21.06.2022).
15. Барский, А. Б. Введение в нейронные сети: учебное пособие / А. Б. Барский. — 3-е изд. — Москва, Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 357 с. — ISBN 978-5-4497-0309-5. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/89426.html (дата обращения: 21.06.2022).
16. Яхъяева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие / Г. Э. Яхъяева. — 4-е изд. — Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 315 с. — ISBN 978-5-4497-0665-2. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/97552.html (дата обращения: 21.06.2022)
17. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. — М.: Диалог-МИФИ, 2002.
18. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2002. —
19. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Горячая Линия – Телеком, 2010.
20. Т.Г. Асланов, Ю.А. Сидоркина. Определение координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 64-71. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71
21. Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84

References:

1. Kulchitsky V. E. New hodographs of seismic waves of the Crimean-Black Sea region [Uchenyye zapiski Krymskogo federal′nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya] *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology*. 2018; 4 (70): 164-173 (In Russ)
2. High-speed models. Kola branch of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences [website]. — URL: http://krsc.ru/?q=ru/Travel_time_models (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
3. Shakhramanyan M. A. Technology for assessing the stability and seismic resistance of buildings and structures / M. A. Shakhramanyan, G. M. Nigmetov, M. Yu. Proshlyakov. [Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti] *Civil Security Technologies*. 2004; 2 (6): 27-37 (In Russ)
4. Shahramanyan M.A. Seismic risk assessment and earthquake consequences prediction in the tasks of saving the population: (theory and practice) / M.A. Shahramanyan. – 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2000:. 192. ISBN 5-93970-001-2. (In Russ)

5. Morozov V. N. Forecasting and liquidation of the consequences of accidental explosions and earthquakes: (theory and practice) / V. N. Morozov, M. A. Shakhramanyan. - Moscow: URSS, 1998: 230. (In Russ)
6. Aslanov G.K., Alimerdenov V.S., Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. Mathematical model for calculating the energy class, intensity and magnitude of an earthquake in real time. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2015;37(2):66-71. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-37-2-66-71(In Russ)
7. 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 the calculation methods (spheres and hyperboloids). [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye 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)
8. Rogozhin E.A. Earthquake in Iran. Geography. Electronic magazine, 5 [website]. — URL: http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503 (date of access: 04/21/2022). (In Russ)
9. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Musaeva U.A. Anomalous errors in determining the coordinates of the source of earthquakes and proposals for their elimination. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2018; 45(4):78-88. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88 (In Russ)
10. Artemiev A.E. Physical foundations of seismic exploration: Textbook - Saratov: *OOO Publishing Center "Nauka*", 2012: 56. (In Russ)
11. Duchkov A. A. Geometric seismic 1. Ray method: textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2019: 63. - ISBN 978-5-7782-3842-8. Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/99176.html (date of access: 04/21/2022) (In Russ)
12. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. Geometric optics of inhomogeneous media. *M.: Nauka*, 1980: 306. (In Russ)
13. Goldin S.V. Introduction to geometric seismic: textbook. *Novosibirsk: Publishing House of NSU*, 2005: 264. (In Russ)
14. Pavlova A. I. Artificial neural networks: textbook.- Moscow: IP Ar Media, 2021: 190 ISBN 978-5-4497-1165-6. — Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/108228.html (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
15. Barsky A. B. Introduction to neural networks: textbook / A. B. Barsky. - 3rd ed. - Moscow, Saratov: Internet University of Information Technologies (INTUIT), IP Ar Media, 2020: 357 - ISBN 978-5-4497-0309-5. — Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/89426.html (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
16. Yakhyaeva G. E. Fuzzy sets and neural networks: textbook / G. E. Yakhyaeva. - 4th ed. — Moscow: Internet University of Information Technologies (INTUIT), IP Ar Media, 202: 315. - ISBN 978-5-4497-0665-2. — Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/97552.html (date of access: 06/21/2022) (In Russ)
17. Medvedev V. S. Neural networks. MATLAB 6 / V.S. Medvedev, V.G. Potemkin. M.: Dialogue-MEPhI, 2002. (In Russ)
18. Osovsky S. Neural networks for information processing / S. Osovsky; per. from Polish. I.D. Rudinsky. M.: *Finance and statistic*s, 2002. (In Russ)
19. Rutkovsky L. Methods and technologies of artificial intelligence / L. Rutkovsky; per. from Polish. I. D. Rudinsky. - M .: Hot Line - Telecom, 2010. (In Russ)
20. T.G. Aslanov, Yu.A. Sidorkin. Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with a known structure of the earth's crust. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2021; 48(4): 64-71. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71(In Russ)
21. T. G. Aslanov, Kh. D. Magomedov, U. A. Musaeva, Kh. Yu. Tagirov. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84 (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

Магомедов Хаскил Джарулаевич, директор, info@dbgsras.ru

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

Haskil D.Magomedov, Director, info@dbgsras.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11.05.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 02.06.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 02.06.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.588
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-76-86 Оригинальная статья /Original Paper

Метод построения обучающего курса САПР

Хоанг Конг Кинь
Верфь Х52,
провинция Биньзыонг, г. Зиан, ул. Кай За Це, 15/2, Вьетнам

Резюме. Цель. В современных условиях развития электронной промышленности одним из стратегических направлений развития организаций является обучение персонала. Затраты на обучение и возможность их реализации в условиях пандемии СОВИД-19 являются существенными. Целью этой работы является повышение эффективности деятельности проектировщиков в системах автоматизированного проектирования модулей на основе печатных плат (ПП) за счет формирования адаптивного сценария обучения и рекомендаций в соответствие с индивидуальными особенностями проектировщика. М**етод.** В статье проведен обзор методов и систем формирования содержания САПР в различных отраслях, предлагаемые для создания обучающей системы, обновляемые в режиме реального времени, что позволит повысить квалификацию проектировщиков без отрыва от производства. **Результат.** Разработана структура автоматизированной обучающей системы (АОС), отличающаяся моделью предметной области, профилем обучаемого, сценарием обучения и адаптации. Разработан метод построения обучающего курса САПР на предприятии приборостроительной отрасли, отличающийся использованием механизмов взаимодействия моделей обучения, с учетом индивидуальных характеристик обучаемого для формирования адаптивного сценария обучения, позволяющий предоставлять оптимальную траекторию обучения обучаемому с сокращением времени обучения. Исследуемый метод применяется для повышения квалификации проектировщиков по курсу «Проектирование модулей на основе ПП» на верфи Х52 во Вьетнаме. В качестве результатов экспериментов можно заключить следующие: эффективность повышения уровня компетенций проектировщиков на 11,3%, чем традиционный метод, с сокращением общего времени обучения на 25,4%, снижение расходов на дополнительное обучение новых проектировщиков. **Вывод.** Полученные результаты доказывают необходимость разработки адаптивной обучающей системы на основе данного метода построения обучающего курса САПР проектирования модулей на основе ПП. Адекватность данного метода ранее подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Ключевые слова: метод построения обучающего курса, автоматизированное проектирование, адаптивное обучение

Для цитирования: Хоанг Конг Кинь. Метод построения обучающего курса САПР. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (2): 76-86. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-76-86

Method for constructing a CAD training course

Hoang Cong Kinh
Shipyard X52,
15/2, Cay Da Xe, Binh Duong, Di An, Vietnam

Abstract. Objective. In the development of the electronic industry, one of the strategic directions for the development of organizations is personnel training. The costs of training and the implementation of training courses in the context of the COVID-19 pandemic are significant. The purpose of this work is to increase the efficiency of engineers' activities in computer-aided modular design systems based on printed

circuit boards (PCB) through the formation of the necessary competencies and recommendations for the designer. **Method.** The article provides an overview of methods and systems for the formation of CAD content in various industries. It is proposed to create a training system updated in real time, which will improve the skills of engineers and overcome gaps in production The structure of an automated learning system (AOS) is developed. What makes this structure different from others is an ontological model domain and an adaptive model. An adaptive method has been developed for constructing a CAD training course for enterprises in the instrument manufacturing industry, which is distinguished by the use of mechanisms for the interaction of learning models. The individual characteristics of the engineer being trained to form an adaptive learning scenario are taken into account in these learning models. This allows providing the optimal learning trajectory to the student with a reduction in learning time. **Result**. This research method is used to improve the skills of engineers in the course "Design of modules based on PP" at the X52 shipyard in Vietnam. As the results of the experiments, we can achieve a result that this effective method increases the level of engineering competence by 11.3% and decreases the total training time by 25.4 % compared to +the traditional method. Moreover, this method also reduces the cost of additional training for new engineers. **Conclusion.** The obtained results demonstrate the need to develop an adaptive training system. Thank to this method, the competency of the software-based modular design engineers will be developed. The adequacy of this method has been previously confirmed by the experimental data and the previous studies.

Keywords: training course construction method, computer-aided design, adaptive learning

For citation: Hoang Cong Kinh. Method for constructing a CAD training course. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 76-86. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-76-86

Введение. В условиях ужесточения требований к качеству, надежности и эффективности эксплуатации современных средств и изделий важнейшую роль в технологических процессах исполняет инженер - проектировщик. При этом ставятся задачи автоматизации указанных процессов, а также создания и развития цифровых технологий и интеллектуальных производств, что подтверждается следующими публикациями.

В [1] описана методология анализа и контроля безопасности судна как сложной организационно-технической системы. В работе предложены методы снижения опасности эксплуатации и длительного хранения сложных организационно-технических систем с научной, технической, эргономической и экономической точек зрения. Предложено решение проблемы эксплуатации судов на основе реализации организационно-технических мероприятий, технического обслуживания и ремонта, обучения персоналам. Однако обеспечение безопасности судов являются задачами проектировщиков, строителей и эксплуатирующих их организаций, что не позволяет в полной мере описывать методологию анализа и контроля безопасности судов.

В [2] рассмотрена задача автоматизации информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов. В работе предложено использовать комбинированные модели и методы теории искусственного интеллекта для системы автоматизированного проектирования прикладного программного обеспечения с целью решения поставленной задачи. Использована онтологическая система в интеллектуальной системе автоматизированного проектирования прикладного программного обеспечения, позволяющая создавать взаимосвязанную расширяемую систему моделей с различными аспектами предметной области. Разработана модель представлений знаний, которая позволяет извлечь и формировать знания экспертов на всех этапах жизненного цикла проектирования, осуществлять интеграцию разнородных данных на этапах жизненного цикла изделий.

В [3] разработаны методы и средства компьютерных систем обучения автоматизированному проектированию машиностроительных объектов. Предложены адаптивные обучающие системы с методом синтеза траектории обучения, метод корректировки профиля обучаемого

посредством автоматического анализа выполненных им операций в программных средствах, которые позволяют сократить время и повысить эффективность процесса обучения. Разработаны модели обучающей системы и метод формирования рекомендаций и корректировки профиля обучаемого на основе выполнения практических заданий, которые позволяют повысить эффективность практической подготовки.

Работа [4] посвящена описанию метода формирования и использования цифрового паспорта электронного изделия на предприятиях приборостроительной отрасли. Метод основан на формировании обобщенных проектно-производственных процедур и видов данных об изделии, формируемых средствами систем управления для построения онтологической модели изделия в приборостроительной отрасли. Представлены этапы выполнения метода разметки базовой онтологии и извлечения субонтологии, которые могут применяться для генерации проектного решения на предприятиях приборостроительной отрасли и позволяют разработать сигнатуры и семантики унифицированных сервисов для применения цифрового паспорта.

Анализ указанных работ позволяет сформировать механизмы интеграции с пакетами САПР и автоматическое включение гибридных знаний и единиц опыта предприятия в процесс повышения квалификации профиля проектировщика.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является разработка метода формирования адаптивного сценария обучения САПР в соответствии с начальными уровнями знаний обучаемых инженеров и требованиями предприятий к подготовке специалистов.

Методы исследования. Этапы метода построения обучающего курса. Для разработки метода необходимы следующие исходные данные:

- уровень владения инженером компетенциями по проектированию модулей на основе ПП перед обучением $У_{К0} = [0,1)$;
- перечень компетенций $Т_р$, формируемых в результате освоения обучающего курса по проектированию модулей на основе ПП;
- количество и опыт экспертов по проектированию модулей на основе ПП.

Модель предметной области – процесса проектирования модулей на основе ПП – состоит из множества терминов предметной области (Р), множества проектных решений (П), матрицы составлений объектов (М), матрицы отношений ($М_Р$), множества утверждений (Е), множества вопросов теста (Т), множества практических заданий (З) и представляется в виде [5, 6]:

$$С =< Р, П, М, М_Р, З, Е, Т >,$$

где $Р = \{р_0, р_Ц, р_Т, р_П, р_Л, р_{Пр}, р_Д, р_К\}$ – множество терминов предметной области ($р_0$ – множество объектов; $р_Ц$ – цель обучения; $р_Т$ – темы знаний; $р_П$ – понятия; $р_Л$ – учебные лекции; $р_{Пр}$ – справочник; $р_Д$ – дополнительный источник; $р_К$ – компетенции по проектированию модулей на основе ПП);

$M = |l_{ij}|$ – матрица составлений объектов;

$М_Р = \begin{vmatrix} м_{11} & м_{12} \dots & м_{1с} \\ м_{21} & м_{22} \dots & м_{2с} \\ \dots & \dots \dots & \dots \\ м_{в1} & м_{в2} \dots & м_{вс} \end{vmatrix}$ – матрица отношений между объектами, имеющие отношения «изучается учебную лекцию $р_{Лх}$ после $р_{Лу}$;

$П = (П_1, П_2, \dots, П_а)$ – множество a проектных решений;

$Е = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$ – множество утверждений (где E_1 – лекции состоят из тем (в случае, если тема А входит в лекцию В, которое изучается в ходе лекции С, то тема А изучается в ходе лекции С); E_2 – темы состоят из понятий (в случае, если тема А базируется на понятии В, которое входит в понятие С, то тема А состоит из понятия С); E_3 – последовательность изучаемых тем (в случае, если тема А состоит из понятия В, которое изучается после понятия С, и тема Н состоит из понятия С, то тема А изучается после темы Н); E_4 – тема изучается после понятия, в случае тема А изучается после темы В и тема В базируется на понятии С, то тема А изу-

чается после понятия С; E_5 – понятие изучается после темы, в случае понятие А изучается после понятия В и тема С состоит в понятии В, то понятие А изучается после темы С);

$\mathrm{Т} = (\mathrm{Т}_1, \mathrm{Т}_2, \ldots, \mathrm{Т}_к)$ – множество к текстовых вопросов;

$\mathrm{З} = (\mathrm{З}_1, \mathrm{З}_2, \ldots, \mathrm{З}_н)$ – множество н практических заданий;

Модель обучаемого проектировщика представляет собой систему из проектных характеристик обучаемого проектировщика: знаний, умений, навыков, адаптивности, компетентности и функций их оценки [7, 16, 17].

Модель обучаемого имеет вид:

$$\mathrm{А}_П = \{\mathrm{У}_0, \mathrm{Ц}_И, \mathrm{А}_{сц}, \mathrm{У}_з, \mathrm{У}_у, \mathrm{У}_н, \mathrm{У}_а, \mathrm{У}_к, \mathrm{О}_б, \mathrm{Р}_к, \mathrm{Т}_в, \mathrm{К}_д\}$$

где $\mathrm{У}_0$ – уровень владения знаниями обучаемого перед обучением;

$\mathrm{Ц}_И$ – цели изучения обучаемого в данном курсе;

$\mathrm{А}_с$ – множество тем знаний, которые предоставляют обучаемым изучать в сценарий обучения;

$\mathrm{У}_з$ – массивы владения знаниями обучаемого в процессе обучения;

$\mathrm{У}_у$ – массивы владения умениями обучаемого в процессе обучения;

$\mathrm{У}_н$ – массивы владения навыками обучаемого в процессе обучения;

$\mathrm{У}_И$ – рейтинговый балл обучаемого в процессе обучения;

$\mathrm{О}_б = \{\mathrm{О}_{бТ}, \mathrm{О}_{бП}\}$ – ошибки обучаемого в процессе обучения, в том числе $\mathrm{О}_{бТ}$ – ошибки обучаемого в процессе выполнения тестов, $\mathrm{О}_{бП}$ – ошибки обучаемого в процессе выполнения практического задания;

$\mathrm{Р}_к$ – рекомендации обучаемым автоматически формируются системой для устранения ошибок;

$\mathrm{Т}_в$ – суммарное количество времени изучения учебного материала в процессе обучения;

$\mathrm{К}_д$ – суммарное количество действий при прохождении в процессе выполнения практического задания.

Модель адаптации работает по принципу цикличного отслеживания состояния модели обучаемого: в зависимости от результата входного теста, целей обучения и успеваемости обучаемого каждого модуля прогнозируется достижение целенаправленных компетенций из множества целей курса и формируется изучаемый материал [8, 9, 19].

Отслеживание состояния профиля обучаемого осуществляется посредством результатов промежуточного теста и решения практического задания после освоения учебной лекции модуля. Модель адаптации имеет вид:

$$\mathrm{М}_А = (\mathrm{М}_Ф, \mathrm{М}_С, \mathrm{М}_П, \mathrm{М}_М, \mathrm{М}_Т, \mathrm{М}_Н)$$

где $\mathrm{М}_Ф$: $\mathrm{Т}_х \rightarrow \{\mathrm{Оп}_x\}$ – функция отображения темы объекта на множество операций выполнения практического задания;

$\mathrm{М}_С$: $\mathrm{Оп}_y \rightarrow \{\mathrm{Т}_у\}$ – функция отображения операции проектного решения на множество тем объекта;

$\mathrm{М}_М$ – функция отображения результата обучаемого на построения следующего сценария изучения учебных материалов

$$\mathrm{М}_М = \begin{cases} \mathrm{М}_{Р1} \text{ если } \mathrm{Р}_М < 5; \\ \mathrm{М}_{Р2} \text{ если } 5 \le \mathrm{Р}_М < 7; \\ \mathrm{М}_{Р3} \text{ если } 7 \le \mathrm{Р}_М < 9; \\ \mathrm{М}_{Р4} \text{ если } 9 \le \mathrm{Р}_М \le 10. \end{cases};$$

$\mathrm{М}_Т = \mathrm{О}_{бу} \rightarrow \{\mathrm{Т}_х\}$ – функция отображения рекомендации повторного изучения х-ой темы на у-ой ошибке теста;

$\mathrm{М}_Н = \mathrm{О}_{бПi} \rightarrow \{\mathrm{Оп}_j\}$ – функция отображения рекомендации повторного выполнения j-ой операции практического решения на i-ой ошибке практического решения;

Решение задачи построения обучающего курса заключается в определении параметров модели сценария обучения, которые удовлетворяют перечню формируемых компетенций $Т_р$. Элементы модели сценария обучения находятся в составе модели предметной области: $Мо_{сц}$ и С принимают значения учебных лекций, понятий, тем, справочников, тестов и практических заданий. Модель сценария обучения формирует индивидуальный сценарий обучения в зависимости от начального уровня знаний обучаемого.

В предлагаемой системе АОС взаимодействуют модель обучаемого, модель предметной области, блок тестов, блок практического задания, подсистема анализов результатов обучаемого и виртуальный учитель.

Модель сценария представлена в виде:

$$Мо_{сц} = \{М_Т, М_П, М_Л, М_{Пр}, М_{Те}, М_з\},$$

где $М_Т = (М_{Т1}, М_{Т2}, \dots, М_{Та})$ $р_Т$ – множество тем;

$М_П = (М_{П1}, М_{П2}, \dots, М_{Пх})$ $р_П$ – множество понятий,

$М_Л = (М_{Л1}, М_{Л2}, \dots, М_{Лb})$ $р_Л$ – множество учебных лекций,

$М_{Пр} = (М_{Пр1}, М_{Пр2}, \dots, М_{Прх})$ $р_{Пр}$ – множество справочников,

$М_{Те} = (М_{Те1}, М_{Те2}, \dots, М_{Тес})$ – множество тестов,

$М_з = (М_{З1}, М_{З2}, \dots, М_{Зd})$ – множество практических заданий.

Выбор значений учебных лекций, понятий, тем, справочников, тестов и практических заданий для формирования сценариев обучения.

Компетенции отмечаются для обучаемого в процессе выполнения входного тестирования и выбора целей обучения $М'_Т$ $М_Т$, $М'_П$ $М_П$, $М'_Л$ $М_Л$, $М'_{Пр}$ $М_{Пр}$, $М'_{Те}$ $М_{Те}$, $М'_з$ $М_з$.

Их предлагается использовать для формирования содержания сценариев обучения.

Этап 1. Компетенции $Т_р$ определяют результат освоения обучающего курса:

$К_{Р1}$ – 1-я компетенция САПР на предприятии приборостроительной отрасли;

$К_{Р2}$ – 2-я компетенция САПР на предприятии приборостроительной отрасли;

…

$К_{Рn}$ – n-я компетенция САПР на предприятии приборостроительной отрасли.

Этап 2. Формирование элементов матрицы составлений объектов $l_{ij} \in М$.

Этап 3. Опрос мнений экспертов для определения соответствия элементов матрицы составлений объектов классов онтологии l_{ij} с компетенциями $К_Р$. Каждый эксперт, э строит матрицу вида:

$$H^{э}_{l_{ij}} = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12}\dots & h_{1n} \\ h6_{21} & h_{22}\dots & h_{2n} \\ \dots & \dots\ \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2}\dots & h_{mn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H^{э}_{11} \\ H^{э}_{12} \\ \dots \\ H^{э}_{ij} \end{vmatrix}$$

где h_{ij}– элементы множества компетенций содержания САПР на предприятиии приборостроительной отрасли, по мнению экспертов, которые необходимо получить после изучения l_{ij}.

Согласованность взглядов участников экспертной группы. В табл. 1 представлены оценки экспертов по содержаниям обучения содержанию САПР на предприятии приборостроительной отрасли.

Характеристикой согласованности взглядов экспертов по классам онтологической модели предметной области является коэффициент конкорданции [10, 11], который вычисляется по формуле:

$$W = \frac{S(\Delta^2)}{S_{max}}$$

где $S(\Delta^2) = \sum_{i=1}^{a} \Delta^2 = S(H_i) - \frac{э(a+1)}{2}$;

$S_{max} = \frac{э^2(а^3-а)-э\sum_{j=1}^{э}\sum_{i=1}^{\Gamma_j}(T_i^3-T_i)}{12}$ – максимально возможная сумма квадратов отклонений для нестрогого ранжирования (Γ_j – количество обществ связных значений по взглядам экспертов; T_i – количество одинаковых значений в группе Γ_j).

Коэффициент конкорданции колеблется в диапазоне [0;1] и отражается уровень согласованности взглядов экспертов. Низкий коэффициент конкорданции (W < 0.5) свидетельствует отсутствие общности взглядов экспертов – исключается этот элемент в дальнейшем рассмотрении, а W = 1 при полной согласованности взглядов экспертов.

Таблица 1. Оценки экспертов по содержаниям обучения содержанию САПР на предприятия приборостроительной отрасли

Table 1. Estimates of experts on the content of training in the content of CAD for enterprises in the instrument-making industry

№	Эксперты Experts / Учебный материал Educational material	1	2	…	э	$S(H_{ij})$	W
1	l_{11}	h_{11}	h_{12}	…	h_{1n}	$S(H_{11})$	W_1
2	l_{12}	h_{21}	h_{22}	…	h_{2n}	$S(H_{12})$	W_2
…	…	…	…	h_{ij}	…	$S(H_{ij})$	…
а-1	$l_{(m-1)n}$	$h_{(m-1)1}$	$h_{(m-1)2}$	…	$h_{(m-1)n}$	$S(H_{а-1})$	$W_{а-1}$
а	l_{mn}	h_{m1}	h_{m2}	…	h_{mn}	$S(H_a)$	$W_а$

Этап 4. Автоматическое формирование сценария обучающего курса согласно достигаемому результату:

- для первичной адаптации построения сценария компетенции обучаемого:

IF ($О_{бТх}$ True) THEN ($О_{бТх} \rightarrow К_{рх}$) AND $Мо_{сцi} = \{\sum_{j=0}^{x} М_{Лj}; \sum_{j=0}^{x} М_{зj}; \sum_{i=0}^{x} М_{зj}\}$,

где $О_{бТх}$ – множество n ошибок обучаемого по входному тестированию по обучающему курсу САПР на предприятии приборостроительной отрасли, x = 1, …, n;

$Мо_{сц}$ – i-ого сценария владения компетенциями для j-ого обучаемого.

Тогда модель обучаемого проектировщика представляется в виде:

$$А_{Пj} = \left\{У_0; Мо_{сцi}; \sum_{i=0}^{a} А_{сцi}; \sum_{i=0}^{b} У_{зi}; \sum_{i=0}^{c} У_{уi}; \sum_{i=0}^{d} У_{нi}; \sum_{i=0}^{h} т_{вi}\right\}$$

- для промежуточной адаптации построения сценария компетенции обучаемого:

IF ($О_{бТх}$ True) AND ($О_{бПу}$ True) THEN ($О_{бТх}$ $Т_х$) AND ($О_{бПу}$ $О_{Пу}$);

IF $Р_{Мi} < 5$ THEN «Изучение $М_{Р1}$»;

IF $5 \leq Р_{Мi} < 7$ THEN «Изучение $М_{Р2}$» «Повторное изучение тем $Т_х$» «Повторное выполнение у-ой операции»;

IF $7 \leq Р_{Мi} < 9$ THEN «Изучение $М_{Р3}$» «Повторное изучение тем $Т_х$» «Повторное выполнение у-ой операции»;

IF $9 \leq Р_{Мi} \leq 10$ THEN «Изучение $М_{Р4}$» «Повторное изучение тем $Т_х$» «Повторное выполнение у-ой операции»;

- модель обучаемого автоматически обновит достигаемые успеваемости по формуле:

$$А_{Пj} = \left\{У_0; Мо_{сцi}; \sum_{i=0}^{a} А_{сцi}; \sum_{i=0}^{b} У_{зi}; \sum_{i=0}^{c} У_{уi}; \sum_{i=0}^{d} У_{нi}; \sum_{i=0}^{g} У_{кi}; \sum_{i=0}^{l} У_{Иi} \sum_{i=0}^{h} т_{вi}; \sum_{i=0}^{m} К_{дi}\right\}$$

Этап 5. После получения общих взглядов экспертов формирует учебные материалы $Мо_{сцi}$ по требуемым компетенциям обучаемого для их дальнейшего изучения и проверки достигнутого уровня компетенций.

Шаг 3 – 5 повторяется до тех пор, когда обучаемый инженер владеет всеми необходимыми компетенциями для проектирования объектов САПР на предприятии приборостроительной отрасли.

На рис. 1 представлена общая схема метода построения обучающего курса содержания САПР на предприятии приборостроительной отрасли.

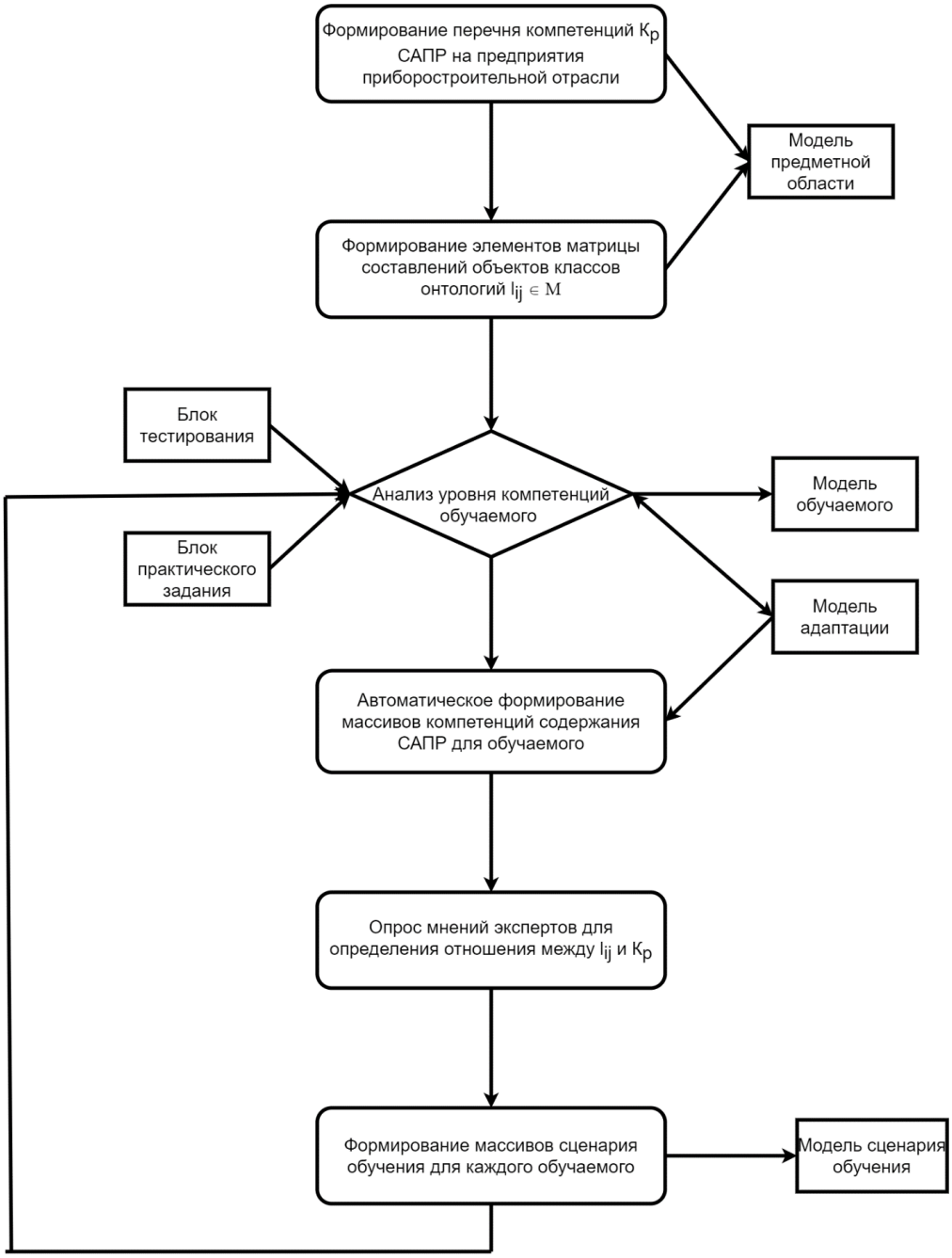


Рис.1. Общая схема метода построения обучающего курса содержания САПР на предприятия приборостроительной отрасли

Fig.1. The general scheme of the method for constructing a training course for the content of CAD for enterprises in the instrument-making industry

Обсуждение результатов. Применение метода построения обучающего курса на верфи X52 во Вьетнаме.

Пример перечня формируемых компетенций по курсу «Проектирование модулей на основе ПП» в верфи X52 [12, 18]:

$К_{Р1}$ – способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения;

$К_{Р2}$ – способность разрабатывать проектную и техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы;

$К_{Р3}$ – готовность осуществлять контроль соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям;

$К_{Р4}$ – готовность применять современные средства выполнения и редактирования изображений и чертежей и подготовки конструкторско-технологической документации;

...

$К_{Рn}$ – навыки оценки качества проектирования модулей ПП.

Пример множества учебной лекции по курсу «Проектирование модулей на основе ПП» [13, 14]:

- l_{11} – параметры этапа заключения договора ERP;
- l_{21} – параметры этапа заключения договора PDM;
- l_{31} – параметры этапа заключения договора СЭД;

...

- l_{81} – параметры этапа производства QMS;
- l_{82} – параметры этапа производства MES;
- l_{83} – параметры этапа производства PDM.

Пример критерия для оценки набора компетенций обучаемого по проектированию модулей на основе ПП на верфи X52, Вьетнама:

+ Недостаточный набор компетенций, при наличии которого обучаемый частично проявляет компетенции проектирования печатных плат, понимает необходимость нужных навыков и стремится к ним, но у него это не всегда получается. Критерии на данном уровне состоят из понимания основных принципов работы цифровых и аналоговых схем печатных узлов (ПУ), основной элементной базы схемотехнического проектирования ПУ, программы проектирования ПП, знаний основных положений единой системы конструкторской документации (КД), знаний действующих нормативных требований и ГОСТ, знаний основ схемотехники и принципов проектирования модулей на основе ПП, знаний основных прикладных программ автоматизированного проектирования ПП и их назначения. Критерии включают умения сбора и анализа исходных данных для выбора структурных функциональных и принципиальных схем, умения отбора элементной базы при разработке принципиальных схем модулей с учетом требований технического задания.

+ Базовый набор компетенций – на данном уровне обучаемый владеет требуемыми навыками и представлением о проектировании модулей на основе ПП, а также о несложных проектах. Критерии на данном уровне включают критерии предыдущих уровней и состоят из: знания комплектности конструкторских документов на узлы и блоки, выполненных на ПП; знания автоматизированных методов разработки КД; знания стадии разработки конструкторской документации; знания факторов, влияющих на качество проектирования моделей на основе ПП; знания основ проектирования технологического процесса; знания признаков квалификации ПП; знания основных свойств материалов ПП; умения описать работу проектируемого модуля на основе анализа электрических и функциональных схем; умения выполнять чертежи структурных и электрических принципиальных схем; умения применять прикладные программы для моделирования электрических схем; умения компоновать и размещать компоненты на ПП; умения оформлять КД на односторонние и двусторонние ПП; умения выполнять основные расчеты базовых технических несложных проектируемых модулей; владения навыком моделирования электрических схем с ис-

пользованием прикладных программ; владение опытом разработки и оформления проектной КД в процессе проектирования ПП модулей; владения навыком анализа ТЗ при проектировании ПП модулей; владения навыком применения автоматизированных методов проектирования ПП модулей.

+ Продвинутый набор компетенций – на данном уровне обучаемый владеет высоким навыком проектирования модулей на основе ПП, может выполнять роль руководителя среднего уровня и способен справляться с ситуациями повышенной сложности. Критерии на данном уровне включают критерии предыдущих уровней и состоят из: знания типового технологического процесса и его составляющих; знания особенности производства ПП модулей; знания способов описания технологического процесса; владения навыком трассировки проводников ПП; умения выбора и расчета элементов печатного рисунка; владения навыком расчета конструктивных показателей и компоновочных характеристик ПП; владения навыком расчетов габаритных размеров ПП и выбора типоразмеров ПП; владения навыками разработки конструкции ПП с учетом воздействия внешних факторов; владения навыками разработки функциональных и структурных ЭПС на основе анализа состояния и требования к ПП; владения навыками разработки проектно-конструкторской документации ПП средней сложности.

+ Высокий набор компетенций – на данном уровне обучаемый сам применяет необходимые навыки в проекте и создает возможности развивать компетенции другим обучаемым-инженерам. Критерии на данном уровне включают критерии предыдущих уровней и состоят из: знания способов описания технологического процесса; знания технологических процессов производств ПП модулей; знания методов автоматизированного проектирования модулей на основе ПП; знания методов оценки качества проектирования ПП; умения разрабатывать чертежи ПП в программах САПР ПП; владения навыками анализа конструктивных показателей технологичности ПП; владения навыками разработки проектно-конструкторской документации ПП более средней сложности; владения навыками оценки качества проектирования ПП модулей.

Для оценки эффективности этого метода были применены экспертизы на группах обучаемых - инженеров верфи. Основными параметрами данного исследования являются 2 группы обучаемых - инженеров по 9 человек, длительность исследования 2 месяца со средним уровнем навыков 0,4 [15]. Целью обучения является формирование у обучаемого-инженера компетенций по проектированию модулей на основе ПП: способность работать с интерфейсом; приобретение навыков построения эскизов, компонентов, электрических принципиальных схем и печатных плат; владения умениями и навыками моделирования печатных плат. Данные результатов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения традиционного и адаптивного сценария обучения
Table 2. Comparison results between traditional and adaptive learning scenarios

Параметры Parameter	Средний уровень компетенций обучаемого до обучения The average level of competencies of the trainee before training	Средний уровень компетенций обучаемого после обучения The average level of competence of the trainee after training	Среднее время изучения, ч. Average time of study, h.	Среднее время выполнения тестов, ч. Average test execution time, h.	Среднее время выполнения проектов, ч. Average project completion time,	Общее время обучения, ч. Total training time, hours
Традиционный сценарий Traditional scenario	0,4	0,77	10,92	2,72	8,9	22,54
Адаптивный сценарий Adaptive scenario	0,4	0,87	9,3	2,32	5,2	16,82
Сравнение Comparison	-	11,3%	14,9%	14,7%	41,5%	25,4%

В одной группе проводилось обучение по интеллектуальной адаптивной системе, в другой группе – обучение по стационарным.

Вывод. Обзор методов и систем формирования содержания САПР на предприятии приборостроительной отрасли позволяет сформировать механизмы интеграции с пакетами САПР и автоматическое включение гибридных знаний и единиц опыта предприятия в процесс обучения. Разработана структура АОС, состоящая из модели предметной области, модели обучаемого проектировщика, модели адаптации, модели сценария обучения, блока тестов и практического задания. Модель предметной области АПР классифицируется по темам, понятиям, учебным лекциям, целям и компетенциям и позволяет персонифицировать процесс обучения. Модель обучаемого проектировщика автоматически обновит данные достигаемых успеваемостей обучаемого в процессе изучения.

Разработан адаптивный метод формирования содержания обучения САПР на предприятии приборостроительной отрасли, отличающийся использованием механизмов взаимодействия моделей обучения для формирования компетенций обучаемого, с учетом индивидуальных характеристик обучаемого, позволяющий предоставлять оптимальную траекторию обучения с сокращением времени обучения.

Отметим, что предложенные методы носят небольшой затратный характер. В качестве результатов экспериментов можно сделать вывод: эффективность повышения уровня компетенций инженеров на 11,3%, чем традиционный метод с сокращением общего времени обучения на 25,4%, снижение расходов на дополнительное обучение новых инженеров. В этом случае с адаптивной обучающей системой отсутствие выступающей роли преподавателя сказывается на количестве успешно завершающих онлайн курсов.

Полученные результаты доказывают необходимость разработки адаптивной обучающей системы на основе данного метода формирования уровня компетенций инженеров проектирования модулей на основе ПП. Адекватность данного метода ранее подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Библиографический список:

1. Белов О. А. Методология анализа и контроля безопасности судна как сложной организационно-технической системы // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2015. - №34. – С. 12-18.
2. Охтилев П.А. Интеллектуальный комплекс автоматизированного проектирования систем информационно-аналитической поддержки жизненного цикла сложных объектов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 11. С. 963–971. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-11-963-971
3. А. П. Пинков, А. Н. Афанасьев, Н. Н. Войт, Д. С. Канев, Разработка методов и средств компьютерных систем обучения автоматизированному проектированию машиностроительных объектов // Автоматизация процессов управления, 2017. №1 (47). С. 75-84.
4. Донецкая Ю.В. Метод формирования и использования цифрового паспорта электронного изделия на предприятиях приборостроительной отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 969–976. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976
5. А. И. Гайкович, Основы теории проектирования сложных технических систем // Моринтех, стр. 216, Санкт Петербург, 2001 г.
6. Д. С. Канев, Разработка моделей, методов и средства формирования профиля компетенций проектировщика в процессах автоматизированного проектирования машиностроительных объектов (на примере САПР КОМПАМС), стр. 186, Ульяновск, 2016 г.
7. Хоанг К., Авксентьева Е. Ю, Федосов Ю. В., Нгуен В. Т., Адаптивное обучение автоматизированному проектированию печатных плат судовых интегрированных систем управления // Автоматизация. Современные технологии, Т. 75, №1, 2021 г. Москва, Стр. 44-48.
8. Л. А. Растрипин, Адаптация сложных систем // Рига «Зинатне», 1981 г., Стр. 375.
9. А. Д. Цвиркун, Структура сложных систем //Советское радио, Москва, 1975 г., Стр. 202
10. Анохин А.Н. Методы экспертных оценок: учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 1996. 148 с.
11. Медведев Ю. В., Методология формирования системы компетенций в компании // Вестник университета, №2, 2013 г., Стр. 145 – 149.
12. Хоанг К., Авксентьева Е. Ю., Нгуен К., Компетентностная модель проектировщика печатных плат для судовых интегрированных систем управления // International Journal of Advanced Studies, Том 10, №3, 2020 г., Стр. 99-113.
13. Седыкин Ф. В., Электрохимическая обработка в технологии производства РЭА // Энергия, Москва, 1980 г., Стр. 139.
14. Пирогова Е. В., Проектирования и технология печатных плат // Высшее образование, Москва, 2005 г., Стр. 562.

15. К. К. Хоанг, Ю. В. Донецкая. Оценка результативности использования интеллектуальной адаптивной системы обучения проектированию модулей на основе печатных плат // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Том 48, №4, Стр.139 – 147.
16. Robert A. S., Jessica S., Adaptive instructional systems. Design and evaluation // Held as Part of the 23rd HCI International conference, Part I, 2021. P 1-3.
17. Vijay K., Sarat K. P., Feature engineering for machine learning and deep learning assisted wireless communication // Metaheuristics in machine learning: theory and applications, V 967, 2021, P. 77-95.
18. Amit K. T., Terrance F. F., Shashvi M., Shabnam K., Intelligent automation systems at the core of industry 4.0 // International conference on intelligent systems design and applications, 2021, P. 1-18.
19. Nuria O., Fernando P. C., Stefan K., Jose A., Machine learning and knowledge discovery in databases. Research track // Joint European conference on machine learning and knowledge discovery in databases, P II, 2021, P 1-3.

References:

1. Belov O. A. Methodology of analysis and control of ship safety as a complex organizational and technical system. [Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] *Bulletin of the Kamchatka State Technical University*. 2015; 34: 12-18. (In Russ)
2. Okhtilev P.A. Intellectual complex of computer-aided design of information and analytical support systems for the life cycle of complex objects. [Izvestiya VUZov. Priborostroyeniye.] *Izvestiya VUZov. Instrumentation*. 2018; 61(11): 963–971. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-11-963-971(In Russ)
3. Pinkov A. P., A. N. Afanasiev, N. N. Voit, D. S. Kanev, Development of methods and means of computer systems for teaching automated design of machine-building objects. [Avtomatizatsiya protsessov upravleniya] *Automation of control processes*, 2017; 1 (47): 75-84. (In Russ)
4. Donetskaya Yu.V. Method for the formation and use of a digital passport of an electronic product at the enterprises of the instrument-making industry. [Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki].*Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2021; 21(6):. 969–976. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976 (In Russ)
5. Gaikovich A.I., Fundamentals of the theory of designing complex technical systems. [Morintekh] *Morintekh*, St. Petersburg 2001: 216. (In Russ)
6. D. S. Kanev, Development of models, methods and tools for forming a designer's competency profile in the processes of automated design of machine-building objects (on the example of CAD KOM-PAMS), Ulyanovsk, 2016: 186. (In Russ)
7. Hoang K., Avksentieva E. Yu, Fedosov Yu. V., Nguyen V. T., Adaptive learning for computer-aided design of printed circuit boards for marine integrated control systems. [Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii,] *Automation. Modern technologies*. Moscow. 2021; 75(1): 44-48. (In Russ)
8. L. A. Rastripin, Adaptation of complex systems. [Riga «Zinatne] *Riga "Zinatne*", 1981: 375.
9. Tsvirkun A.D., The structure of complex systems. [Sovet·skoye radio] *Soviet radio*, Moscow, 1975: 202 (In Russ)
10. Anokhin A.N. Methods of expert assessments: textbook. Obninsk: IATE, 1996: 148. (In Russ)
11. Medvedev Yu. V., Methodology for the formation of a system of competencies in a company. [Vestnik universiteta] *Bulletin of the University.* 2013; 2: 145-149. (In Russ)
12. Hoang K., Avksentieva E. Yu., Nguyen K., Competence model of a printed circuit board designer for ship integrated control systems. *International Journal of Advanced Studies*, 2020; 10(3):99-113.
13. Sedykin F.V., Electrochemical processing in the production technology of REA. *Energia*, Moscow, 1980: 139. (In Russ)
14. Pirogova E. V., Design and technology of printed circuit boards. [Vyssheye obrazovaniye] *Higher education*, Moscow, 2005: 562. (In Russ)
15. K. K. Hoang, Yu. V. Donetskaya. Evaluation of the effectiveness of using an intelligent adaptive learning system for designing modules based on printed circuit boards. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.*2021; 48(4): 139 - 147. (In Russ)
16. Robert A. S., Jessica S., Adaptive instructional systems. Design and evaluation. *Held as Part of the 23rd HCI International conference*, Part I, 2021:1-3.
17. Vijay K., Sarat K. P., Feature engineering for machine learning and deep learning assisted wireless communication. *Metaheuristics in machine learning: theory and applications.* 2021; 967: 77-95.
18. Amit K. T., Terrance F. F., Shashvi M., Shabnam K., Intelligent automation systems at the core of industry 4.0 . *International conference on intelligent systems design and applications*. 2021: 1-18.
19. Nuria O., Fernando P. C., Stefan K., Jose A., Machine learning and knowledge discovery in databases. Re-search track. Joint European conference on machine learning and knowledge discovery in databases, P II, 2021: 1-3.

Сведения об авторе:
Хоанг Конг Кинь, соискатель; hoangkinh@yandex.ru
Information about the authors:
Kinh K. Hoang, applicant; hoangkinh@yandex.ru
Конфликт интересов/ Conflict of interest.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 20.05.2022.
Одобрена после/рецензирования Reviced 02.06.2022.
Принята в печать/ Accepted for publication 02.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 69.04
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-87-93 Оригинальная статья / Original Paper

Продольные колебания стержней от динамических и кинематических возмущений

Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. В современной технике широко распространены упругие конструкции сооружений, машин, технических устройств. В реальных условиях стержни испытывают колебания от динамических и кинематических возмущений. Целью работы является разработка методов и алгоритмов решения задач о колебаниях при динамических и кинематических возмущениях. **Метод.** Исследование основано на применении гипотезы плоских сечений и принципа Даламбера. **Результат.** Рассмотрена задача продольного свободного и вынужденного колебаний стержней. В результате найдена функция смещения поперечных сечений в продольном направлении стержня, получены спектры собственных форм φ_n и собственных частот ω_n колебания. **Вывод.** Создан комплекс программ расчета, позволяющий осуществлять решение задач о колебаниях стержней. Получены спектры собственных частот ω_n и собственных форм $\varphi_n(x)$ колебания, найдена $u(x, t)$ – функция смещения поперечных сечений в продольном направлении стержня.

Ключевые слова: однородный стальной стержень, амплитуда колебаний, продольные, свободные и вынужденные колебания, динамические и кинематические возмущения, принцип Даламбера, дифференциальные уравнения, граничные условия, вычислительный комплекс Matlab, поперечные сечения, продольная сила, нормальные напряжения

Для цитирования: Л.А. Барагунова, М.М. Шогенова. Продольные колебания стержней от динамических и кинематических возмущений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 87-93. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-87-93

Longitudinal vibrations of rods from dynamic and kinematic perturbations

L.A. Baragunova, M.M. Shogenova
H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
173 Chernyshevskogo Str., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. In modern technology, elastic structures of structures, machines, and technical devices are widespread. In real conditions, the rods experience oscillations from dynamic and kinematic disturbances. The aim of the work is to develop methods and algorithms for solving problems of oscillations under dynamic and kinematic disturbances. **Method.** The study is based on the application of the hypothesis of flat sections and the d'Alembert principle. Result. The problem of longitudinal free and forced vibrations of rods is considered. As a result, the displacement function of transverse sections in the longitudinal direction of the rod was found, the spectra of natural forms φ_n and natural frequencies ω_n of vibrations were obtained. **Conclusion.** A set of calculation programs has been created, which makes it possible to solve problems of rod vibrations. Spectra of eigenfrequencies ω_n and eigenmodes $\varphi_n(x)$ of vibrations are obtained, and $u(x, t)$ is found, the function of displacement of cross sections in the longitudinal direction of the rod.

Keywords: homogeneous steel rod, vibration amplitude, longitudinal vibrations, free and forced vibrations, dynamic and kinematic perturbations, Dalamber principle, differential equations, boundary conditions, Matlab computer complex, cross-sections, longitudinal force, normal stresses

For citation: L.A. Baragunova, M.M. Shogenova. Longitudinal vibrations of rods from dynamic and kinematic perturbations. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 87-93. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-87-93

Введение. Колебания стержней и стержневых систем длительное время привлекают внимание проектировщиков. Требования к сооружениям, машинам вызвали особый интерес к изучению колебаний от динамических и кинематических возмущений. [1-4]. Продольным свободным и вынужденным колебаниям стержней посвящена обширная библиография. Следует отметить, что они подробно описаны в литературных источниках [5-8].

Постановка задачи. Целью работы является разработка методов и алгоритмов решения задач о колебаниях при динамических и кинематических возмущениях.

Методы исследования. Свободными или собственными являются колебания, возникающие в системе вследствие внешнего возбуждения, из-за чего создается начальное отклонение от положения равновесия. Продолжаются свободные колебания при наличии упругих внутренних сил, восстанавливающих равновесие.

Изобразим расчётную схему и рассмотрим продольные свободные колебания. Рассматривается однородный стержень (рис.1.) с полной массой $m = \rho \cdot A$ (ρ - плотность материала, A – площадь поперечного сечения), совершающий колебания в продольном направлении [9-12]. При этом допускаем применение гипотезы плоских сечений: поперечное сечение стержня плоское и перпендикулярное геометрической оси до деформации таким и после деформации.

Продольные свободные колебания Longitudinal free vibrations

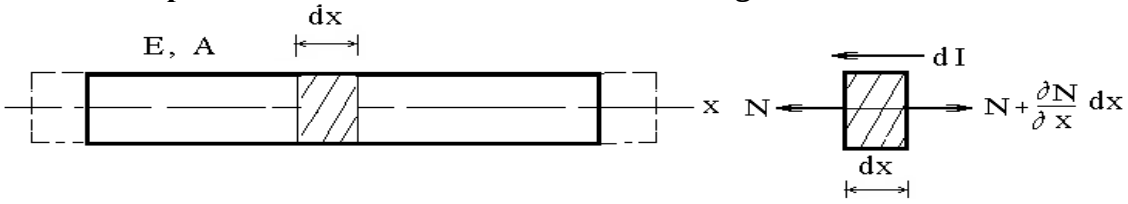


Рис. 1. Расчётная схема. Стержень и выделенный элемент
Fig 1. Calculation scheme. Bar and selected element

По принципу Даламбера принимаем, что все внешние силы, действующие на механическую систему при ее движении, всегда уравновешиваются силами инерции.

Продольные перемещения сечений характеризуются функцией u(x, t). Относительная деформация равна $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ и пропорциональна напряжению. Тогда по закону Гука можно записать

$$N = \sigma A = EA = EA\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}. \qquad (1)$$

A – площадь поперечного сечения, σ – нормальное напряжение, E – модуль Юнга, который зависит от свойств материала и не зависит от формы и размеров. Для получения основного уравнения колебаний рассмотрим равновесие выделенного элемента dx. Сила инерции (Даламберова сила) при этом равна

$$dI = m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}dx$$

Проектируя приложенные силы к выделенному элементу силы на главную ось стержня, получим

$$-N - m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}dx + N + \frac{\partial u}{\partial x}dx = 0 \ .$$

Учитывая (1), перепишем

$$m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \ .$$

После преобразований получаем уравнение поперечного колебания однородного стержня постоянного сечения, являющееся однородным дифференциальным уравнением в частных производных гиперболического типа.

$$utt - a2\,uxx = 0, \qquad x \in (0, l), \quad a^2 = E/\rho \ . \tag{2}$$

Уравнение (2) идентично классическому уравнению свободного колебания однопролетной однородной струны. Добавим к задаче (2) граничные условия, которые могут быть самими разнообразными в зависимости от условий закрепления концов стержня [13-16]. Рассмотрим частный случай жесткого закрепления на обоих концах стержня. При этом граничные условия будут иметь вид

$$u(0, t) = 0, \quad u(l, t) = 0. \tag{3}$$

Решение задачи (2), (3) отыскивается с помощью метода разделения переменных как произведение $u(x, t) = X(x)^{i\omega t}$.

Подстановка по методу разделения переменных в (2) даёт

$X(x) = A \sin kx + B \cos kx$, $k = \omega / a$, $a = \sqrt{E/\rho}$.

И подстановка в граничные условия (3) [$X(0) = 0$, $X(l) = 0$.]

$$Xk(x) = k(A \cos kx + B \sin kx),$$

$$B = 0, \quad \cos k_1 = 0, \qquad k_1 = \frac{\pi(2n-1)}{2l}, \qquad n = 1, 2, \ldots, \qquad \frac{\omega}{a} l = \frac{\pi(2n-1)}{2}.$$

Далее получаем спектр собственных частот колебаний ω_n и собственных форм $\varphi_n(x)$

$$\omega_n = \frac{\pi a(2n-1)}{2l}, \qquad n = 1, 2, \ldots \tag{4}$$

$$X(x) = A \sin kx, \qquad \varphi(x) = \sin kx, \qquad k_n = \frac{\pi(2n-1)}{2l},$$

$$\varphi_n(x) = \sin \frac{\pi(2n-1)}{2l} x \ . \tag{5}$$

Обсуждение результатов. Для входных параметров $a = 1$, $l = 1$ формула (4) дает табл. 1 первых 4-х собственных частот.

Таблица 1. Собственные частоты
Table 1. Natural frequencies

n	1	2	3	4
ω_n	1,5711	4,7121	7,8543	10,9956

Собственные формы колебаний отыскали при помощи вычислительной комплекса MATLAB, который может многократно увеличивать полученный график. Он позволяет с высокой степенью точности получать результаты. Графики показаны на рис. 2.

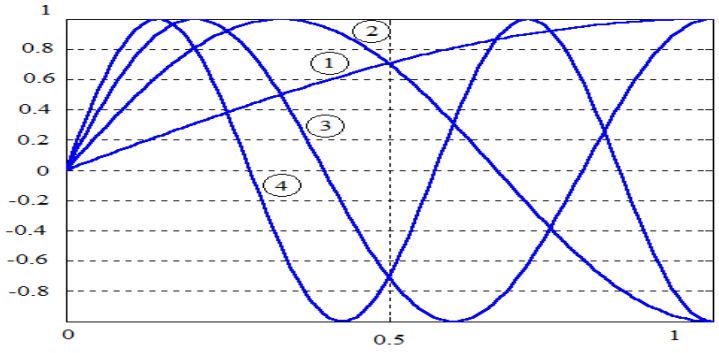


Рис.2. Собственные формы колебаний
Fig.2. Natural waveforms

Вынужденные колебания от динамических возмущений. Вынужденными называются колебания стержней, происходящие при действии на нее в течение всего процесса колебаний внешних периодически изменяющихся вынуждающих сил. При проектировании конструкций,

подверженных вынужденным колебаниям от динамических возмущений, чаще всего стараются подобрать соотношения размеров и масс, чтобы не было резонанса [17-20].

Колебательный процесс позволяет при больших динамических воздействиях сделать амплитуду вынужденных колебаний меньше за счет подбора соотношений между частотами (рис. 3, табл. 2).

При динамическом нагружении функция амплитуд колебаний имеет следующий вид

$$A(x) = \frac{F}{ES} \sin kx \,/\, k\cos kl. \qquad (7)$$

Для амплитуды напряжений имеем формулу

$$A_\sigma(x) = \frac{F}{S}\frac{\cos kx}{\cos kl}. \qquad (8)$$

Из (8) следует, что

$$A_\sigma(l) = \frac{F}{S}, \qquad \omega=0 \Rightarrow A_\sigma(x) = \frac{F}{S}. \qquad (9)$$

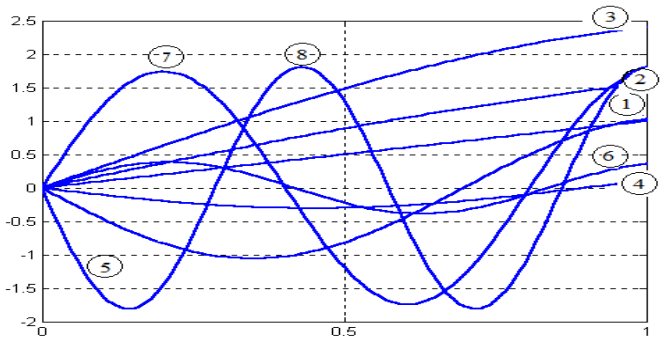


Рис.3. Графики амплитуд H(x) от динамических возмущений
Fig.3. Plots of amplitudes H(x) from dynamic perturbations

Таблица 2. Собственные частоты
Table 2. Natural frequencies

n	1	2	3	4	5	6	7	8
ω_n	0,01	1	1,25	3,5	4,5	7,5	7,78	10,945

Вынужденные колебания от кинематических возмущений. При кинематических возмущениях получена формула

$$A(x) = b(\operatorname{tg} kl \ \sin kx + \cos kx). \qquad (10)$$

Она даёт амплитуду напряжений и её свойства

$$A_\sigma(x) = Ekb\ (\operatorname{tg} kl \ \cos kx - \sin kx), \qquad (11)$$

$$A_\sigma(l) = 0; \quad \omega = 0 \Rightarrow k = 0 \Rightarrow A_\sigma(x) = 0. \qquad (12)$$

В обоих случаях из $\cos kl = 0 \Rightarrow A_\sigma(x) = \infty$, так как при этом частота возмущений ω совпадает с собственными частотами ω_n. Значит, резонанс приводит к бесконечным значениям амплитуды напряжений.

Здесь показаны графики амплитуд H(x) вдоль стержня (рис.4, 3табл.). Графики резонансных частот не показаны, т.к. они стремятся к ∞.

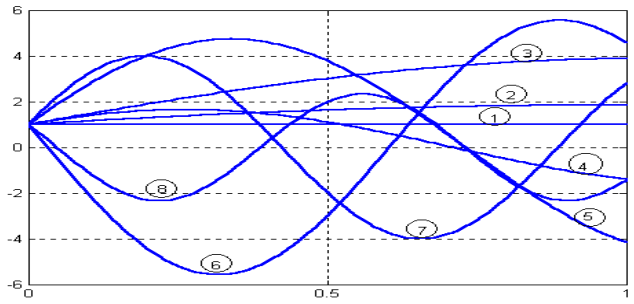


Рис.4. Графики амплитуд H(x) от кинематических возмущений
Fig.4. Plots of amplitudes H(x) from kinematic perturbations

Таблица 3. Собственные частоты
Table 3. Natural frequencies

n	1	2	3	4	5	6	7	8
ω_n	0,01	1	1,25	3,5	4	5,5	6,8	9,2

Напряжения в поперечных сечениях стержня при свободных колебаниях (ω_n). В процессе колебаний изменяются не только отклонения стержня u(x, t), но и нормальные напряжения σ(x, t) и продольная сила N(x, t). Нормальные напряжения по закону Гука будут

$$\sigma(x,t) = E\varepsilon(x,t) = Eu'(x,t).$$

Далее в формуле соответствующие им продольные силы

$$N(x,t) = S\sigma(x,t) = ESu'(x,t)$$

Эти формулы определяют напряжения и продольную силу при свободных колебаниях. По результатам расчётов можно построить эпюры напряжений, которые позволяют проводить расчёты на прочность (рис.5, табл. 4).

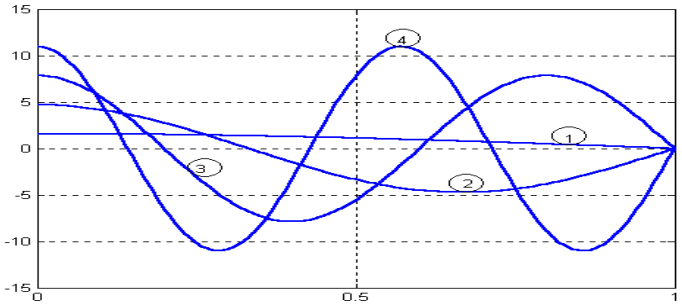


Рис.5. Спектры собственных частот ω_n и собственных форм $\varphi_n(x)$ колебания
Fig.5. Spectra of eigenfrequencies ω_n and eigenmodes $\varphi_n(x)$ of oscillation

Таблица 4. Собственные частоты
Table 4. Natural frequencies

n	1	2	3	4
ω_n	1,581	4,723	7,855	10,9965

Вывод. Рассмотрены математические модели задач, описывающие процессы колебаний стержней при динамических и кинематических возмущениях. Разработанные алгоритмы реализованы с помощью математической информационно-вычислительной системы программирования MatLab.

Создан комплекс программ расчета, позволяющий осуществлять решение задач о колебаниях стержней. Получены спектры собственных частот ω_n и собственных форм $\varphi_n(x)$ колеба-

ния, найдена u(x, t) – функция смещения поперечных сечений в продольном направлении стержня.

Библиографический список:

1. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1979. 416 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, Глав. ред. физико-матем. лит., 1968. 560 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.,1977. 656 с.
5. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
6. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах. Том 1. Колебания линейных систем / Под ред. Болотина В.В. М.: Машиностроение. 352 с. (1978)
7. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний. М.: МГТУ,. 272 с. (2003)
8. Хрущёва И.В. Основы математической статистики и теории случайных процессов: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2009. 336 с.
9. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трёх томах. Том 3. Под редакцией Биргера И.А., Пановко Я.Г. М.: Машиностроение. 1968. 567 с.
10. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. М.: Наука, 1964. 276 с.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
12. Старжинский В.М. Прикладные методы нелинейных колебаний. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. 1977. 256 с.
13. Культербаев Х.П. Основы теории колебаний. Основы теории, задачи для домашних заданий, примеры решений. Кабардино-Балкарский государ. университет. Нальчик. 2003/ 130 с.
14. Культербаев Х.П., Абдул Салам И.М., Пайзулаев М.М. Свободные продольные колебания вертикального стержня с дискретными массами при наличии сил демпфирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17
15. Культербаев Х.П. Кинематически возбуждаемые колебания континуально-дискретной многопролётной балки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. №4, часть 2. Труды X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2011. С. 198-200.
16. Kh.P. Kulterbaev, L.A. Baragunova, M.M. Shogenova, M.A. Shardanova. The Solution of a Spectral Task on Variable Section Compressed Beams Vibrations by Numerical Methods. Materials Science Forum: 2019-08-05. ISSN: 1662-9752, Vol. 974, pp 704-710 Accepted: 2019-08-05. Online: 2019-12-06, 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
17. H.P. Kulterbayev, M.H Alokova., L.A. Baragunova, Mathematical modeling of flexural vibrations of a vertical rod of variable section, The News of higher education institutions. North - Caucasion. region. Techn. sciences. 4 (2015), pp 100-106.
18. Культербаев Х.П., Чеченов Т.Ю. Свободные колебания континуально-дискретной многопролётной балки при учёте инерционных сил вращения // Наука, техника и технология XXI века (НТТ – 2009): материалы IV Международной научно-технической конференции. – Нальчик, КБГУ, 2009. – С. 313–317.
19. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Senov Kh. M. About a High-Precision Graphoanalytical Method of Determination of Critical Forces of an Oblate Rod. Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24-28, 2018. St. Petersburg. Russia 2018. pp. 794-796.
20. Yong-Jun, Z., Shuan-Hai, H; Yi-Fan, S.; Xiao-Xing, Z. “Longitudinal seismic vibration of continuousation” . Journal of Chang'an University(natural science edition). Volume: 2,28. 2008-3. pp. 49-52

References:

1. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Partial derivative equations in mathematical physics. [Vysshaya shkola] Moscow: *Higher School*, 1970: 712. (In Russ)
2. Biderman, V.L. Applied Theory of Mechanical Vibrations. [Vysshaya shkola] Moscow: *Higher School*, 1979: 416. (In Russ)
3. Babakov I.M. Theory of Vibrations. M.: [Nauka], *The Science.* Chief Editor of Physical and Mathematical Literature, 1968: 560. (In Russ)
4. Samarsky A.A. Theory of difference schemes. M.: [Nauka], *The Science.* Chief Editor of Physical and Mathematical Literature, 1977: 656. (In Russ)
5. Verzhbitsky V.M. Fundamentals of numerical methods. [Vysshaya shkola] Moscow: *Higher School*, 2002: 840. (In Russ)
6. Vibrations in engineering. Reference book in six volumes. Vol. 1. Vibrations of linear systems (in Russian). Under edition of Bolotin V.V. Moscow: Mashinostroenie,1978; 1; 1352. (In Russ)
7. Ilyin M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Yu. MOSCOW: MSTU.2003: 272. (In Russ)
8. Khrushcheva I.V. Fundamentals of mathematical statistics and the theory of random processes: a training manual. Saint-Petersburg: Lan' Publisher, 2009: 336. (In Russ)
9. Strength, Stability, Vibrations. Reference book in three volumes. Vol. 3. Under the editorship of Birger I.A., Panovko Y.G. Moscow: Machinostroenie. 1968: 567. (In Russ)
10. Panovko Ya.G. Introduction in the Theory of Mechanical Vibrations. M.: [Nauka], *The Science*. 1964: 276. (In Russ)
11. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. Equations of Mathematical Physics. M.: [Nauka], *The Science* .1977: 736. (In Russ)
12. Starzhinsky V.M. Applied methods of nonlinear oscillations. M.: [Nauka], *The Science*, Chief Editor of Physical and Mathematical Literature 1977: 256. (In Russ)
13. Kulterbaev Kh. P. Fundamentals of vibrational theory. Basics of theory, tasks for homework, examples of solutions. Kabardino-Balkarian State University. Nalchik, 2003:130 (In Russ)

14. Kulterbaev H. P., Abdul-Salam Igab Mazen, Payzulaev M.M. Free longitudinal vibrations of a vertical rod with discrete masses with damping forces. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2*018; 45 (3): 8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17(In Russ)
15. Kulterbaev H.P. Kinematically excited vibrations of a continuum-discrete multi-span beam. [Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo*] Bulletin of N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod University.* Proceedings of X All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Publishing house of N.I.Lobachevsky NNSU, 2011; 4(2): 198-200. (In Russ)
16. Kh.P. Kulterbaev, L.A. Baragunova, M.M. Shogenova, M.A. Shardanova. The Solution of a Spectral Task on Variable Section Compressed Beams Vibrations by Numerical Methods. Materials Science Forum: 2019-08-05. ISSN: 1662-9752, 2019; 974: 704-710 Accepted: 2019-08-05. Online: 2019-12-06, 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
17. Kh.P. Kulterbayev, M.H. Alokova., L.A. Baragunova, Mathematical modeling of flexural vibrations of a vertical rod of variable section, The News of higher education institutions. North-Caucasion. region. Techn. Sciences. 2015; 4: 100-106.
18. Kulterbaev Kh.P., Chechenov T.Yu. The free vibrations of continuous-discrete multispan beam taking into account the inertial forces of rotation // Science, technology and technology of the XXI century (NTT - 2009): Proceedings of IV International Scientific and Technical Conference. - Nalchik, KBGU. 2009: 313-317. (In Russ)
19. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Senov Kh. M. About a High-Precision Graphoanalytical Method of Determination of Critical Forces of an Oblate Rod. Proceedings 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). September, 24-28, 2018. St. Petersburg. Russia 2018: 794-796.
20. Yong-Jun, Z.; Shuan-Hai, H.; Yi-Fan, S.; Xiao-Xing, Z. "Longitudinal seismic vibration of continuousation". *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition*). 2008-3 2(28): 49-52

Сведения об авторах:

Барагунова Лялюся Адальбиевна, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и механики; baragunoval@mail.ru

Шогенова Марьяна Мухарбиевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и механики; shogenova_mar@mail.ru

Information about the authors:

Lyalyusya A. Baragunova, Senior Lecturer, Department "Building Structures and Mechanics"; baragunoval@mail.ru

Maryana M. Shogenova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department "Building Structures and Mechanics"; shogenova_mar@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.04.2022.

Одобрена после/рецензирования Reviced 19.05.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 19.05.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 69.09
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-94-102 Оригинальная статья / Original Paper

Сцепление арматуры с туфобетонами на кварцевых песках, приготовленными на портландцементе без добавок и с расширяющими добавками

Б.Х. Бештоков[1], А.С. Ципинов[1], А.М. Гусенов [2], А.Р. Кажаров[1], А.А. Карданов[1]
[1] Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
[1]360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,
[2]Дагестанский государственный технический университет,
[2]367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является изучение сцепления арматуры с туфобетонами на кварцевых песках, приготовленными как на обычном портландцементе, так и с расширяющими добавками. **Метод.** Решение выполняется проведением эксперимента: для этого производилось изготовление и испытание туфобетонных призм с одним центрально расположенным арматурным стержнем периодического профиля класса А-400, в установленные нормами сроки. **Результат.** По результатам эксперимента установлено, что сцепление арматуры с бетоном определяется в основном пределом прочности бетона при сжатии. Прочность сцепления арматуры с бетоном возрастает с повышением прочности бетона. В исследуемых составах влияние концентрации крупного (туфового) заполнителя или расширяющей добавки не было обнаружено. **Вывод.** Сцепление арматуры с бетоном в большей степени определяется прочностью самого бетона. Вид вяжущего (наличие расширяющей добавки) и концентрация крупного заполнителя не оказывают существенного влияния на сцепление арматуры с бетоном. Выявлена зависимость между сцеплением арматуры при продавливании и прочностью бетона. Оценку (косвенную) выносливости и трещиностойкости сцепления возможно давать по (величине условного сцепления) $l_{усл}$, определяемой длиной визуально видимого среза консолей на бетонных образцах при испытаниях на продавливание. В туфобетонах исследуемых составов $l_{усл}$ снижается с увеличением прочности бетона. В туфобетонах с расширяющими добавками выносливость и трещиностойкость сцепления оказались выше по сравнению с туфобетонами на обычном портландцементе.

Ключевые слова: туфобетоны, сцепление арматуры с туфобетоном, расширяющие добавки, влияние

Для цитирования: Б.Х. Бештоков, А.С. Ципинов, А.М. Гусенов, А.Р. Кажаров, А.А. Карданов. Сцепление арматуры с туфобетонами на кварцевых песках, приготовленными на портландцементе без добавок и с расширяющими добавками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 94-102. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-94-102

Coupling of reinforcement with Tuff concrete on quartz sands prepared on Portland cement without additives and with expanding additives

B.H. Beshtokov[1], A.S. Tsipinov[1], A.M. Gusenov[2], A.R. Kazharov[1], A.A. Cardanov[1]
[1]H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
[1]173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,
[2]Daghestan State Technical University,
[2]367026, Makhachkala, Imam Shamil Ave., 70, Russia

Abstract. Objective. The study of the adhesion of reinforcement with tuff concrete on quartz sands, prepared both on ordinary Portland cement and expanding additives. **Method.** The solution is

carried out by conducting an experiment, for this purpose, the manufacture and testing of tuff-concrete prisms with one centrally located reinforcing rod of a periodic profile of class A-400 was carried out, within the time limits established by the norms. **Result.** According to the results of the experiment, it was found that the adhesion of reinforcement to concrete is mainly determined by the compressive strength of concrete. The strength of the reinforcement's adhesion to concrete increases with the increase in the strength of concrete. In the studied compositions, the effect of the concentration of a large (tuff) filler or an expanding additive was not detected. **Conclusion.** The adhesion of reinforcement to concrete is largely determined by the strength of the concrete itself. The type of binder (the presence of an expanding additive) and the concentration of coarse aggregate do not significantly affect the adhesion of reinforcement to concrete. The dependence between the coupling of reinforcement during punching and the strength of concrete is revealed. An assessment (indirect) of the endurance and crack resistance of the coupling can be given by (the value of the conditional coupling) lsl, determined by the length of the visually visible cut of the consoles on concrete samples during penetration tests. In tuff-concrete of the studied compositions, the lcl decreases with an increase in the strength of concrete. In tuff concrete with RD, the endurance and crack resistance of the coupling turned out to be higher compared to tuff concrete on ordinary Portland cement.

Keywords: tuff concretes, adhesion of reinforcement to tuff concrete, expansion additives, influence

For citation: B.H. Beshtokov, A.S. Tsipinov, A.M. Gusenov, A.R. Kazharov, A.A. Cardanov. Coupling of reinforcement with Tuff concrete on quartz sands prepared on Portland cement without additives and with expanding additives. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 94-102. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-94-102.

Введение. Сцепление арматуры с бетоном играет большую роль в обеспечении несущей способности железобетонных конструкций. При отсутствии сцепления, после появления первой трещины, усилия в растянутой зоне возрастают по всей её длине, что приводит к ещё большему раскрытию трещины, сокращению высоты сжатой зоны и, в результате, к более раннему разрушению конструкции.

Постановка задачи. Исследованию сцепления арматуры с бетоном посвящено много научных работ. В этой связи широко известны работы Т.И. Астровой, И. Н. Ахвердова, А.И. Букаченко, А.А. Гвоздева, Ю.А. Ивашенко, К.В. Михайлова, М.Н. Мулина, В. И. Мурашева, А.А. Оатула, В.В Пасешника, М.М. Холмянсокого, В.М. Цехмистрова и др.

Изучению сцепления арматуры с портландцементными бетонами на пористых заполнителях Кабардино-Балкарии занимались М.А. Ахматов и Р.Л. Маилян.

Под сцеплением арматуры с бетоном понимают связь, развивающуюся на поверхностях контакта между этими двумя материалами, обеспечивающими их совместную работу. В железобетонном элементе сцепление выполняет две функции: анкеровку арматуры (на длине заделки, в стыках внахлестку) и вовлечение в работу бетона (при изменении продольных напряжений в арматуре) [1-9].

Усилие с арматуры на бетон предается через касательные напряжения сцепления $\tau_{см}$, на участке $l_{ак}$ (участок активного сцепления или зона активного перераспределения усилий), абсолютные значения которых после достижения своего максимума на участке $l_{ак}$ начинают убывать. Нормальное напряжение в арматуре τ_s и смещение стержня g по мере удаления от нагруженного конца уменьшаются и на расстоянии $l_{ак}$ от торца равны нулю. Участок $l_{ак}$ характеризуется достаточно сложным напряженно-деформированным состоянием: происходит депланация поперечных сечений, арматура смещается относительно бетона, развиваются пластические деформации бетона, возникают трещины внутри образца и т.п. Нарушение сцепления на активном участке может произойти в случае наступления одного из двух предельных состояний: (СниП 2.03.01-84*) по несущей способности и по пригодности к нормальной эксплуатации.

Методы исследования. Рассмотрим предельные состояния при выдергивании или продавливании арматуры из бетонной призмы. В случае отсутствия поперечного армирования и достаточной прочности бетона, от предельной нагрузки при выдергивании или продавливании в бетоне возникают значительные кольцевые растягивающие напряжения, которые и вызывают его разрыв вдоль оси арматуры.

При этом стержень начинает проскальзывать вследствие ослабления сцепления и раскола бетона на несколько блоков и их раздвижки. Такое разрушение возможно без полного среза всех консолей бетона.

Первое предельное состояние характеризуется разрушением образца или потерей несущей способности. Она наступает при достижении выдергивающей или продавливающей силы своего максимального значения $P_{пред}$, после которой без увеличения нагрузки взаимное смещение арматуры и бетона начинает непрерывно нарастать.

В случае недостаточной прочности бетона (на срез) или при наличии поперечной арматуры в достаточном количестве, разрушения сцепления происходит в результате среза всех консолей бетона, заполняющих впадины профиля. Здесь качество анкеровки принято оценивать по величине усилия, соответствующей началу сдвига ненагруженного конца арматуры или по величине усилия или условного напряжения сцепления, при которых происходит полное нарушение сцепления.

Кроме того, наступление первого предельного состояния возможно и вследствие усталостного разрушения в результате среза всех консолей бетона, заполняющих впадины профиля. В данном случае оценку сцепления можно давать испытаниями на выносливость по аналогии с испытаниями бетона по ГОСТ 24545.

Второе предельное состояние характеризуется эксплуатационными требованиями, которые определяются податливостью, деформативностью и трещиностойкостью. Податливость и деформативность определяется тем, что те или иные геометрические величины, характеризующие деформированное состояние арматуры и бетона на участке активного сцепления, достигают недопустимых, по каким-либо соображениям, предельных значений. Их принято оценивать по величине относительного смещения нагруженного и ненагруженного концов арматуры.

Трещиностойкость характеризуется величиной силы, соответствующей моменту появления продольных или поперечных трещин на участке активного сцепления или их допустимой шириной раскрытия. Однако, при отсутствии надлежащего поперечного армирования, после появления трещин, образец обычно быстро переходит в первое предельное состояние.

Сцепление гладкой и рифленой арматуры с бетоном порождается действием физических и химических факторов:

1. Зацеплением за бетон микронеровностей поверхности арматуры и выступов профиля и соответствующим сопротивлением бетонных консолей смятию, срезу и действию главных растягивающих напряжений.
2. Склеиванием (адгезией) арматуры с бетоном при твердении цементного теста [2,4,5,7,8,9].
3. Силами трения по поверхности контакта арматуры и бетона, вызванным радиальным давлением от усадки бетона.
4. Трением, вызванным поперечным обжатием бетона внешней нагрузкой (опорным давлением, прижатием арматуры к бетону при её перегибе в изгибаемых элементах).

Эти факторы, главным образом, определяются прочностными возможностями бетона, ее составом, параметрами профилирования арматуры, видом и количеством вяжущего, размером и породой заполнителя, усадкой бетона и т.д. [10-16].

В связи с вышеизложенным поставлена задача изучить сцепление арматуры с туфобетонами на кварцевых песках, приготовленными как на обычном портландцементе, так и с расширяющими добавками. Руководствуясь рекомендациями, за критерии сцепления арматуры с бе-

тоном принималась величина усилия N и условное напряжение сцепления $\tau_{см}$, при которых происходило полное нарушение сцепления при продавливании арматуры из бетонной призмы размером 10*10*20 см. Бетонные призмы для испытания изготовлялись в металлических формах с одним центрально расположенным арматурным стержнем периодического профиля класса А-400, предварительно очищенным от грязи и масла. При изготовлении образцов арматурный стержень располагался горизонтально, перпендикулярно направлению бетонирования. Длина заделки (анкеровки), с учетом выкалывания бетона арматурой на незагруженном конце, составила 19см.

Следует отметить, что результаты испытания продавливанием выше на 2–8% по сравнению с выдергиванием [6], а условия передачи нагрузки от арматуры к бетону в данном случае более близки к условию передачи усилий от арматуры на бетон при сейсмических нагрузках, в предварительно напряженных конструкциях, колоннах, монолитных сердечниках, свайных фундаментах и т.д. [4,8,9]. Исследованные составы туфобетонов приведены в табл. 1.

Таблица 1.Составы туфобетонов
Table 1. Compositions of tuff concrete

№ составов No. compositions	Расход материала на 1 м^3 туфобетона Material consumption per 1 m3 of tuff concrete							Концентрация крупного заполнителя К.К.З. Coarse Aggregate Concentration	Подвижность туфобетонных смесей, см Mobility tuff-concrete mixtures, cm	Плотность свеженауложенного бетона кг/м^3 Density freshly laid concrete kg/m3
	ПЦ, кг/м^3	ПЦ+РД, кг/м^3	Щ, кг/м^3	Кв.П, кг/м^3	Т.П., кг/м^3	*Вода*, кг/м^3	Mel, кг/м^3			
1	-	350	669	826	-	238	2,8	0,35	5,5	2085
2	-	350	765	707	-	236	2,8	0,45	6	2060
3	-	350	860	589	-	236	2,8	0,55	6,5	2040
4	-	430	669	759	-	239	3,44	0,35	6	2100
5		430	765	640	-	237	3,44	0,45	6	2075
6	-	430	860	522	-	237	3,44	0,55	6,5	2050
7	-	510	669	692	-	241	4,08	0,35	6	2115
8	-	510	765	573	-	240	4,08	0,45	6,5	2090
9	-	510	860	455	-	240	4,08	0,55	6,5	2070
10	350	-	765	707	-	236	2,8	0,45	6,5	2060
11	430	-	765	640	-	237	3,44	0,45	6,5	2075
12	510	-	765	573	-	240	4,08	0,45	7	2090
13	-	430	669	-	575	310	3,44	0,35	5	1985
14	430	-	669	-	575	310	3,44	0,35	5,5	1985
15	-	430	765	-	519	295	3,44	0,45	5	2010
16	430	-	765	-	519	295	3,44	0,45	6	2010

Экспериментально полученные результаты приведены в табл. 2. По результатам эксперимента установлено, что сцепление арматуры с бетоном определяется в основном пределом прочности бетона при сжатии. Прочность сцепления арматуры с бетоном возрастает с повышением прочности бетона. В исследуемых составах влияние концентрации крупного (туфового) заполнителя или расширяющей добавки не было обнаружено (рис. 1). Полученные результаты прочности сцепления арматуры с бетонами на пористых заполнителях Кабардино-Балкарии, приготовленных, на кварцевых песках описываются зависимостью:

$$\tau_{см}=0{,}255*R+2{,}5 \quad (1)$$

где: R – предел прочности при сжатии бетона, МПа

$\tau_{см}$ – средняя прочность сцепления арматуры с туфобетоном, МПа.

Мера разброса опытных значений относительно зависимости составила $\varepsilon = \pm 0{,}036$

Из результатов испытаний, показанных на рис.1, 2 и из табл.2 видно, что при одинаковой прочности бетона наблюдается небольшое увеличение прочности сцепления у образцов,

хранившихся длительное время – 180 суток, по сравнению с образцами, хранившимися 28 суток. Такое явление больше проявляется при меньших прочностях бетона.

Таблица 2. Результаты эксперимента
Table 2. Results of the experiment

№ составов No. compositions	Предел прочности при сжатии Compressive strength R сж, МПа		Прочность сцепления Strength clutch R сц, Мпа	Прочность сцепления Strength clutch R сц, МПа	L усл. см	L усл. см
	28 сут	180 сут	28 сутки	180 сут	28	180
1	28	33	11	11,6	7	2
2	30	35,5	9	11,7	6.5	2
3	34	38	10,85	13,2	7	1,5
4	41	47	13,7	14,9	5,5	-
5	42	48	13	-	5	-
6	42	47	13	13,45	5	0,8
7	44,8	49	13,4	14,67	3,5	1,4
8	45,3	51	14,5	15,43	3	1,3
9	45,6	50	13,7	13,45	3	1,3
10	23	28	8,8	11,9	10	2,5
11	35,5	42	12,15	12,7	5,5	1,8
12	40,6	46	13,3	13,45	2,5	1,7
13	28	36,5	10	-	-	-
14	24	33	11,15	-	-	-
15	30	38	9,6	-	-	-
16	25	34	7,34	-	-	-

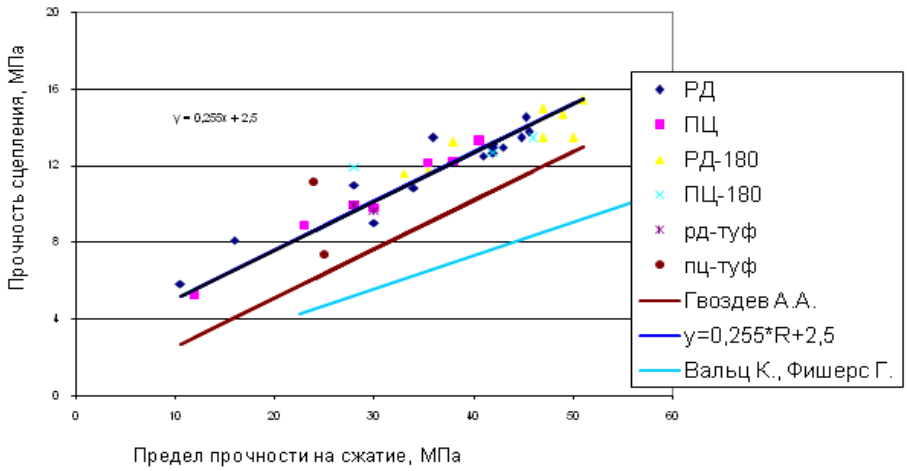


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления арматуры с бетоном от прочности туфобетона
Fig. 1. Dependence of the adhesion strength of reinforcement with concrete on the strength of tuff concrete

Следует отметить, что нагрузки, продавливающие арматуру (А 400 d=10 мл) из бетонной призмы, при прочности бетона выше 20 МПа уже лежат за пределами текучести арматурной стали. Полученные нами результаты были сопоставлены с результатами, полученными другими авторами, выдергиванием арматуры из бетонной призмы, проводившими исследования на тя-

желых бетонах и на керамзитобетоне. Так, в [1,2] была предложена зависимость рода

$$\lambda_{ак} = 0{,}75\frac{\tau_{см}}{R}, \qquad (2)$$

Для анкеровки 19 см данная зависимость была преобразована и сопоставлена с полученными результатами (рис. 1). В [10] также приводятся данные о сцеплении арматуры с керамзитобетоном, значение которых также приведены в сопоставимые формы.

На рис.1 видно, что прочность сцепления арматуры с туфобетоном выше на 2,5 МПа, чем с равнопрочным тяжелым бетоном. Объясняется это тем, что впадины профиля арматуры заполняются не бетоном, а его растворной составляющей. Величина сцепления арматуры периодического профиля с бетоном в значительной степени определяется прочностью на срез растворной составляющей, поскольку у равнопрочных на сжатие легких и тяжелых бетонов прочность растворной составляющей легкого бетона на 30 – 50% превышает прочность тяжелого бетона.

Следовательно, как следует из формулы Мерша, прочность на срез в этом случае выше на 30 – 45%, что хорошо согласуется с величиной повышения прочности сцепления на 35%. Для косвенной оценки выносливости и трещиностойкости сцепления арматуры с туфобетоном предложена величина условного сцепления $L_{усл}$, численно равная длине визуально видимого среза консолей на бетонных образцах после испытаний на продавливание. Кроме того, такое отличие объясняется формой испытания образцов: в опытах указанных авторов образцы испытывались выдерживанием арматуры из бетонной призмы, когда в данной работе экспериментальные результаты были получены продавливанием арматуры из бетонной призмы. В [3,16-19,20,21] было отмечено, что прочность сцепления арматуры с туфобетонами не ниже прочности сцепления арматуры с бетонами на плотных заполнителях. Однако прочность сцепления арматуры с пеплобетоном и ракушечник – бетоном на пористых песках на 10-15% ниже, чем с тяжелыми бетонами. Как показали результаты опытов, проведенных в АрмНИИСе, прочность сцепления арматуры периодического профиля с легким бетоном, при более высоких прочностях (В20 и выше) наблюдалось снижение прочности сцепления на 10-15%.

Обсуждение результатов. При испытаниях продавливанием туфобетонные образцы раскалывались на части вдоль арматуры. При этом полный срез консолей бетона наблюдался в начале бетонной призмы, соответственно, внутри участка активного сцепления. Естественно, на этом участке (*l*усл участок условного сцепления) деформации арматуры превышают пластические деформации бетона, а условно-касательные напряжения превышают предел прочности бетона на срез и смятие.

В связи с тем, что усталостное разрушение сцепления может произойти в результате среза консолей бетона, заполняющих впадины профиля и, учитывая, что следствием каждого нового нагружения будет являться срез консолей бетона, то, естественно, полагать, что чем меньше будет величина визуально видимого разрушения (среза) консолей, при испытаниях продавливанием однократным нагружением, тем выносливость сцепления будет больше (величина сопротивления усталостному разрушению). Поэтому выносливость сцепления или сопротивление усталостному разрушению нами предлагается сравнивать по величине визуально видимого среза консолей при продавливании однократным нагружением арматуры из бетонной призмы. Кроме того, учитывая, что продольные трещины на активном участке сцепления предшествуют срезу консолей бетона, то здесь также естественно предположить, что длина среза консолей $l_{усл}$ будет косвенно характеризовать трещиностойкость сцепления.

Поэтому в работе предлагается анкеровку, кроме продавливающей силы и условного касательного напряжения, оценивать $l_{усл}$ (величиной условного сцепления), определяемого длиной визуально видимого разрушения (среза) консолей бетонной призмы. Как видно из результатов эксперимента, приведенных на рис. 2 с увеличением прочности сцепления, (и соответственно прочности бетона) длина среза консолей уменьшается, что говорит об улучшении по-

казателя трещиностойкости и выносливости сцепления арматуры с бетонами исследуемых составов. Нами установлено, что на 180-ые сутки улучшается выносливость и трещиностойкость сцепления в сравнении с равнопрочными образцами 28 суточного хранения. Так $l_{усл}$ уменьшается почти в 3 раза (300%) независимо от прочности образца и, абсолютное снижение$l_{усл}$ на 180-ые сутки, для туфобетонов с прочностью R=27-30 МПа, составило около 5 см, а при R=43-46 МПа – около 2 см.

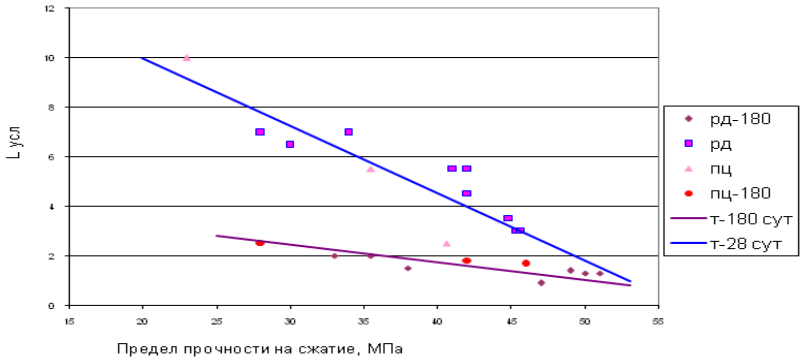


Рис. 2. Зависимость L усл от кубиковой прочности туфобетона 28 и 180 суточного возраста
Fig. 2. The dependence of L us on the cubic strength of tuff concrete 28 and 180 days old

Также, на 180 сутки наблюдается незначительное уменьшение $l_{усл}$ (величины условного сцепления арматуры с туфобетонами) у образцов, приготовленных с применением расширяющих добавок, по сравнению с образцами, приготовленными на обычном портландцементе. Это говорит о незначительном улучшении трещиностойкости и выносливости сцепления туфобетонов, приготовленных на расширяющих добавках (рис. 3) и при замораживании (рис.4).

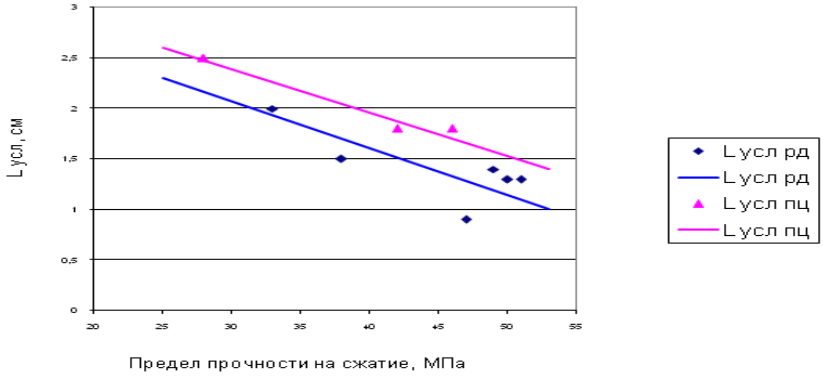


Рис. 3. Зависимость L усл от кубиковой прочности туфобетона в зависимости вида вяжущего (180 сутки)
Fig. 3. Dependence of L us on the cubic strength of tuff concrete depending on the type of binder (180 days)

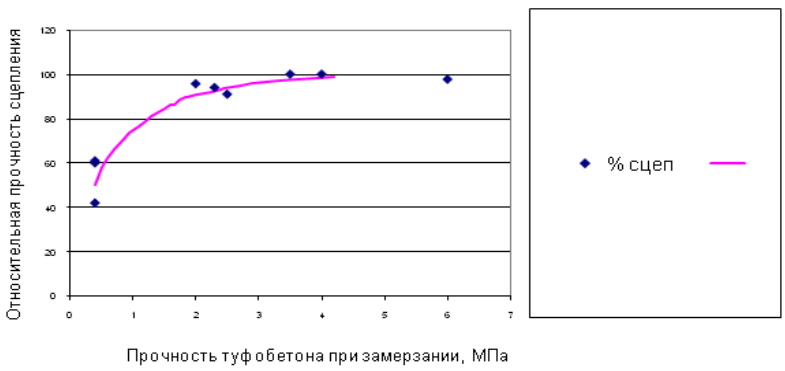


Рис. 4. Зависимость относительной прочности сцепления от прочности замораживания
Fig. 4. Dependence of the relative adhesion strength on the freezing strength

Вывод. Сцепление арматуры с бетоном в большей степени определяется прочностью самого бетона. Вид вяжущего (наличие расширяющей добавки) и концентрация крупного заполнителя не оказывают существенного влияния на сцепление арматуры с бетоном.

Выявлена зависимость между сцеплением арматуры при продавливании и прочностью бетона. Оценку (косвенную) выносливости и трещиностойкости сцепления возможно давать по величине условного сцепления $l_{усл}$, определяемой длиной визуально видимого среза консолей на бетонных образцах при испытаниях на продавливание.

В туфобетонах исследуемых составов $l_{усл}$ снижается с увеличением прочности бетона. В туфобетонах с расширяющей добавкой выносливость и трещиностойкость сцепления оказались выше по сравнению с туфобетонами на обычном портландцементе.

Библиографический список:

1. Гвоздев А. А. Структуры бетона и некоторые особенности его механических качеств//Труды НИИЖБ. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. - М., 1978. -С.121-123.
2. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуща Ю.П., Залесов А.С., Мулин Н.М., Чистяков Е.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. Под ред. д.т.н. проф. А.А. Гвоздева. М. Стройиздат 1978. – 209 с.
3. Маилян Р.Л. Ахматов М.А. Железобетон на пористых каменных отходах. М., Стройиздат, 1987. – 208с.: ил.
4. Мулин Н.М. Об исследовании сцепления арматуры с бетоном// Методика лабораторнх исследований деформаций и прочности бетона арматуры и железобетонных конструкций. Труды координационного совещания. Под редакцией к.т.н. Макаричева В.В. Академия строительства и архитектуры СССР, НИИЖБ, М.1962.-с 124-137.
5. Оатул А.А. Основы теории сцепления арматуры с бетоном. «Исследования по бетону и железобетону», сб. трудов Челябинского политехнического института № 46, Челябинск,1967.- с.6-26.
6. Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона, М., Стройиздат, 1973. – 124 с.
7. Прочность, структурные изменения и деформации бетона /Под ред. Гвоздева А.А. М., Стройиздат, 1978. 299 с.
8. Холмянский М.М. Методика экспериментального исследования сцепления арматуры с бетоном // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона арматуры и железобетонных конструкций. Труды координационного совещания. Под редакцией к.т.н. Макаричева В.В. – Академия строительства и архитектуры СССР, НИИЖБ, М.1962.- с 138-147.
9. Цехмистров В.М. Расчет напряжений и деформаций при выдергивании арматуры из бетонной призмы, опертой торцом (образец на выдергивание.) «Исследования по бетону и железобетону», сб. трудов Челябинского политехнического института № 46, Челябинск,1967.- с.27-43.
10. Вальц К., Вишерс Г. Конструктивный высокопрочный легкий бетон. – 81 с.
11. Ахматов М.А. Применение отходов камнепилениятуфокарьеров и рыхлых пористых пород в качестве заполнителей легких бетонов и конструкций из них. Нальчик, 1981. – 128 с.
12. Ахматов М.А. Эффективность применения строительных материалов и бетона. Нальчик «Эльбрус» 1986. 160 с.
13. Ахматов М.А. Отходы каменных пород и рыхлые материалы, как сырье для производства пористых заполнителей, легких бетонов и конструкций из них// Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Международная научно техническая конференция. – Ростов-на-Дону 2000. –с. 40-49.
14. Ахматов М.А. Эффективность применения легких бетонов и железобетонных конструкций на заполнителях из каменных отходов и рыхлых пористых пород вулканического происхождения.: Дисс. ... докт. тех. наук 05.23.01, 05.23.05- Ростов-на-Дону 1999. 514 с.
15. Ахматов М.А. Эффективность применения легких бетонов и железобетонных конструкций на заполнителях из каменных отходов и рыхлых пористых пород вулканического происхождения.: Автореферат дисс. ... докт. тех. наук 05.23.01, 05.23.05- Ростов-на-Дону 1999. 59 с.
16. Несветаев Г.В. Закономерности деформирования и прогнозирование стойкости бетонов при силовых и температурных воздействиях: Автореферат дисс. … докт. тех. наук.: 05.23.05 – Ростов-на-Дону 1998.
17. Несветаев Г.В., Ефремова И.А, Егорочкина И.О. К управлению качеством бетонов посредством регулирования свойств контактной зоны // Строительные материалы, изделия и конструкции на рубеже веков. Ростов-на-Дону 1999. С. 28-30.
18. Несветаев Г.В., Тимонов С.А. Усадочные деформации и ранее трещинообразование бетона // Пятые академические чтения РААСН. Воронеж. 1999. С. 305-310.
19. Несветаев Г.В., Чмель Г.В. Некоторые свойства расширяющихся цементов и бетонов на их основе// Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Международная научно-практическая конференция. – Ростов-на-Дону 2000. – С. 271-276.
20. Симонов М.З. Бетон и железобетон на пористых заполнителях. - М., Стройиздат, 1955. - 254 с.
21. Симонов М.З., Шагинян С.Г. Использование природных пористых заполнителей в производстве бетона и железобетона//Бетон и железобетон. - 1985. - № 7. - С. 6-7.

References:

1. Gvozdev A. A. Structures of concrete and some features of its mechanical qualities.*Proceedings of the NIIZHB. Strength, structural changes and deformations of concrete*. M., 1978: 121-123. (In Russ)

2. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., GushchaYu.P., Zalesov A.S., Mulin N.M., Chistyakov E.A. New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Edited by Doctor of Technical Sciences prof. A.A. Gvozdev. M. *Stroyizdat* 1978: 209. (In Russ)
3. Mailyan R.L. Akhmatov M.A. Reinforced concrete on porous stone waste. M., *Stroyizdat*, 1987: 208. (In Russ)
4. Mulin N.M., On the study of reinforcement coupling with concrete. Methods of laboratory studies of deformations and strength of concrete reinforcement and reinforced concrete structures. Proceedings of the coordination meeting. Edited by Candidate of Technical Sciences V.V. Makarichev. Academy of Construction and Architecture of the USSR, NIIZhB, M.1962:124-137. (In Russ)
5. Oatul A.A. Fundamentals of the theory of reinforcement coupling with concrete. "Research on concrete and reinforced concrete", Proceedings of the Chelyabinsk Polytechnic Institute Chelyabinsk, 1967; 46:6-26. (In Russ)
6. Piradov A.B. Constructive properties of light concrete and reinforced concrete, M., *Stroyizdat.* 1973: 124. (In Russ)
7. Strength, structural changes and deformations of concrete. Ed. Gvozdeva A.A. M., *Stroyizdat* 1978: 299. (In Russ)
8. Kholmyansky M.M. Method of experimental study of reinforcement coupling with concrete. Methods of laboratory studies of deformations and strength of concrete reinforcement and reinforced concrete structures. Proceedings of the coordination meeting. Edited by Candidate of Technical Sciences V.V. Makarichev. Academy of Construction and Architecture of the USSR, NIIZhB, M. 1962: 138-147. (In Russ)
9. Tsekhmistrov V.M. Calculation of stresses and deformations when pulling rebar from a concrete prism supported by an end face (a sample for pulling out.) "Research on concrete and reinforced concrete", proceedings of the Chelyabinsk Polytechnic Institute No. 46, Chelyabinsk, 1967:.27-43. (In Russ)
10. Waltz K., Vishers G. Structural high–strength lightweight concrete. 81 p. (In Russ)
11. Akhmatov M.A. The use of stone-sawing waste of tufokarriers and loose porous rocks as fillers of light concrete and structures made of them. Nalchik, 1981: 128. (In Russ)
12. Akhmatov M.A. The effectiveness of the use of building materials and concrete. Nalchik "Elbrus" 1986: 160. (In Russ)
13. Akhmatov M.A. Stone waste and loose materials as raw materials for the production of porous aggregates, light concrete and structures made of them. Concrete and reinforced concrete in the third millennium. International Scientific and Technical Conference. Rostov-on-Don 2000: 40-49. (In Russ)
14. Akhmatov M.A. The effectiveness of the use of light concrete and reinforced concrete structures on aggregates from stone waste and loose porous rocks of volcanic origin.: Diss. ... Doctor of Technical Sciences 05.23.01, 05.23.05- Rostov-on-Don 1999: 514. (In Russ)
15. Akhmatov M.A. The effectiveness of the use of light concrete and reinforced concrete structures on aggregates from stone waste and loose porous rocks of volcanic origin.: Abstract diss. ... Doctor of Technical Sciences 05.23.01, 05.23.05- Rostov-on-Don 1999: 59. (In Russ)
16. Nesvetaev G.V. Regularities of deformation and prediction of concrete resistance under force and temperature influences: Abstract diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.23.05. Rostov-on-Don 1998. (In Russ)
17. Nesvetaev G.V., Efremova I.A., Egorochkina I.O. To concrete quality management by regulating the properties of the contact zone. [Stroitel′nyye materialy, izdeliya i konstruktsii na rubezhe vekov] *Building materials, products and structures at the turn of the century.* Rostov-on-Don 1999: 28-30. (In Russ)
18. Nesvetaev G.V., Timonov S.A. Shrinkage deformations and earlier cracking of concrete. [Pyatyye akademi-cheskiye chteniya RAASN] *Fifth Academic Readings of the Russian Academy of Sciences*. Voronezh. 1999: 305-310. (In Russ)
19. Nesvetaev G.V., Chmel G.V. Some properties of expanding cements and concretes based on them . [Beton i zhelezobeton v tret′yem tysyacheletii. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya] *Concrete and reinforced concrete in the third millennium. International Scientific and Practical Conference.* Rostov-on-Don 2000: 271-276. (In Russ)
20. Simonov M.Z. Concrete and reinforced concrete on porous aggregates. M., *Stroyizdat*. 1955: 254. (In Russ)
21. Simonov M.Z., Shaginyan S.G. The use of natural porous aggregates in the production of concrete and reinforced concrete. [Beton i zhelezobeton] *Concrete and reinforced concrete*. 1985; 7: 6-7. (In Russ)

Сведения об авторах:

Бештоков Беслан Хамидбиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства; bbeshtokov@mail.ru.

Ципинов Ауес Сефович, старший преподаватель кафедры строительного производства; czi.ayes69@yandex.ru

Кажаров Алим Русланович, старший преподаватель кафедры строительного производства; kazharov.90@mail.ru

Гусенов Ахмед Муртазалиевич, магистрант кафедры технологии и организации строительного производства; gusenov.axmed@bk.ru

Карданов Аслан Адамович, аспирант кафедры строительного производства; aslan_kardanov_95@mail.ru

Information about the authors:

Beslan Kh. Beshtokov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; Department of Construction Production; bbeshtokov@mail.ru.

Aues S. Tsipinov Senior Lecturer, Department of Construction Production; czi.ayes69@yandex.ru

Alim R. Kazharov, Senior lecturer of the Department of Construction Production; kazharov.90@mail.ru "

Akhmed M. Gusenov, Postgraduate Student, Department “Technology and organization of construction production; gusenov.axmed@bk.ru

Aslan A. Kardanov, Postgraduate Student, Department of Construction Production; aslan_kardanov_95@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.05.2022.

Одобрена после/рецензирования Reviced 03.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 03.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 628.921
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-103-109 Оригинальная статья /Original Paper

К вопросу учета светового климата при расчете и проектировании естественного освещения зданий

Х.М. Гукетлов, И.З. Сруков
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка алгоритма метода расчета площади светопроемов зданий, позволяющего осуществить переход к дифференцированному учету ресурсов светового климата в любой географической точке. **Метод.** Исследование основано на методах проектирования естественного освещения зданий. **Результат.** Усовершенствована математическая модель светового режима помещений, учитывающая особенности перераспределения световых потоков в конструкциях зенитных, прямоугольных фонарей и в наклонно расположенных световых устройствах. **Вывод.** Получены коэффициенты светового климата для города Нальчика, применение которых позволит при улучшении микроклимата в помещениях повысить технико-экономическую эффективность систем естественного освещения.

Ключевые слова: математическая модель, количество освещения, естественная освещенность на наклонной поверхности, световой поток, ясное небо МКО, фонари, коэффициент светового климата, прямая освещенность от Солнца, вероятность солнечного сияния, световые устройства

Для цитирования: Х.М. Гукетлов, И.З. Сруков. К вопросу учета светового климата при расчете и проектировании естественного освещения зданий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 103-109. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-103-109

On the issue of taking into account the light climate in the calculation and design of natural lighting in buildings

H.M. Guketlov, I.Z. Srukov
H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop an algorithm for the method of calculating the area of light openings of buildings, which allows the transition to a differentiated accounting of light climate resources at any geographical point. **Method.** The study is based on methods for designing natural lighting in buildings. **Result**. The mathematical model of the light regime of premises has been improved, taking into account the peculiarities of the redistribution of light fluxes in the designs of skylights, rectangular lamps and in inclined lighting devices. **Conclusion.** On the basis of calculations using a mathematical model, the coefficients of the light climate for the city of Nalchik were obtained, the use of which will allow, with the improvement of the microclimate in the premises, to increase the technical and economic efficiency of natural lighting systems.

Keywords: mathematical model, amount of illumination, natural illumination on an inclined surface, luminous flux, CIE clear sky, lamps, light climate coefficient, direct illumination from the Sun, probability of sunshine, lighting devices

For citation: H.M. Guketlov, I.Z. Srukov. On the issue of taking into account the light climate in the calculation and design of natural lighting in buildings. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 103-109. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-103-109.

Введение. Существующая в настоящее время система методов нормирования и проектирования естественного освещения [1] основывается на интегральных критериях оценки ресурсов светового климата (коэффициент светового климата m_N), численные значения которых получены в результате усреднения показателей светового климата в пределах каждого административного района.

При большом разнообразии светоклиматических характеристик в разных географических пунктах административного района усреднение показателей светового климата приводят, в одних случаях, к занижению площади световых проемов и, как следствие, к перерасходу электроэнергии на искусственное освещение, в других случаях – к завышению площади световых проемов, а следовательно, к возрастанию единовременных затрат и теплопотерь в системах естественного освещения.

Постановка задачи. Основная идея алгоритма предлагаемого метода заключается в определении требуемой площади светопроемов на основе сопоставления светового режима помещения, расположенного в Москве (этот район принимается за эталонный) и в рассматриваемом районе строительства

$$S_p = m_N S_M = \frac{H_M}{H_p} S_M \quad , \qquad (1)$$

где S_p, – требуемая площадь светопроемов для светоклиматических условий рассматриваемого района строительства; m_N – коэффициент светового климата; S_M – требуемая для светоклиматических условий Москвы площадь светопроемов, определяется по [1]; H_M – количество освещения в помещении, расположенном в Москве, с площадью светопроемов, равной S_M; H_p – количество освещения в помещении, расположенном в рассматриваемом районе, с площадью светопроемов, равной S_M.

В соответствии с [2] за критерий оценки светового режима помещения было принято среднегодовое количество освещения в помещении. Данный критерий имеет физиологическое обоснование [3] и позволяет решить вопрос о том, как надо изменять площадь светопроема, чтобы в различных светоклиматических условиях сохранить один и тот же среднегодовой уровень зрительной работоспособности.

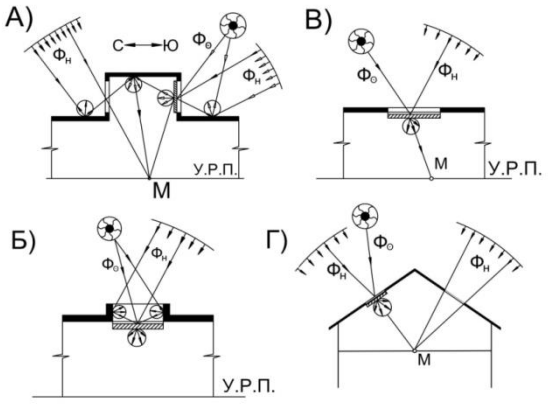


Рис. 1. Схема прохождения свтовых потоков через П-образные (а), зенитные ленточные (б), зенитные точечные (в) фонари и наклонно расположенные световые устройства (г)
Fig. 1. Scheme of the passage of light fluxes through the U-shaped (a), anti-aircraft tape (b), anti-aircraft spotlights (c) lamps and inclined lighting devices (d)

Методы исследования. На основе результатов теоретических исследований [4,5,13] была усовершенствована математическая модель светового режима помещений, учитывающая

особенности перераспределения световых потоков в различных световых устройствах (рис. 1) с программной реализацией на ЭВМ, которая в общем виде описывается уравнением

$$H = \sum_{i=1}^{12} N_i \left[S_i \sum_{j=t_1}^{t_2} E_{i,j}^{Я} + (1-S_i) \sum_{j=t_3}^{t_4} E_{i,j}^{O} \right] \cdot \Delta t, \qquad (2)$$

где Н – количество освещения в помещении за год, лк·ч;

M_i – количество дней в месяце; S_i – вероятность солнечного сияния по месяцам года, определяется по [6]; t_1, t_2, t_3, t_4 – время включения и выключения искусственного освещения в помещении при ясном и облачном небе МКО; $E_{i,j}^{Я}, E_{i,j}^{O}$ – значения средней освещенности в помещении, соответственно, при ясном и облачном небе, определяется с учетом типа фонаря и наклонно расположенных световых устройств.

Естественная освещенность в помещении от зенитных фонарей точечного типа (с размерами в плане не более 2,7х2,7 м) определяется при ясном небе МКО по формуле

$$E_{i,j}^{Я} = \frac{nS_ф}{K_з S_n} \tau_о r_2 G \left(\tau_{пр}^{я.н.} E_Г^{я.н.} + \tau_{пр}^{\odot} E_Г^{\odot} \right), \qquad (3)$$

при облачном небе МКО - по формуле

$$E_{i,j}^{O} = \frac{N_ф S_ф}{K_з S_n} \tau_о \tau_c r_2 G \tau_{пр} E_Г^{O}, \qquad (4)$$

где n – количество зенитных фонарей; $S_ф$ – площадь одного фонаря (в свету); $\tau_о$ – общий коэффициент светопропускания заполнения фонаря; S_n – освещаемая площадь помещения; G – коэффициент использования светового потока, определяется по [7]; $\tau_{пр}^{я.н.}$ – коэффициент светопропускания зенитного фонаря для рассеянной освещенности от ясного неба, определяется по [8]; $\tau_{пр}^{\odot}$ – коэффициент светопропускания зенитного фонаря для прямой освещенности от Солнца, определяется по [8]; $E_Г^{я.н.}$ – наружная рассеянная освещенность от ясного неба МКО на горизонтальной поверхности, определяется по [4]; $E_Г^{\odot}$ – наружная горизонтальная освещенность от Солнца определяется по [4]; $E_Г^{O}$ – наружная горизонтальная освещенность от облачного неба МКО, определяется по [9]; $K_з$ – коэффициент запаса.

От зенитных фонарей ленточного типа больших размеров (более 2,7х2,7 м) освещенность определяется при ясном небе МКО и наличии СЗУ в фонарях по формуле

$$E_{i,j}^{Я} = \frac{E_Г^{я.н.} + E_Г^{\odot}}{\pi K_з} \tau_о \tau_c r_2 \sum_m^n \sum_k^N \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{Z_1(\theta_1,\alpha)}^{Z_2(\theta_2,\alpha)} \cos z \sin z dz d\alpha, \qquad (5)$$

при облачном небе МКО - по формуле

$$E_{i,j}^{Я} = \frac{E_Г^{я.н.} + E_Г^{\odot}}{\pi K_з} \tau_о r_2 L_{i,j}^{O} \sum_m^n \sum_k^N \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{Z_1(\theta_1,\alpha)}^{Z_2(\theta_2,\alpha)} \eta(z) \cos z \sin z dz d\alpha, \qquad (6)$$

где N - количество расчетных точек по разрезу помещения;

r_2 – коэффициент, учитывающий свет, отраженный от внутренних поверхностей помещения;

α_1, α_2 – азимуты середины торцевых граней светового проема фонаря; $Z_1(\theta_1,\alpha)$, $Z_2(\theta_2,\alpha)$ – уравнения контура окна, видимого из расчетной точки, определяется по формулам

$$Z_1 = arctg(ctg\theta_1 \cos\alpha); \quad Z_2 = arctg(ctg\theta_2 \cos\alpha);$$

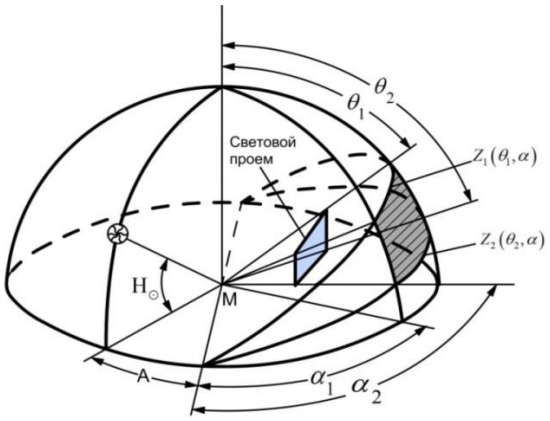


Рис. 2. Схема расположения светового проема, расчетной точки М и Солнца в сферических координатах
Fig. 2. Scheme of the location of the light opening, the calculated point M and the Sun in spherical coordinates

θ_1, θ_2 – зенитное расстояние середины соответственно левой и правой граней светового проема; $\eta(z)$ – функция распределения яркости по облачному небу МКО; $L^O_{i,j}$ – яркость облачного неба в зените, определяется из соотношения

$$L^O_{i,j} = 300 + 17117,4\sin H_\odot + 4031,7\, H_\odot \sin^2 H_\odot, \qquad (7)$$

где $H_\odot$ – высота Солнца в радианах

Для прямоугольных светоаэрационных фонарей освещенность определяется при ясном небе и наличии СЗУ по формуле

$$E^Я_{i,j} = \frac{\tau_o r_2 \kappa_\phi}{\pi N K_з} \sum_m^n \sum_k^N E^{сум}_{i,j} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{Z_1(\theta_1,\alpha)}^{Z_2(\theta_2,\alpha)} \cos z \sin z dz d\alpha, \qquad (8)$$

при ясном небе и отсутствии СЗУ - по формуле

$$E^Я_{i,j} = \frac{\tau_o r_2 K_\phi}{\pi K_з} L^Я_{i,j} \sum_m^n \sum_k^N \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{Z_1(\theta_1,\alpha)}^{Z_2(\theta_2,\alpha)} S(z,\alpha) \cos z \sin z dz d\alpha, \qquad (9)$$

при облачном небе

$$E^O_{i,j} = \frac{\tau_o r_2 K_\phi}{\pi K_з} L^O_{i,j} \sum_m^n \sum_k^N \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{Z_1(\theta_1,\alpha)}^{Z_2(\theta_2,\alpha)} \eta(Z) \cos z \sin z dz d\alpha \quad , \qquad (10)$$

где $E_{i,j}^{сум}$ – суммарная освещенность на наружной вертикальной поверхности фонаря определяется по [4]; $S(z,\alpha)$ – функция распределения яркости по ясному небу МКО; $\kappa_{ф}$ – коэффициент, учитывающий тип фонаря; $L_{i,j}^{Я}$ – яркость ясного неба МКО в зените, определяется по формуле

$$L_{i,j}^{Я} = 60 + 600\cos^2(2H_{\odot}) + 4800H_{\odot}^{1,55} \quad (11)$$

Для наклонно расположенных световых устройств освещенность в помещении определяется при ясном небе МКО от падающей на световой проем только рассеянной составляющей светового потока

$$E_{i,j}^{Я} = \tau_{о} r_2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{z_1(\theta_1,\alpha)}^{z_2(\theta_2,\alpha)} L(z,\alpha)\cos z \sin z dz d\alpha, \quad (12)$$

от падающей на световой проем суммарной рассеянной и прямой составляющей светового потока

$$E_{i,j}^{Я} = \frac{\left(E_{н.п.}^{я.н.} + E_{н.п.}^{\odot}\right)}{\pi} \tau_c \tau_{о} r_2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{z_1(\theta_1,\alpha)}^{z_2(\theta_2,\alpha)} \cos z \sin z dz d\alpha \ , \quad (13)$$

при облачном небе

$$E_{i,j}^{Я} = \tau_{о} r_2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{z_1(\theta_1,\alpha)}^{z_2(\theta_2,\alpha)} L(z,\alpha)\cos z \sin z dz d\alpha, \quad (14)$$

где $E_{Н.П.}^{Я.Н.}$ – рассеянная освещенность на наклонной поверхности крыши при ясном небе МКО [10]; $E_{Н.П.}^{\odot}$ - прямая освещенность от Солнца на наклонной поверхности крыши, определяется по формуле

$$E_{Н.П.}^{\Theta} = \frac{C_{\Theta}}{\Delta^2} p^M \cos\theta, \quad (15)$$

где C_{Θ} – световая солнечная постоянная; Δ – расстояние от Земли до Солнца для рассматриваемого года в астрономических единицах; M – оптическая масса атмосферы; θ - угол, образуемый нормалью освещаемой плоскости с направлением на Солнце

$$\theta = \arccos\left[\cos z \cos z_{\Theta} + \sin z \sin z_{\Theta} \cos(A - A_{\Theta})\right], \quad (16)$$

$Z, Z_{\Theta}, A, A_{\Theta}$ – зенитное расстояние и азимуты соответственно нормали и Солнца к поверхности светового проема.

Обсуждение результатов. Решение двойных интегралов осуществляется с использованием кубатурной формулы Симпсона [11,12]. На основе расчетов с использованием рассматриваемой математической модели светового режима помещений на ЭВМ были получены коэффициенты светового климата табл. 1, 2.

Таблица 1. Значения светоклиматических коэффициентов для зенитных и прямоугольных фонарей в городе Нальчике m_N

Table 1. Values of photo-climatic coefficients for skylights and rectangular lamps in the city of Nalchik m_N

Тип фонаря Lantern type					
зенитные anti-aircraft		прямоугольные, ориентированные на rectangular, oriented			
СНиП	новое new	С–Ю N–S		З–В W–E	
		СниП	новое new	СниП	новое new
1	2	3			
0,9	0,708	0,9	0,733	0,9	0,697

Таблица 2. Значения светоклиматических коэффициентов для наклонно расположенных световых устройств в городе Нальчике m_N
Table 2. Values of light and climate coefficients for obliquely located lighting devices in the city of Nalchik m_N

Ориентации световых проемов по сторонам горизонта Orientation of light openings on the sides of the horizon	Коэффициент светового климата m_N Light climate coefficient					
	Угол наклона световых проемов, градус Angle of inclination of light apertures, degree					
	10	20	30	40	50	60
С	0,792	0,743	0,733	0,721	0,641	0,539
СВ, СЗ	0,795	0,747	0,748	0,748	0,684	0,656
ЮВ, ЮЗ	0,811	0,776	0,794	0,805	0,714	0,386
Ю	0,815	0,783	0,802	0,817	0,727	0,496
В, З	0,867	0,83	0,846	0,861	0,813	0,71

Анализ результатов расчета показал, что в преобладающей части районах Российской Федерации имеются неучтенные ресурсы природной световой энергии, что, в частности, выражается в снижении светоклиматических коэффициентов в среднем на 8-15 %. Это означает, что в указанных районах при проектировании естественного освещения зданий можно уменьшить площадь световых проемов на 8-15 % при сохранении полноценной световой среды и улучшении микроклимата в помещениях, а также уменьшить приведенные затраты на освещение.

Светоклиматические коэффициенты для наклонно расположенных световых устройств (табл. 2) незначительно отличаются при малых углах наклона и существенно отличаются при больших углах наклона.

Вывод. Применение полученных светоклиматических коэффициентов при расчете естественного освещения зданий позволит более полно использовать ресурсы природной световой энергии места строительства и, тем самым, повысит технико-экономическую эффективность систем естественного освещения.

Библиографический список:

1. СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение. М., 2004. -53с.
2. Киреев Н.Н. Основы проектирования совмещенного освещения: Автореферат докторской диссертации / НИИСФ. М., 1984.
3. Глаголева Т.А. Естественное освещение промышленных зданий. М.,1961. – 88 с.
4. Гукетлов Х.М. Метод дифференцированного учета светового климата при расчете и проектировании верхнего естественного освещения промышленных зданий: Автореферат кандидатской диссертации/ НИИСФ, 1985.
5. Гукетлов Х.М. Метод расчета естественного освещения помещений с фонарями верхнего света в условиях ясного неба МКО. // Науч.тр. НИИСФ, 1986. Совершенствование световой среды помещений, С. 38-44
6. Справочник по климату СССР. Солнечная радиация. Радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968.
7. Киреев Н.Н. Теоретическое определение коэффициента использования светового потока при верхнем естественном освещении. – Науч. Тр. НИИСФ, 1981. Исследовани по строительной светотехнике, с. 32-37.
8. Гукетлов Х.М., Шогенов О.М, Машукова М.Х., Макушев И.З. К вопросу определения коэффициента светопропускания точечного зенитного фонаря при ясном небе. – Научно-технический вестник Поволжья – 2022. – №1 – С. 79-84.
9. Киреев Н.Н. К расчету наружной естественной освещенности от облачного неба МКО. – Науч. тр. НИИСФ, 1984. Исследование по строительной светотехнике. с. 41-44.
10. Гукетлов Х.М., Карданов Л.Т. Особенности расчета естественного освещения помещений через мансардные окна "VELUX" при ясном небе МКО. Журнал "Academia. Архитектура и строительство" номер 3. Москва. 2010 г., г.483-485.

11. Киреев Н.Н., Гукетлов Х.М. Расчет на ЭВМ естественного освещения помещения от ясного неба МКО. – Науч. тр. НИИСФ, 1983. Исследования по строительной светотехнике, с. 29-33.
12. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз 1963.
13. Гукетлов Х.М. Расчет времени использования естественного освещения в помещениях при ясном и облачном небе МКО на ЭВМ. Сборник трудов института (НИИСФ). Актуальные проблемы строительной светотехники. Москва 1985., с 71–74.
14. Х.М.Гукетлов, М.И.Ульбашев. Корректировка норм учета светового климата для световых устройств расположенных в плоскости наклонных скатов крыш. Научно-технический вестник Поволжья №2. Казань 2018г., с. 47-50.
15. Гукетлов Х.М. Карданов Л.Т. Сурхайханов Ш.М., Хамукова И.А. К вопросу учета ресурсов светового климата города Нальчика. Научно-технический вестник Поволжья №2. Казань 2016г. с. 69-72.

References:

1. SNiP 23-05-95* Natural and artificial lighting. M., 2004: 53. (In Russ)
2. Kireev N.N. Fundamentals of designing combined lighting: Abstract of a doctoral dissertation. NIISF. M., 1984. (In Russ)
3. Glagoleva T.A. Natural lighting of industrial buildings. M., 1961. – 88 p. (In Russ)
4. Guketlov Kh.M. The method of differentiated consideration of the light climate in the calculation and design of the upper natural lighting of industrial buildings: Abstract of a Ph.D. dissertation / NIISF, 1985. (In Russ)
5. Guketlov Kh.M. Method for calculating the natural illumination of rooms with skylights under clear sky CIE. // Scientific work. NIISF, 1986. Improving the light environment of the premises, S. 38-44(In Russ)
6. Reference book on the climate of the USSR. Solar radiation. Radiation balance and sunshine. L .: *Gidrometeoizdat*, 1968. (In Russ)
7. Kireev N.N. Theoretical determination of the luminous flux utilization factor for overhead daylight. – Scientific Tr. NIISF, 1981. Research on building lighting engineering, p. 32-37. (In Russ)
8. Guketlov Kh.M., Shogenov O.M., Mashukova M.Kh., Makushev I.Z. To the question of determining the coefficient of light transmission of a point anti-aircraft lamp in a clear sky. [Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh′ya] *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. 2022; 1: 79-84. (In Russ)
9. Kireev N.N. To the calculation of outdoor natural illumination from the cloudy sky CIE. Scientific tr. NIISF, Research on building lighting engineering. 1984: 41-44. (In Russ)
10. Guketlov H.M., Kardanov L.T. Peculiarities of calculation of natural illumination of rooms through skylights "VELUX" in a clear sky CIE. [Academia. Arkhitektura i stroitel′stvo] *Academia. Architecture and construction*. Moscow. 2010; 3:483-485. (In Russ)
11. Kireev N.N., Guketlov Kh.M. Calculation on a computer of natural lighting of a room from a clear sky CIE. Scientific tr. NIISF, Research on building lighting engineering. 1983: 29-33. (In Russ)
12. Demidovich B.P., Maron I.A. Fundamentals of Computational Mathematics. Moscow: Fizmatgiz 1963. (In Russ)
13. Guketlov Kh.M. Calculation of the time of using natural lighting in rooms with a clear and cloudy sky CIE on a computer. Collection of Institute Proceedings (NIISF). *Actual problems of building lighting engineering*. Moscow 1985:. 71–74. (In Russ)
14. Kh.M. Guketlov, M.I. Ulbashev. Correction of the norms for accounting for the light climate for lighting devices located in the plane of sloping roof slopes. . [Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh′ya] *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. Kazan 2018; 2: 47-50. (In Russ)
15. Guketlov Kh.M. Kardanov L.T. Surkhaikhanov Sh.M., Khamukova I.A. On the issue of taking into account the resources of the light climate of the city of Nalchik. [Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh′ya] *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. Kazan 2016; 2: 69-72. (In Russ)

Сведения об авторах:

Гукетлов Хазрет Мухамедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектурного проектирования дизайна и декоративно-прикладного искусства; 123guket@mail.ru

Сруков Ислам Заурович, магистрант кафедры архитектурного проектирования дизайна и декоративно-прикладного искусства; islam.srukov@mail.ru

Information about authors:

Hazret M. Guketlov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Architectural Design, Design and Decorative and Applied Arts; 123guket@mail.ru

Islam Z. Srukov, Postgraduate Student, Department of Architectural Design, Design and Decorative and Applied Arts; islam.srukov@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.06.2022.

Одобрена после/рецензирования Reviced 15.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 15.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.921
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122 Оригинальная статья /Original Paper

Особенности региональных параметров колебания грунта как основа принятия оптимального проектного решения

Х.Р. Зайнулабидова, Р.Г. Гасанов
Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью данного исследований является разработка методики оценки сейсмической опасности территорий и методики принятия оптимального проектного решения, основанного на различных критериях, в том числе и на критерии количественных параметров колебаний грунтов, учитывающих региональные особенности. **Метод.** Произведена оценка количественных параметров сейсмических событий, зарегистрированных на территории Республики Дагестан и смежных районов аналитическими и численными методами. Определена надёжность зданий на основе вероятностных моделей. **Результат.** Предложена методика оценки параметров колебаний грунтов на основе обработки инструментальных записей известных землетрясений, учитывающая особенности грунтов. Предложена методика принятия оптимального проектного решения, учитывающая параметры колебаний грунтов и другие целевые функции. **Вывод.** Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины рыхлого слоя увеличивается величина максимального ускорения, а диапазон неустойчивых колебаний периодов при этом лежит в интервале 0,1-0,5 сек. Строительство зданий должно быть основано на параметрах колебаний грунтов строительной площадки с учётом литологического состава грунта и других физико-механических свойств.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмоактивные зоны, ускорения колебания грунтов, частота, длительность землетрясений, сейсмические свойства, вероятность безотказной работы, критерии надёжности, оптимальное проектное решение

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова, Р.Г. Гасанов. Особенности региональных параметров колебания грунта как основа принятия оптимального проектного решения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 110-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122

Features of regional parameters of soil fluctuations as a basis for making an optimal design decision

H.R. Zainulabidova, R.G. Gasanov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala, 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of these studies is to develop a methodology for assessing the seismic hazard of territories and a methodology for making an optimal design decision based on various criteria, including criteria for quantitative parameters of soil vibrations, taking into account regional peculiarities. **Method.** Estimation of quantitative parameters of seismic events registered on the territory of the Republic of Dagestan and adjacent areas by analytical and numerical methods. Determination of the reliability of buildings based on probabilistic models. **Result.** A method for estimating the parameters of soil vibrations based on the processing of instrumental records of known earthquakes, taking into account the characteristics of soils, is proposed. A method for making an optimal design decision is proposed, taking into account the parameters of soil vibrations and other target functions. **Conclusion.** The analysis of the obtained results showed that with an increase in the thickness of

the loose layer, the magnitude of the maximum acceleration increases, the range of unstable fluctuations of the periods at the same time lies in the range of 0.1-0.5 seconds. The construction of buildings should be based on the parameters of the vibrations of the soils of the construction site, taking into account the lithological composition of the soil and other physical and mechanical properties.

Keywords: earthquakes, seismically active zones, acceleration of ground vibrations, frequency, duration of earthquakes, seismic properties, probability of trouble-free operation, reliability criteria, optimal design solution

For citation: H.R. Zainulabidova, R.G. Gasanov. Features of regional parameters of soil fluctuations as a basis for making an optimal design decision. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 110-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122.

Введение. Сейсмичность районов Дагестана можно связать с коллизией Аравийского континентального блока с Евроазиатской литосферной плитой. Движение Аравийского блока составляет около 2 см в год. Для анализа существующей сейсмической опасности была изучена тектоническая особенность рассматриваемой территории.

Согласно карте эпицентров землетрясений Северного Кавказа [1] изучаемая территория входит в кайнозойский или предгорный тектонический комплекс, ограниченный с севера равнинным, а с запада горным тектоническими комплексами. Наиболее крупным тектоническим элементом района является область Дагестанского клина, который представляет собой сложный узел глубинных разломов разных направлений. Здесь близко сходятся глубинные разломы общекавказской ориентировки, пересекающиеся с Гудермесско-Моздокским сдвигом и серией поперечных разломов [2]. С севера и с востока область Дагестанского клина оконтурена передовым Терско - Каспийским краевым прогибом, переходящим на юге в Кусаро - Дивический передовой прогиб. На существование глубинных разломов указывают такие факторы, как резкие изгибы рельефа, минеральные источники, зоны повышенной трещиноватости пород, существующие очаги землетрясений. По историческим данным за прошлые века имеется достаточное количество сведений о сильных землетрясениях.

В целом эти данные имеют описательный характер, инструментальных записей сильных землетрясений нет. Анализируя каталог землетрясений и карту распределения сотрясений в населённых пунктах, можно сделать вывод, что довольно систематические данные о землетрясениях поступают с XIX века, т.е. со времени более интенсивного его заселения. В последние годы происходит интенсификация сейсмических событий. Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляют очаговые зоны, расположенной на расстоянии около 40 км к западу от Махачкалы. Воздействие этих землетрясений ощутили на большей части территории Дагестана. Максимальная интенсивность была отмечена в городах Буйнакске, Кизилюрте и Махачкале и составила около 5-6 баллов. Землетрясения сопровождались многочисленными афтершоками. Кроме того, в Дагестане наблюдается сейсмическая активизация в районе Каспийского моря. В этой очаговой зоне зарегистрированы землетрясения с магнитудой около M=4.2. По данным Сейсмологической службы, на территории Дагестана за период с января 1999 по декабрь 2020 годы произошло более 1500 землетрясений с магнитудой $M \geq 2.0$-2.5, из них более 60–ти ощущались в населённых пунктах с интенсивностью от 2 до 5-ти баллов. Урбанизационные процессы, происходящие во всём мире повышающие сейсмический риск, коснулись и наших городов.

Постановка задачи. Хаотичная застройка характерная для Дагестана, а в особенности для Махачкалы, усугубила ситуацию с обеспечением сейсмической безопасности. Город Махачкала расположен на побережье Каспийского моря, при этом грунты весьма неоднородны, часть территории расположена на обводнённых песчаных грунтах, характеризуемых неустойчивостью. В мировой практике известны случаи, когда дома, расположенные на песчаных водонасыщенных грунтах, опрокидывались, вследствие неравномерной осадки основания.

Например, при землетрясении в городе Ниигату [3] с магнитудой M=7,5 и эпицентральным расстоянием Δ=60 км сейсмостойкие 4-х и 5-ти этажные жилые дома внезапно опрокинулись, повернулись вокруг продольной оси и заняли горизонтальное положение [21], потеря

устойчивости произошла в результате увлажнения песчаного основания и как следствие, уменьшения его несущей способности. Всё выше сказанное обосновывает необходимость более тщательного изучения количественных характеристик колебаний грунтов для конкретных территорий.

Методы исследования. Изучая сейсмичность данной территории, было установлено, что сейсмическую интенсивность 8 баллов в районе г. Махачкала могут вызвать местные и близкие землетрясения, приуроченные к Дагестанскому клину с магнитудой 6.0-7.0 и эпицентральным расстояние до 40 км. Вблизи г. Махачкала находятся две крупные очаговые зоны, которые неоднократно проявлялись в течение двух веков [4].

Первая очаговая зона расположена восточнее от города (в Каспийском море) на расстоянии до 30 км с максимальной магнитудой М=6 и глубиной очага 10 км [25].

Вторая зона расположена западнее города на расстоянии 40 км с максимальной магнитудой М=6.7-7, глубина очага 15 км. Согласно работе [5], повторяемость землетрясений класса К=15(М=6)-35 лет, класса К=17(М=7) равна 220 лет, а класса К=16 (М=6.7) - 85 лет.

Согласно [18] с 1830 по 1974 г. в первой очаговой зоне произошло одно землетрясение с максимальной магнитудой М=5.8. Во второй очаговой зоне за этот же период произошло два крупных землетрясения с магнитудой М=7 и М=6.8. Некоторые данные по этим событиям приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1. Список землетрясений, проявившихся в наиболее крупных очаговых зонах на территории Республики Дагестан

Table 1. List of earthquakes that occurred in the largest focal zones on the territory of the Republic of Dagestan

N п.\п.	Дата Date	Координаты Coordinates		T_H, период наблюдения observation period	$M_{мах}$, магнитуда magnitude	J_0, балльность в эпицентре intensity at the epicenter	Примечания Notes
		φ° N	λ° E				
1	6.05.1958	43.14±0.1	47.77	170	5.8	8 ±1	Первая очаговая зона First focal zone
2	21.03.1960	42.9±0.2	47.8	170	5.1	7±1	
3	9.03.1830	43.0±0.5	47.0±0.5	170	7.0	8-9±0.5	Вторая очаговая зона Second focal zone
4	14.05.1970	43.0±0.1	47.09±0.1	170	6.8	8-9±0.5	
5	31.01.1999	43.12	46.97	170	5.15	6±0.5	Третья очаговая зона Third focal zone
6	21.02.1999	42.99	46.99	170	5.4	6-7±1	
7	11.10.2008	43.14	46.35	170	5.12	5±1	Четвертая очаговая зона Fourth focal zone
8	11.10.2008	43.46	45.87	170	5.74	5±1	

Землетрясения класса К=15 в Дагестане по инструментальным данным имеют повторяемость в среднем 35 лет. В первой изучаемой очаговой зоне за 170 лет произошло одно землетрясение с максимальной магнитудой М=5.8.

Исходя из этих данных, для очаговой зоны 1 примем повторяемость землетрясений класса К=15, равной 200 лет, с учётом степени существующей сейсмологической неопределённости она более вероятна. Приведённые выше повторяемости землетрясений класса К=16 и К=17 соответствуют 2-й очаговой зоне. Колебания от первой и второй очаговых зон по своей

интенсивности и количественным характеристикам сопоставимы, поэтому можно будет их объединить. Объединив потоки событий с повторяемостью 220 и 200 лет, получим поток с периодом повторяемости 100 лет. Оценку характеристик колебаний грунтов будем производить, используя данные второй очаговой зоны, но при этом увеличим частоту повторяемости ожидаемых событий.

Максимальное ускорение a_{100} можно оценить при помощи эмпирических зависимостей, полученных на основе обработки записей мирового банка данных землетрясений [25], зарегистрированных на скальных грунтах [8, 9, 10, 11], а также по инструментальным записям слабых землетрясений, экстраполированных в область сильных землетрясений, зарегистрированных на скальных грунтах исследуемой территории [11]. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение максимальных ускорений колебаний грунта, полученных с использованием различных зависимостей

Table 2. Comparison of the maximum accelerations of ground vibrations obtained using various dependencies

N п\п	Формула Formula	Максимальное ускорение Maximum acceleration a_{100} м\с^2	Источник Source
1	$a = 5600 \cdot (R+40)^{-2} \cdot exp(0.8 \cdot M)$	232.6	[8]
2	$lga = 0.28 \cdot M - 0.8 \cdot lgR + 1.7$	230	[9]
3	По палетке ускорений According to the palette of accelerations	238	[10]
4	По записям слабых землетрясений, экстраполированных в область сильных According to records of weak earthquakes extrapolated to the region of strong	240	[11]

Как видно из табл.2 результаты, полученные по зависимостям, в данных работах [8-10], в целом сходятся. Поэтому можно будет принять a_{max} равным 230 см/с2. Эта оценка относится к скальным грунтам (категория 1).

Переход от амплитуд ускорений скальных грунтов к рыхлым, и определение соответствующих им периодов колебаний производился по методике, изложенной в работе [12] с помощью коэффициентов усиления.

При использовании этой методики учитываются мощности H_i и плотности ρ_i рыхлого слоя, скорости распространения поперечных сейсмических волн V_i, а также скорости распространения поперечных волн и плотность подстилающих пород. Среда рассматривается как упругий слой, лежащий на упругом полупространстве.

На основании имеющихся данных рассчитываются значения коэффициентов усиления m_i и n_i:

$$m_i = V_i \cdot \frac{\rho_i}{V_0} \cdot \rho_0; \quad n_i = H_i/V_i \cdot T_j$$

где Tj – период колебаний, соответствующий максимальной амплитуде ускорений.

Задавая различные значения периодов Tj, строятся зависимости ускорений колебаний рыхлых грунтов разных мощностей:

$$a_{рых} = f(H, T); \;\; a_{рых} = a_{ск} \cdot к$$

где к – коэффициент усиления.

На территории г. Махачкалы в 1986-1988 гг. были выполнены работы по сейсмическому микрорайонированию. Используя результаты этой работы по вышеизложенной методике, были определены максимальные ускорения и преобладающие периоды колебаний рыхлых грунтов, при возможных сейсмических воздействиях с магнитудой M=7 для каждого инженерно-геологического участка изучаемой территории [23]. При этом к I категории грунтов отнесены верхнесарматские известняки и песчаники, слагающие гряду Анжи-Арка. К грунтам II категории по карте сейсмического микрорайонирования отнесены сарматские глины, элювиальные

глины и четвертичные глины, и суглинки полутвёрдой и тугопластичной консистенции [20]. К III категории отнесены водонасыщенные пески. В табл. 3 приведены некоторые результаты этих вычислений [24]. Используя данные расчётов табл.3, классифицируем грунты в соответствии с СП 14.13330.2018 на категории по сейсмическим свойствам и критерию максимальных ускорений колебаний.

Таблица 3. Категории грунтов по сейсмическим свойствам и критерию максимальных ускорений колебаний

Table 3. Categories of soils according to seismic properties and the criterion of maximum accelerations of vibrations

Категория грунта по СП Soil category according to SP 14.13330.2018	Максимальные ускорения грунта Maximum ground accelerations см\с^2	Диапазон преобладающих периодов Range of dominant periods T сек	Примечания Notes
I	230	0.25÷0.6	Глина твердая Clay hard
II	300	0.10÷0.6	Глина и суглинок полутвёрдый, слоистый Clay and loam semi-solid, layered
III	360	0.10÷0.6	Пески рыхлые Sands are loose
IV	510	0.10÷0.3	Неустойчивые разновидности песчано-глинистых грунтов, указанные в категории III, склонные к разжижению при сейсмических воздействиях Unstable varieties of sandy-argillaceous soils, specified in category III, prone to liquefaction during seismic actions

Ускорения колебания пылеватых водонасыщенных грунтов могут достигать 510-560 см/с^2, при этом толщина рыхлого слоя достигает 8-15 м. Такие грунты неустойчивы и при сильном землетрясении могут «сползти», что может привести к значительным деформациям зданий, расположенных на них.

Необходимо учесть, что даже землетрясения средней интенсивности могут привести такие грунты к разжижению, то есть, к потере несущей способности, возникающей в результате разрушения структуры грунта и сопровождаемое постепенным восстановлением его структуры и прочности при снятии динамического воздействия. Ускорения колебаний грунтов I категории достигают 230 см/с^2, при толщине слоя 1,5-5 метров имеют достаточно высокие сейсмические свойства. Грунты II категории при ускорении до 300 см/с^2 при толщине слоя 5-10 м, могут снижать сейсмические свойства вышележащих слоев грунтов и образовывать мелкие трещины.

Глины и суглинки полутвердого и твердого характера являются одними из основных слоев в Республике Дагестан с толщиной несущего слоя до 10 метров. Также было выявлено из табл.4 что в I категории присутствуют, так называемые, сарматские глины с толщиной слоя до 2 метров, которые относятся к тонкослоистым твердым грунтам.

При возникновении сильного землетрясения с магнитудой М=7 с эпицентральным расстоянием 40 км от города (односторонний разрыв), максимально возможные ускорения колебания скального грунта составят 230 см/с^2 с периодами, лежащими в диапазоне 0,1-0,8 сек. Максимально возможные колебания рыхлых грунтов могут достигать 420 см/с^2.

На рис. 1 показаны графики зависимости ускорений колебаний грунта на поверхности от колебаний грунта в основании. Видна прямая зависимость толщины рыхлого грунта от максимального воздействия на скальный слой грунта. На графиках (рис. 1 и 2) видно, что при исходном ускорении 230 см/с^2, колебания рыхлой толщи 5-ти метровой толщи, представленной суглинками на периодах 0,1-0,3 сек. имеют значения 300-350 см/с^2. Ускорения колебаний этих же грунтов при толщине 15 метров достигают значений 440 см/с^2 на периодах 0,2-0,3 сек. В даль-

нейшем происходит резкое снижение амплитуд ускорений колебаний рыхлой толщи и на периодах 0,5-0,6 сек максимальные ускорения сравниваются с ускорениями скальных грунтов. Диапазон неустойчивых колебаний рыхлых грунтов (песков, супесей, суглинков), лежит в интервале 0,1-0,3 сек. Построенные кривые позволяют с меньшим риском произвести оценку сейсмической опасности площадке строительства и рассчитать надёжность сооружений. Эту информацию в дальнейшем используем для выбора рационального проектного решения здания.

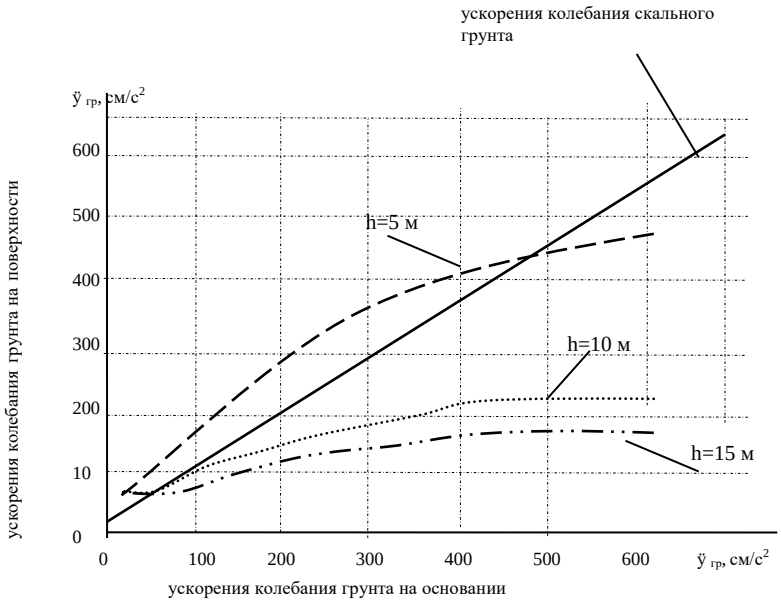


Рис.1. Графики зависимости амплитуд ускорений грунта рыхлого грунта (суглинок) толщиной 5, 10 и 15 м от максимального воздействия на скальный грунт в основании при землетрясении с магнитудой М=7

Fig.1. Graphs of the dependence of the amplitudes of accelerations of loose soil (loam) with a thickness of 5, 10 and 15 m on the maximum impact on the rocky soil at the base during an earthquake with a magnitude of M = 7

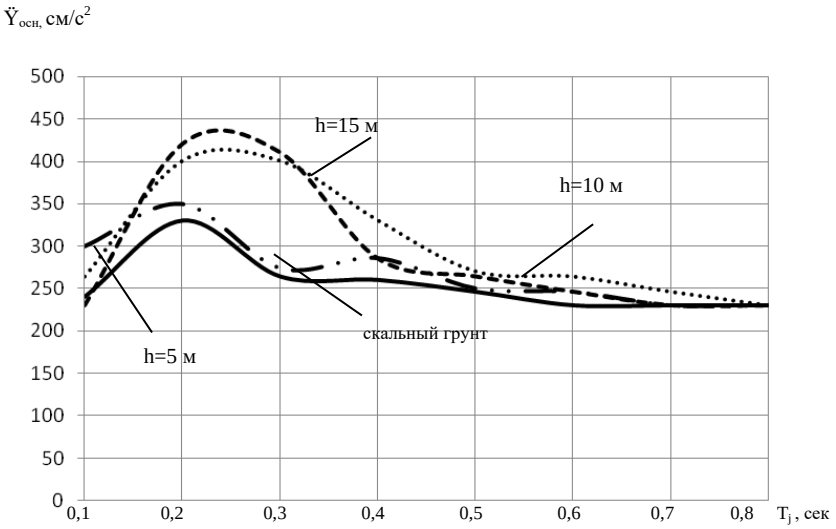


Рис. 2. Зависимость ускорений колебаний грунтов от максимальных ускорений на основании в зависимости от мощности рыхлого слоя при землетрясении с магнитудой М=7

Fig. 2. Dependence of the accelerations of ground vibrations on the maximum accelerations on the base depending on the power of the loose layer in an earthquake with a magnitude of M = 7

Таблица 4. Максимальные ускорения колебания грунта возможные на территории г. Махачкалы при сильном землетрясении с М=7
Table 4. Maximum acceleration of ground vibrations possible on the territory of Makhachkala in case of a strong earthquake, c M=7

N п/п	Индекс участка по карте сейсмического микрорайонирования Plot index	Ускорения грунта при магнитуде М=7, Δ=40 Ground accelerations at magnitude см\с^2						J	H (м)	Уровень грунтовых вод Ground water level	V_i (м/с)	Плотность грунтов Soil density ρ_i (кг/м^3)	Примечания Notes
		Преобладающая частота колебаний грунта Ground motion frequency T (сек)											
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6						
1.	А-1V-3-а	400	330	264	260	246	230	9	7	0-2	214	1.98	Песок мелкий слабовлажный с глубины 2.5 м водонасыщенный
2.	А-1V-3-б	400	330	264	246	230	230	9	6	2-5	207	1.98	
3.	А-1V-4-а	264	400	400	330	270	264	9	13	0-2	214	1.98	
4.	А-1V-4-б	230	440	330	275	264	246	8	10	2-5	207	1.98	
5.	Б-1V-3-а	276	390	300	264	246	230	9	8	0-2	214	1.86	Песок пылеватый, средней плотности, плотный водонасыщенный
6.	Б-1V-3-б	264	370	276	264	246	230	8	8	2-5	207	2.10	
7.	Б-1V-4-а	264	246	560	520	490	380	9	19	0-2	214	1.86	
8.	Б-1V-4-б	264	264	490	490	460	380	8	19	2-5	207	2.10	
9.	Б-V-3-а	255	246	240	230	230	230	8	5	0-2	374	2.03	Элювиальный грунт - глина и суглинок полутвёрдый, слоистый, с присыпками мелкого пылеватого песка
10.	Б-V-3-б	260	250	246	240	230	230	8	6	2-5	374	2.03	
11.	Б-V-3-д	274	246	240	230	230	230	8	8		374	2.03	
12.	Б-V-4-а	284	270	264	246	230	230	8	9	0-2	374	2.03	
13.	Б-V-4-б	290	280	270	264	246	230	8	10	2-5	374	2.03	
14.	В-11-3-д	420	322	264	246	230	230	8	6	-	224	1.94	Глина полутвёрдая реже текучепластичная
15.	В-111-3-а	430	276	264	246	240	230	8	5	0-2	211	1.99	Суглинок тугопластичный, редко до текучего с прослойками мелкого песка
16.	В-111-3-б	264	415	339	264	246	230	8	7	2-5	170	2.05	
17.	В-111-3-д	276	400	322	264	246	230	8	9	-	211	1.99	
18.	В-111-4-а	240	430	322	264	246	230	8	10	0-2	211	1.99	
19.	В-IV-3-а	360	330	264	246	230	230	8	7	0-2	214	1.98	Песок пылеватый плотный и средней плотности, влажный в зоне аэрации, ниже водонасыщенный
20.	В-IV-3-б	345	330	264	246	230	230	8	7	2-5	207	1.98	
21.	В-IV-4-а	450	300	560	490	330	300	8	16	0-2	214	1.98	
22.	В-IV-4-б	430	270	460	400	330	300	8	16	2-5	207	1.98	
23.	В-IV-4-в	430	270	460	400	330	300	8	16	5-10	207	1.98	
24.	В-V-3-а	390	270	246	240	230	230	8	5	0-2	224	2.03	Элювиальный грунт- Глина и суглинок полутвёрдый, слоистый, с присыпками мелкого и пылеватого песка
25.	В-V-3-б	370	320	264	246	230	230	8	7	2-5	224	2.03	
26.	В-V-3-в	264	370	320	300	264	246	8	9	5-10	224	2.03	
27.	В-V-3-д	246	390	330	300	264	246	7	10	-	224	2.03	
28.	В-V-4-а	246	390	330	300	264	246	8	10	0-2	224	2.03	
29.	В-V1-1-а	230	230	230	230	230	230	8	1,5	0-2	224	2.07	Сарматская глина твёрдая и тонкослоистая
30.	В-V1-2-а	230	230	230	230	230	230	8	2	0-2	224	2.07	
31.	В-V1-2-б	390	264	240	230	230	230	8	5	2-5	224	2.07	
32.	В-V1-2-д	230	230	230	230	230	230	7	1,5	-	224	2.07	
33.	Г-111-3-а	400	270	264	240	230	230	8	5	0-2	211	2.05	Суглинок полутвёрдый, слоистый с тонкими прослойками мелкого песка
34.	Г-111-3-б	264	400	400	340	270	260	8	10	2-5	170	2.05	
35.	Г-111-4-а	230	410	360	290	264	240	8	11	0-2	211	2.05	
36.	Г-111-4-б	400	400	460	380	340	270	8	12	2-5	170	2.05	
37.	Г-1V-3-а	410	290	264	240	230	230	9	5	0-2	214	2.07	Песок мелкий, плотный водонасыщенный
38.	Г-1V-3-б	380	330	264	230	230	230	9	7	2-5	214	2.07	
39.	Д-1-4-а	264	390	390	320	270	260	8	13	0-2	220	2.00	Пролювиально-делювиальные отложения глины, суглинки
40.	Д-1-4-б	320	400	400	330	300	264	8	13	2-5	204	1.99	
41.	Д-1-4-в	320	400	400	330	300	264	8	13	5-10	204	1.99	
42.	Д-1-4-г	320	400	400	330	300	264	8	33	>10	204	1.99	

Оптимальное проектное решение. Надёжность зданий зависит от спектральных характеристик землетрясения, которую можно определить через функцию P(T), оцениваемую как вероятность не наступления состояния отказа в течении расчётного строка службы T:

$$P(T)=1-P[R] \quad (1)$$

Вероятность отказа

$$P[R]=\sum_{j}\sum_{i}P[R_i/\Phi_j] \quad (2)$$

где P[·] – вероятность события в скобках;

R_i – событие, при наступлении отказа i-го вида;

Φ_j – событие, при наступлении j – го землетрясения с соответствующими спектральными параметрами.

Кроме надёжности здания, к критериям влияния на оптимальность принятого проектного решения можно отнести стоимость, архитектурно-эстетические, функциональные и другие показатели. Поэтому выбор оптимального проектного решения будем производить путём оценки последствий принимаемого решения по выше перечисленным критериям. Такая задача соответствует задаче вероятностного программирования [26], общая структура которой включает следующие элементы:

П – множество площадок строительства;

n–отдельная площадка строительства, $n \in П$;

К – множество проектных решений;

к – отдельное проектное решение, $k \in K$;

I – множество критериев принятия решения;

i – отдельный критерий принятия решения, $i \in I$

Оптимальная функция решения f (n, k) при этом будет соответствовать минимальному общему риску:

$$f(n,k)=max\sum_{i=1}^{I}f_{nki} \quad (3)$$

$$k \in K$$

$$n \in П$$

f_{nki} – нормированная функция прямых или косвенных потерь по критерию i, связанная с выбором n – ой площадки для к-го проектного решения.

Таким образом, задача сводится к поиску минимальной строки матрицы $[f_{nki}]$

Решение задачи (2) связано с выражения обобщенной оценки по каждому решению с учётом всех его последствий. Решим задачу методом системного анализа, предложенного в [27]. Каждому действию f_{nk} присваивается число, которое достаточно полно представляет информацию, содержащуюся в f_{nk}. При этом множество рассматриваемых критериев, разбивается на три класса:

$I^+(kk')$ – подмножество критериев, по которым k предпочтительнее k'

$I^-(k, k')$ – подмножество критериев, по которым k равноценно k'

I-(k k') – подмножество критериев, по которым k' предпочтительнее k

Для каждого из этих подмножеств образуется новый критерий, объединяющий все критерии, вошедшие в данное подмножество, и через три числа $P^+(k, k'')$, $P^-(k', k'')$, $P^-(k', k'')$ представляют относительную важность этих трёх подмножеств. Данную информацию используем для построения оптимального проектного решения.

Представим условия лучшего варианта проектного решения в виде:

$$\frac{P^+(k/,\ k//)}{P^-(k/,\ k//)} \geq C \quad (4)$$

где С – некоторое положительное число, С≥1,

Оптимальное решение принимается из условия максимума суммы отношений P_1/P_2 для каждого проектного решения и последовательно по всем площадкам строительства.

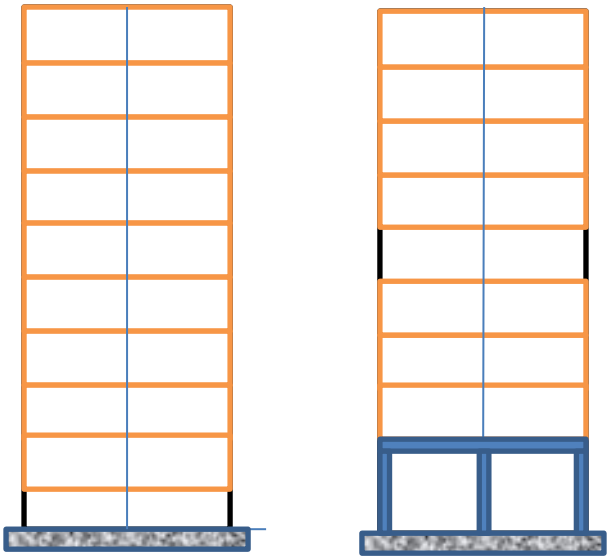
$$F(n,k) = max \sum_{\substack{k \in K \\ k \in \Pi}} \left(\frac{P^+}{P^-}\right) \quad (5)$$

Для принятия оптимального решения необходимо рассчитать надёжность здания, а следующим этапом перевести полученные величины в цифровые значения.

Используя приведённую выше методику, проведём расчёты по определению оптимального конструктивного решения многоэтажного здания для двух площадок строительства при расчётном сейсмическом воздействии с магнитудой М=7.

Первая площадка расположена на скальных грунтах, вторая – на песчаных грунтах мощностью 10 м. Для скальных грунтов преобладающие периоды колебаний лежат в диапазоне 0,2-0,8 сек при максимальных ускорениях 230 см/с^2, а для песков толщиной 10 м, ускорения принимаем (рис. 2) равными 420 см/с^2, им соответствуют преобладающие периоды колебаний 0,1-0,3 сек.

Рассмотрим 9-ти этажные крупнопанельные здания (рис. 3а) с жёстким конструктивным решением (П) и с гибким 1-м этажом (ПГ) (рис. 3б). Периоды собственных колебаний для здания типа П лежат в диапазоне 0,2-0.3 сек, для зданий типа ПГ-0,8-1 сек.



1 2

Рис. 3. Схемы конструктивных решений 9-ти этажного здания
1 – крупнопанельное здание с жёстким конструктивным решением
2 – крупнопанельное здание с гибким первым этажом
Fig. 3 Schemes of design solutions of a 9-storey building
1 – large-panel building with a rigid structural solution
2 – large-panel building with flexible ground floor

Предположим, что наиболее важным критерием является надёжность здания, далее следует стоимость, архитектурно-эстетические требования и технологические требования по порядку.

Обозначим надежность через P_1, стоимость – P_2, архитектурно-эстетические требования – P_3 и P_4 – технологические. Следовательно,

$$P_1 > P_2 > P_3 = P_4 \quad (6)$$

Будем считать, что критерии P_3 и P_4 рассмотренные совместно, имеют большую важность, чем критерий стоимости:

$$P_3 + P_4 > P_2 \quad (7)$$

В соответствии с (6) и (7) примем следующие значения приоритетных решений:

$$P_1=7,\ P_2=5,\ P_3=3,\ P_4=3,$$

Далее по рассматриваемым критериям составим шкалы оценок, при этом надёжность и стоимость будут зависеть от характеристик строительной площадки.

Таблица 5. Шкала оценок
Table 5. Rating scale

Критерий Criterion	Конструкция Construction	Шкала оценок для скальных грунтов Rating scale for rocky soils	Шкала оценок для рыхлых грунтов Grading scale for loose soils
i=1- Надёжность (P_1) Reliability	П	Средняя НС Medial	Низкая НН Low
	ПГ	Низкая НН Low	Средняя НС Medial
i=2- Стоимость (P_2) Price	П	Средняя СС Medial	Средняя СС Medial
	ПГ	Высокая СВ High	Средняя СС Medial
i=3-Архитектура (P_3) Architecture	П	Низкая АН Low	Низкая АН Low
	ПГ	Высокая АВ High	Высокая АВ High
i=4- Технологичность (P_4) Manufacturability	П	Высокая ТВ High	Высокая ТВ High
	ПГ	Средняя ТС Medial	Средняя ТС Medial

В табл. 5 приведена оценочная шкала для скальных и песчаных грунтов. Надёжность определена с учётом возможных резонансных периодов колебаний, связанных с совпадением собственных колебаний грунтов с периодами колебаний грунтов при сильном землетрясении с магнитудой М=7, а также надёжности принятого конструктивного решения здания.

В табл. 6 приведена матрица оценок, соответствующая данным табл. 5.

Таблица 6. Матрица оценок
Table 6. Evaluation matrix

Конструкция Construction	P_1	P_2	P_3	P_4
Скальные грунты Rocky soils				
П	НС	СС	АН	ТВ
ПГ	НН	СВ	АВ	ТС
Песчаные грунты Sandy soils				
П	НН	СС	АН	ТВ
ПГ	НС	СС	АВ	ТС

Согласно формуле (4), найдем отношение $P^+ - P^-$ для каждой пары проектных решений и приведём их в табл. 7, запишем только те, для которых $P^+ / P^- \geq 1$

Таблица 7. Отношение P^+ / P
Table 7. P+ /P ratio

k'	k''			
	1	2	3	$\sum P^+ / P^-$
Скальные грунты Rocky soils				
1	-	4	-	4
2	-	-	-	-
Песчаные грунты Sandy soils				
1	-	-	-	-
2	3,33	-	-	3,33

Из табл. 7 следует, что на площадках строительства со скальными грунтами лучше строить панельное здание с жестким конструктивным решением, а на рыхлых грунтах здание с гибким первым этажом.

Обсуждение результатов. С увеличением мощности рыхлого слоя грунта уменьшается его жёсткость, что может привести к значительному увеличению интенсивности землетрясения на поверхности, это показывают и графики на рис. 1. На графиках рис. 2 видно, что акустическая жесткость по верхним 15 метрам осадков различается, чем больше мощность слоя рыхлого грунта, тем меньше средняя жесткость. Амплитуды ускорений начинают насыщаться практически сразу в данном диапазоне исходных воздействий на основание. Амплитуды колебаний грунтов зависят от частотного состава землетрясений. Подтверждением этого являются данные, приведённые в работе [14]. На рис. 3 видно, что зависимость приращения интенсивности за счет резонансов от максимального ускорения на основании для разных значений мощности слоя имеют схожий характер с кривыми коэффициентов усиления в области преобладающего периода [22].

Причем, реакция грунта различается на разных частотных диапазонах. Максимальный отклик получают грунты в диапазоне преобладающих периодов 0,2-0,3 сек. В дальнейшем с увеличением периодов колебаний ускорения падают и на периодах 0,5 - 0,6 сек амплитуды колебаний грунтов, относящихся к разным категориям, по сейсмическим свойствам сравниваются.

Полученные результаты оценки количественных параметров колебаний грунтов использованы для определения надёжности здания, при этом предложенная методика оценки надёжности здания даёт возможность учитывать при расчётах, как конструктивные особенности здания, так и другие параметры.

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины рыхлого слоя увеличивается величина максимального ускорения, диапазон неустойчивых колебаний периодов при этом лежит в интервале 0,1-0,5 сек. Обработав результаты максимальных ускорений, приведённых в табл. 4, были определены средние значения ускорений для рыхлых грунтов, слагающих территорию г. Махачкалы.

Таким образом, грунты II и III категории по СП 14.13330.2014 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» могут иметь максимальные ускорения грунтов при возникновении землетрясения с магнитудой M=7 до 300 см/с^2 и 360 см/с^2. Ожидаемые максимальные ускорения средних грунтов при интенсивности 8 баллов, согласно [13], составляют 0.121 ÷ 0.240 см/с^2.

Оценка надёжности здания с учётом грунтовых условий показала, что существенное значение имеют конструктивные решения здания. Так для условий г. Махачкалы на скальных грунтах лучше строить здания с жестким конструктивным решением, а на грунтах рыхлых здания с гибким первым этажом.

Библиографический список:

1. Отчет о научно-исследовательской работе ФИЦ ЕГС РАН «Исследование параметров сейсмического режима основных сейсмоактивных регионов Северной Евразии», 2016 г., Обнинск. С. 17-28
2. Смирнова М.Н., Бражник В.М., Чуприн В.В., Дадашев С.В., Мамацуев К.А. В кн. Сейсмичность и сейсмотектоника Восточного Предкавказья. Махачкала, 1985 г.
3. Satake, K.; Sawai, Y.; Shishikura, M.; Okamura, Y.; Namegaya, Y.; Yamaki, S. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation // American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract T31G
4. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., МишинА.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18
5. Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., “Рекуррентные соотношения расчёта параметров сейсмического режима на основе вероятностной интерпретации закона повторяемости”, Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2012, № 1, 44–48
6. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период VII в.н.э. до 2005 года. Махачкала, «Эпоха», 2007 г
7. Малянова Л.С., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 311–319

8. Donovan N.C., Bornstein A.E. Uncertainties in Seismic risk procedures// Proc. Amec. Soc. Civil Eng. J. Geotech. Eng. Div. 1978. Vol. 104.P. 869-887
9. Ньмарк Н., Розенблюэт Э. Основы сейсмического строительства: сокр. Пер. с англ. / Под. Ред. Я.М. Айзенберга. М.: Наука, 1980, с. 103 льных площадок для строительства сейсмостойких зданий в г. Махачкале /Инженерно-геологические особенности Дагестанской АССР. Махачкала.: 1984, 256 с
10. Зайнулабидова Х.Р. Параметры колебаний скальных грунтов при землетрясениях различной интенсивности / Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 2 (722). С. 110-120.
11. П.И. Крамынин, В.В. Штейнберг Параметры колебаний плотных грунтов. М.: Наука, 1976. с. 23-35. (Вопр. Инж. Сейсм. Вып. 18.)
12. СП 330.1325800.2017 Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования инженерно-сейсмометрических станций
13. Зайнулабидова Х.Р. Влияние региональных характеристик грунтов на сейсмичность территорий. Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 1 (61). С. 96-107. DOI: 10.36622/VSTU.2021.61.1.009, ИФ=0,607
14. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Влияние коэффициента трения-скольжения опорных элементов и параметров сейсмического воздействия на реакцию и надежность сооружений с сейсмозащитой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2021. –No 2. С. 12-23. DOI:10.15593/perm.mech/2021.2.02
15. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. The Influence of the Friction-Sliding Coefficient of Support Structures and Parameters of Seismic Actions on Reactions and Reliability of Structures with Seismic Protection. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 2, pp. 12-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.02
16. Уздин А.М., Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В., Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Прокопович С.В. Статистическое моделирование сейсмических воздействий / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 19-27.
17. Зайнулабидова Х.Р. Параметры колебаний скальных грунтов при землетрясениях различной интенсивности / Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 2 (722). С. 110-120.
18. Zainulabidova K.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity / Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. Т. 56. № 1. С. 48-53.
19. A.D. Abakov, H.R. Zainulabidova, H.M. Omarov, R.G. Gasanov Computational models of seismic effects taking into account the extent of the seismological information completeness IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 022004 doi:10.1088/1757-899X/698/2/022004
20. Абакаров А.Д., Гасанов Р.Г. Оценка надежности и живучести систем с учетом взаимосвязи элементов при сейсмическом воздействии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 118-125.
21. Рутман Ю.Л., Ковалева Н.В., Давыдова Г.В. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. –2013. – № 5 (40). – С. 107–115.
22. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. К определению расчетных уровней ускорений сейсмических колебаний грунтов с учетом местных сейсмологических особенностей.// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.-2001, №5, с.6-7.
23. Синящек М.Н. К статистической теории сейсмических спектров.// Строительная механика и расчет сооружений.-1982, №2, с. 62-65
24. Денисов Б.Е., Кахновский А.М. Методы представления сейсмометрической информации в цифровую форму.// Сейсмостойкое строительство.- М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1977, №11, с. 18-22.
25. Apap, R. M., and Grossmann, I. E. (2017). Модели и вычислительные стратегии многоступенчатого стохастического программирования в условиях эндогенных и экзогенных неопределенностей. *Вычисл. Chem. Eng.* 103, 233-274. doi:10.1016/j.compchemeng.2016.11.011
26. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 208 с

References:

1. Report on the research work of the FITC of the USGS RAS "Study of the parameters of the seismic regime of the main seismically active regions of Northern Eurasia", Obninsk. 2016: 17-28 (In Russ)
2. Smirnova M.N., Brazhnik V.M., Chuprin V.V., Dadashev S.V., Mamatsuev K.A. In the book. Seismicity and seismotectonics of the Eastern Caucasus. Makhachkala, 1985 (In Russ)
3. Satake, K.; Sawai, Y.; Shishikura, M.; Okamura, Y.; Namegaya, Y.; Yamaki, S. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation. *American Geophysical Union, Fall Meeting* 2007, abstract T31G
4. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishina.V., Prilepin M.T., Reylinger R.E., Hamburger M.U., Shempelev A.G., Junga S.L. Modern geodynamics of the Caucasus (based on GPS measurements and seismic data). *Physics of the Earth.* 1999; 9: 3-18 (In Russ)
5. Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., "Recurrent relations of calculation of seismic regime parameters based on probabilistic interpretation of the law of repeatability", [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki] *Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences*, 2012; 1: 44-48 (In Russ)
6. General catalogue of earthquakes in Dagestan. Macroseismic and instrumental data on earthquakes for the period of the VII century A.D. until 2005. Makhachkala, "Epoch", 2007 (In Russ)

7. Malyanova L.S., Gabsatarova I.P. Spectral and focal parameters of earthquakes in the North Caucasus. *Earthquakes of Northern Eurasia*. 2013; 22: 311-319 . Obninsk: FITC EGS RAS, 2019. (In Russ)
8. Donovan N.C., Bornstein A.E. Uncertainties in Seismic risk procedures. *Proc. Amec. Soc. Civil Eng. J. Geotech. Eng. Div.* 1978; 104: 869-887
9. Nymark N., Rosenbluet E. Fundamentals of seismic construction: a short translation from English. Edited by Ya.M. Aizenberg. M.: Nauka, 1980: 103 engineering sites for the construction of earthquake-resistant buildings in Makhachkala. *Engineering-geological features of the Dagestan ASSR*. Makhachkala. 1984: 256.(In Russ)
10. Zainulabidova H.R. Parameters of vibrations of rocky soils during earthquakes of various intensity. News of higher educational institutions. [Stroitel′stvo] *Construction*. 2019; 2 (722): 110-120. (In Russ)
11. P.I. Kramynin, V.V. Steinberg Parameters of vibrations of dense soils. M.: [Nauka] *Science.* 1976: 23-35. (Vopr. Eng. 18.) (In Russ)
12. SP 330.1325800.2017 Buildings and structures in seismic areas. Rules for the design of engineering seismometric stations (In Russ)
13. Zainulabidova H.R. Influence of regional characteristics of soils on the seismicity of territories. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2021; 1 (61): 96-107. DOI: 10.36622/VSTU.2021.61.1.009, IF=0.607 (In Russ)
14. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Influence of the friction-slip coefficient of support elements and parameters of seismic impact on the reaction and reliability of structures with seismic protection. [Vestnik Permskogo natsional′nogo issledovatel′skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika] Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2021; 2: 12-23. DOI:10.15593/perm.mech/2021.2.02 (In Russ)
15. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. The Influence of the Friction-Sliding Coefficient of Support Structures and Parameters of Seismic Actions on Reactions and Reliability of Structures with Seismic Protection. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021; 2: 12-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.02
16. Uzdin A.M., Smirnova L.N., Sorokina G.V., Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Prokopovich S.V. Statistical modeling of seismic impacts. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2019; 5: 19-27. (In Russ)
17. Zainulabidova H.R. Parameters of vibrations of rocky soils during earthquakes of various intensity / News of higher educational institutions. [Stroitel′stvo] *Construction*. 2019; 2 (722): 110-120. (In Russ)
18. Zainulabidova K.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity .*Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 2019; 56(1):. 48-53.
19. A.D. Abakov, H.R. Zainulabidova, H.M. Omarov, R.G. Gasanov Computational models of seismic effects taking into account the extent of the seismological information completeness IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 022004 doi:10.1088/1757-899X/698/2/022004 (In Russ)
20. Abakarov A.D., Hasanov R.G. Assessment of reliability and survivability of systems taking into account the interrelation of elements under seismic impact.[Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46 (2): 118-125. (In Russ)
21. Rutman Yu.L., Kovaleva N.V., Davydova G.V. Determination of optimal damping parameters in seismic isolation systems. [Inzhenerno-stroitel′nyy zhurnal] *Engineering and Construction Journal.* 2013; 5 (40): 107-115. (In Russ)
22. Abakarov A.D., Zainulabidova Kh.R. To determine the calculated levels of accelerations of seismic vibrations of soils taking into account local seismological features. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*.2001;5:6-7. (In Russ)
23. Sinyashek M.N. To the statistical theory of seismic spectra. *Construction mechanics and calculation of structures.* 1982; 2: 62-65(In Russ)
24. Denisov B.E., Kakhnovsky A.M. Methods of presenting seismometric information in digital form. *Earthquake-resistant construction*. - M.: TSNIISK im. Kucherenko, 1977;11: 18-22. (In Russ)
25. Apap, R. M., and Grossmann, I. E. (2017). Models and computational strategies of multi-stage stochastic programming in conditions of endogenous and exogenous uncertainties. Calculation. Chem. Eng. 103, 233-274. doi:10.1016/j.compchemeng.2016.11.011
26. Mushik E., Muller P. Methods of technical decision–making. M.: [Mir] *World* 1990; 208. (In Russ)

Сведения об авторах:
Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры; hanzada1@mail.ru
Гасанов Руслан Гасанович, старший преподаватель кафедры архитектуры; ruslan.gasanovich@mail.ru
Information about the authors:
Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Architecture; hanzada1@mail.ru
Ruslan G. Gasanov, Senior Lecturer, Department of Architecture; ruslan.gasanovich@mail.ru
Конфликт интересов/ Conflict of interest.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 29.05.2022.
Одобрена после/рецензирования Reviced 16.06.2022.
Принята в печать/ Accepted for publication 16.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.32
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-123-132 Обзорная статья/Review article

Управляемые воздействия на структурообразование и свойства цементных бетонов

Ю.Г. Иващенко, Р.Т. Мамешов
Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. В работе рассматриваются управляемые воздействия на изменение свойств компонентов, управляющий эффект технологических способов и приемов получения композиционных строительных материалов с комплексом заданных свойств. **Метод.** Применены методы механо-физического, физико-химического, нанотехнологического воздействия. **Результат.** Систематизированы и обобщены системно-структурные подходы управляющих воздействий на стадии структурообразования, технологических переделов, формирования оптимальной структуры и свойств цементных бетонов. Приведены физико-химические принципы и механизмы формирования структуры, основанные на установлении роли управления механо-физическими, физико-химическими, нанотехнологическими методами воздействия на систему «цемент – вода». Выявлена возможность управления структурными превращениями в вяжущих системах, в том числе, за счет применения технологических воздействий. **Вывод.** Реализация направленных условий воздействий на компоненты цементных бетонов обеспечит целенаправленное конструирование структур современных строительных материалов.

Ключевые слова: строение композиционного материала, портландцемент, составные компоненты, структурообразующие факторы, свойства

Для цитирования: Ю.Г. Иващенко, Р.Т. Мамешов. Управляемые воздействия на структурообразование и свойства цементных бетонов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(2):123-132. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-123-132

Controlled impacts for structure formation and properties of cement concretes

Yu. G. Ivaschenko, R.T. Mameshov
Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Polytechnic Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. **Objective.** The paper considers controlled effects on changes in the properties of components and the control effect of technological methods and techniques for obtaining composite building materials with a set of specified properties. **Method.** Methods of mechano-physical, physico-chemical, nanotechnological influence were applied. **Result.**The system-structural approaches are systematized and generalized by control actions at the stage of structure formation, technological stages, formation of the optimal structure and properties of cement concrete. The physicochemical principles and mechanisms of structure formation are given, based on establishing the role of controlling the mechano-physical, physico-chemical, nanotechnological methods of influencing the cement-water system. The possibility of controlling structural transformations in binder systems, including through the use of technological influences, has been revealed. **Conclusion.** The implementation of the impacts on the components of cement concretes will ensure the targeted design of the structures of modern building materials.

Keywords: structure of a composite material, portland cement, constituent components, structure-forming factors, properties

For citation: Yu.G. Ivaschenko, R.T.Mameshov. Controlled impacts for structure formation and properties of cement concretes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.2022;49(2):123-132.(In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-123-132

Введение. Теоретические положения строительного материаловедения, огромная база экспериментальных данных, практический опыт модернизации технологических переделов определяют современную методологию получения материалов с комплексом заданных свойств, уровнем ресурсоэнергоэффективности технологий [1,4,6,34,35].

Материалы на основе минеральных вяжущих веществ востребованы в современных строительных технологиях как конструкционные, теплоизоляционные, сухие строительные смеси (ССС), специального назначения, например, такие как радиационнозащитные.

Строительные материалы являются композиционными материалами со сложной полиструктурной организацией.

Постановка задачи. Многообразие структурных уровней с качественно отличными механизмами их организации ставит многоплановую задачу управления структурообразованием и формированием свойств материала. Управление рассматривается как алгоритм направленного формирования структур на масштабных, от нано- до макроуровнях материалах, с учетом материаловедческих и технологических аспектов на методологической платформе «свойства компонентов – состав – структура – функциональные свойства – состояние (во времени)» [3,15,17,18,33,34,39].

Под структурой бетона подразумевают строение материала на самых различных уровнях, характеризующих полиструктурное строение материала, с выделением в инженерных расчетах микро-, мезо- и макроструктур и особенности процессов структурообразования, определяемые разными структурообразующими факторами.

Процесс структурообразования цементного камня (нано- и микроструктура) протекает в динамической смене образующихся структур в прединдукционный, индукционный и постиндукционный периоды гидратации, характеризующих кинетику структурной прочности. Наложение указанных процессов приводит зачастую к возникновению внутренних напряжений (явление контракции) и снижению прочностных показателей. Свойства цементного камня твердеющего в свободном объеме отличается от свойств цементного камня в контактной зоне с заполнителем, что объясняется поверхностными, капиллярными деструктивными явлениями, возникающими внутренними напряжениями.

Структурообразование происходит по «эстафетному» механизму твердения вяжущей матрицы со сменой различных структур, стабильность которых не достигается даже в значительные сроки [28]. Оптимальными при формировании структуры и свойств твердеющего цементного теста являются физико-технические воздействия, положительные температуры (40-50 °С) [6].

Таким образом, твердение вяжущих веществ обусловлено процессами гидратообразования и формирования структуры новообразований:

- химическим связыванием воды затворения вяжущим веществом;
- образованием и развитием в твердеющей системе пространственного каркаса;
- формирование искусственного камня в вяжущей системе, как совокупности организованных структур, определяется не только кинетикой, но и количественными характеристиками этих процессов, и взаимным влиянием друг на друга [3-8].

Для гетерогенных материалов типа бетонов структуру можно определить как топологию объектов с фиксированными связями между отдельными структурными элементами любого масштабного уровня.

Методы исследования. При создании структур необходимо учитывать специфику физико-химических и технологических особенностей составляющих компонентов композиционного материала с ярковыраженной гетерогенностью. В этой связи выделяются управляемые воздействия на изменение свойств компонентов, управляющий эффект технологических способов и приемов получения строительных материалов и изделий.

Переход к физико-химическим принципам и механизмам формирования структуры, основанным на установлении роли управления механо-физическими, физико-химическими, наннотехнологическими воздействиями на систему «цемент – вода» обеспечит получение бетонов прочностью до 120-150 МПа [6,18,41-44].

Разработка технологии вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), других разновидностей типа тонкомолотых цементов (ТМЦ), синтеза прочности цементного камня на их основе связана с положениями физико-химической механики, развитой работами П.А. Ребиндера, Н.В. Михайлова, Н.Б. Урьева и др., рассматривающими структурно-механические свойства дисперсных систем и процесса их гидратационного твердения. Синтез высокой прочности, плотности цементного камня на основе ВНВ, ТМЦ обуславливается снижением их водопотребности [20,27].

Резервы повышения эффективности использования цемента заключается в трансформации его химико-минералогического состава, регулированием окислительно-восстановительной среды в цементной печи, увеличение удельной поверхности механоактивацией совместно с минеральными добавками и поверхностно-активными веществами, оптимизацией гранулометрического состава посредством сепарации, снижением содержания активных щелочей.

Установлено, что обработка минеральных добавок, вводимых в цемент типа активного кремнезема (опока, трепел, диатомит, топливных зол, шлаков черной и цветной металлургии), водными растворами, содержащими кислоты или соли трехвалентных элементов (Al^{3+}, Fe^{3+}, Cr^{3+} и др.), приводит к увеличению Льюисовских и Бренстедовских кислотных центров на поверхности, что способствует повышению пуццолановой активности материала [1,37,39,40].

Для успешного решения проблемных задач повышения эффективности цементов необходимо рассмотрение возможностей управления в системе «цемент – вода» свойствами воды затворения, поверхностной активности минеральных добавок, технологическими приемами при смешивании, в начальных этапах структурообразования, рациональных режимах твердения.

При управлении механохимической активностью твердого тела необходимо сочетать вид и степень механического воздействия с подбором химического состава среды, в условиях которой осуществляется измельчение с учетом физико-химического воздействия на процесс активации. Хемосорбционное модифицирование поверхности носит, как правило, необратимый характер. Механическое воздействие на кристаллическую и молекулярную структуру твердого тела приводит к увеличению дислокации, раскрытию активной поверхности, механодеструкции (аморфизации) элементов структуры, что приводит к существенному увеличению количества активных центров гранулометрического состава, удельной поверхности.

Исследования природы взаимодействия частиц с водой и сил, проявляющихся при твердении вяжущей системы, показывают, что введение ионов частиц примесей электрические, магнитные воздействия приводят к упорядочению или разупорядочиванию структуры воды. Вода с оптимально уменьшенным значением модуля упругости, то есть более разупорядоченная, приобретает повышенную активность как растворитель в химической технологии.

Результаты исследований показывают, что для твердеющих вяжущих вода является особым компонентом, свойства которого зависят от изменяющейся поверхностной энергии частиц цемента, минеральных наполнителей, концентрации и состава ионов, свойств поверхностно-активных веществ и химических добавок.

Вода благодаря своему строению, способна реагировать на самые слабые физико-химические воздействия с изменением своих свойств. Воду и водные растворы можно перевести в активированное состояние следующими способами: подогрев, деаэрация, высоковольтный электрический разряд, акустическая, электромагнитная обработка, электрохимическая активация. Различные способы активации воды, изменяющие ее состав, структуру, свойства могут быть разделены на физические, химические, комбинированные способы воздействия. Активированная вода обладает большой химической активностью за счет изменения ионного соста-

ва, показателя pH, удельной электрической проводимости, температуры и других параметров, что в целом оказывает управляющее воздействие на структурирование минеральных вяжущих систем [25,26].

Крупные и мелкие заполнители оказывают многостороннее влияние на свойства бетонной смеси и бетона, в большей степени на реологические свойства бетонной смеси вследствие иммобилизации части воды затворения. По своему качеству заполнитель должен соответствовать требуемым свойствам бетона (плотность, прочность, морозостойкость, ограничение содержания вредных примесей) [11].

Мелкие заполнители модифицируют термохимическими способами обработки. Для повышения адгезии заполнителей к цементному камню применяют различные способы активации поверхности: механическая активация, прививка на поверхности водорастворимых полимерных олигомеров, смол, обработка водными растворами электролитов.

Эффективны крупные заполнители с кубовидной формой щебня. Минимизация межзерновой пустотности смеси крупного и мелкого заполнителя направлена на снижение расхода цемента и улучшение физико-механических характеристик бетона. Наибольшая прочность бетона достигается при максимальной прочности зерен щебня фракции – 20 мм. Введение минеральных добавок в бетонную смесь позволяет регулировать прочностные и деформативные свойства бетона, повысить химическое сопротивление и долговечность материалов. Оптимум наполнения определяется химико-минералогическим составом, дисперсностью, гранулометрией, показателями кислотно-основных свойств, пуццолановой активностью [4]. Эффект наполнения реализуется за счет сокращения расхода цемента на 10-40% и повышения прочности бетона на 25-50%.

Пластифицирующие, супер- и гиперпластифицирующие олигомерные, мономерные водорастворимые соединения являются одним из широко применяемых химических добавок в современной технологии бетонов, как действенный способ управления процессами структурообразования, улучшения технологических показателей бетонных смесей и обеспечивающих заданные сроки эксплуатационной надежности изделий и конструкций [33].

Метод адсорбционного модифицирования с помощью ПАВ (катион-анион и неионактивнх) регулирует изменение молекулярных свойств поверхности, как гидрофильных, так и гидрофобных частиц, обуславливающее максимальное сближение их с вяжущей матрицей.

Эффективными являются ПАВ, химически взаимодействующих с частицами дисперсной фазы различной природы с учетом кислотно-основных свойств поверхности. В твердеющих системах на основе вяжущих гидратационного твердения достигается водоредуцирующий эффект и улучшение физико-технических свойств материала. Добавки этого класса существенно снижают значение межфазной энергии на границе раздела твердое тело–жидкость, следовательно, выступает в качестве сильных диспергаторов при механо-химической активации вяжущих веществ [32,33,38].

Получение высокого модифицирующего эффекта достигается применением водорастворимых продуктов органического синтеза олигомерного (полимерного), мономерного строения и размером полимерной цепи с боковым расположением гидрофильных и гидрофобных групп. Гидрофобность молекулам придают бензольные, нафталиновые, меламиновые циклы, а гидрофильность – сульфогруппы. Основными определяющими факторами в процессе адсорбционного модифицирования являются закономерности взаимодействия на разных этапах формирования структуры цементно-водных систем.

Модифицированные полимерные водорастворимые материалы (интерполимерные комплексы – ИПК) представляют широкий класс интерполимерных соединений и находят практическое применение в качестве структурообразователей дисперсных систем.

Несомненный интерес представляет олигомерные и полимерные продукты конденсации ацетон-, фенол-, мочевины и формальдегида. Реакции трехмерного сшивания этих продуктов

обуславливает их структурообразующую способность в дисперсных системах. В процессе комплексообразования ИПК могут участвовать различные классы соединений: комплиментарные макромолекулы (интерполимерные комплексы), поверхностно-активные вещества (комплексы полимер–ПАВ), ионы металлов (комплексы полимер–металл) и др. наиболее распространенный способ получения – это смешение растворов готовых взаимодействующих комплексов в общем растворителе (вода) [33].

В бетонную смесь вводятся короткомерные стальные, синтетические, стеклянные, асбестовые и графитовые волокна. Отношение длины фибры к ее диаметру обычно находится в пределах 30-150 при длине волокна 1-76 мм.

Результаты исследований подтверждают тот факт, что введение фибр в бетон улучшает его прочность, способность выдерживать статические и динамические нагрузки, повышает трещиностойкость. Значительное улучшение свойств бетона может быть достигнуто введением армирующих фибр из прочного и жесткого материала.

Волокна (фибры) разделяют на два типа:

1) волокна с низким модулем упругости и высоким относительным удлинением (нейлоновые, полиэтиленовые, полиэтилентетрафталатные и др.), улучшающие ударную прочность бетона;

2) волокна с высоким модулем упругости и высокой прочностью (металлические, асбестовые, графитовые, щелочестойкие силикатные, алюмосиликатные и др.), повышающие прочность и жесткость бетона, а также способность выдерживать динамические нагрузки.

Кроме геометрических параметров фибр (длина и диаметр) на свойство бетона влияет количество (расход на 1 $м^3$ смеси) и их пространственная ориентация, однородность распределения в объеме смеси, технология приготовления бетонных смесей, прочность сцепления с цементным камнем [29-37,39,40].

Эффект фиброармирования сводится к тому, что они уменьшают раскрытие трещин в бетоне и разрушение бетона происходит тогда, когда напряжения в нем превышают прочность сцепления волокон с цементным камнем или прочность самих волокон [31].

Обсуждение результатов. Технологический процесс должен воспроизвести в реальных условиях целевую задачу получения материалов с комплексом заданных свойств, качественных показателей на каждом этапе технологического процесса.

Все это достижимо при реализации технологического перевооружения предприятий строительной индустрии (современные дозаторы, смесители, оборудования механических (вибрационных) воздействий, гиперпрессования, центрифугирования, установок тепловлажностной обработки).

Результаты современных теоретических и экспериментальных исследований, зарубежного и отечественного опыта реализации конкурентоспособной продукции является методической базой для новых технических и технологических решений управления качественными показателями изделий и конструкций [1,7,18,19,31].

Прогнозирование эксплуатационного ресурса строительных материалов, конструкций, возможно осуществлять с учетом структурных факторов управления сопротивлениям разрушению. Первая группа факторов – вид физических и физико-химических связей в вяжущей матрице, определяющих уровень возможного сопротивления структуры силовому механическому воздействию.

Вторая группа структурных факторов соответствует управлению соотношением структурных элементов в общей полиструктуре материалов, распределением по размерам зерен минеральных вяжущих (микрообъем по Юнгу), минеральных добавок, поровой структуры.

Третья группа факторов учитывает оценочные показатели и характеристики деформирования и разрушения матрицы (вероятностный, материаловедческий, конструкторский) при силовом воздействии, действии агрессивных сред.

Изменение вещественного состава и свойств цементного камня напряженно-деформированного состояния материала в результате эксплуатационных (температурно-влажностных) воздействий, в том числе и агрессивных сред, и предопределяют в совокупности достигаемое к определенному моменту эксплуатационного цикла состояние и конструкционный потенциал изделий, конструкций.

В работах [1,8] показано, что наиболее долговечным является бетон, имеющий плотную непроникающую для агрессивных компонентов структуру цементного камня, которая, согласно известному положению о кольматации пор порового пространства, может образовываться за счет формирования в процессе гидратации гелевидных фаз-кольматантов. В качестве таких фаз могут выступать гидроксиды алюминия, железа, кремния.

Многоуровневый принцип организации структуры композиционных материалов определяет выделение в единой структуре многих взаимосвязанных и зависимых структур от атомно-молекулярного уровня до составных структур цельных элементов [18,23,27].

Цементсодержащие материальные композиции относятся к неравносвесным системам. На границе раздела протекают химические реакции с частичным разрывом и образованием межатомных связей в объеме каждой фазы с образованием промежуточных соединений различного типа, происходит диффузия, растворение одной фазы в другой с формированием новых химических образований и перехода ее в новое состояние с более высокой степенью организации.

Представления о композиционных материалах как открытых материальных системах базируется на фундаментальных основах термодинамического анализа структурообразования вяжущих систем, выявления физического смысла этого процесса и определения его движущих сил.

Твердеющее вяжущее представляет собой сложную неравновесную физико-химическую систему. Развивающиеся в ней необратимые процессы характерны для состояний, далеких от термодинамического равновесия, и в этих случаях может происходить переход от беспорядка и теплового хаоса к порядку и спонтанному развитию новых типов структур. Образование упорядоченных структур, более сложных, чем первоначальные являются характерным признаком самоорганизации, которая непосредственно связана с эволюцией материальной системы, образованием диспативных структур. Диспативные структуры организуются в объемном пространстве, во времени состояния, которые могут перейти в состояние термодинамического равновесия в результате кинетического фазового перехода.

Образование упорядоченных структур, более сложных, чем первоначальные, является характерным признаком самоорганизации, которая непосредственно связана с эволюцией материальной системы.

Эволюция определяется внутренними (химико-минералогический состав вяжущего, активность воды затворения, кислотно-основные свойства, катион-анионный состав ПАВ и др.), внешними (температура, давление и другие физико-механические воздействия) и другими факторами (сдвиговые деформации, контракция, тепловыделение) с энтропийным характером [12-14,16,17,38,39].

Экспериментальные данные подтверждают термодинамические закономерности структурообразования и возможностью определения роли химико-минералогического состава цемента, минеральных, химических добавок, воды затворения на кинетику и характер развития структурных превращений в вяжущей системе, а также оценить термодинамическую устойчивость образующейся структуры (рис. 1).

На основе полученных закономерностей появляется возможность управления структурными превращениями в вяжущих системах, а также за счет применения технологических воздействий [40].

Определение параметров внешних технологических воздействий производится с учетом термодинамических и кинетических характеристик этих состояний. Учет этих факторов при осуществлении химических, тепловых, механических воздействий приводит к сокращению технологического цикла изготовления изделий, улучшению их строительно-технических свойств [12-16,21-24].

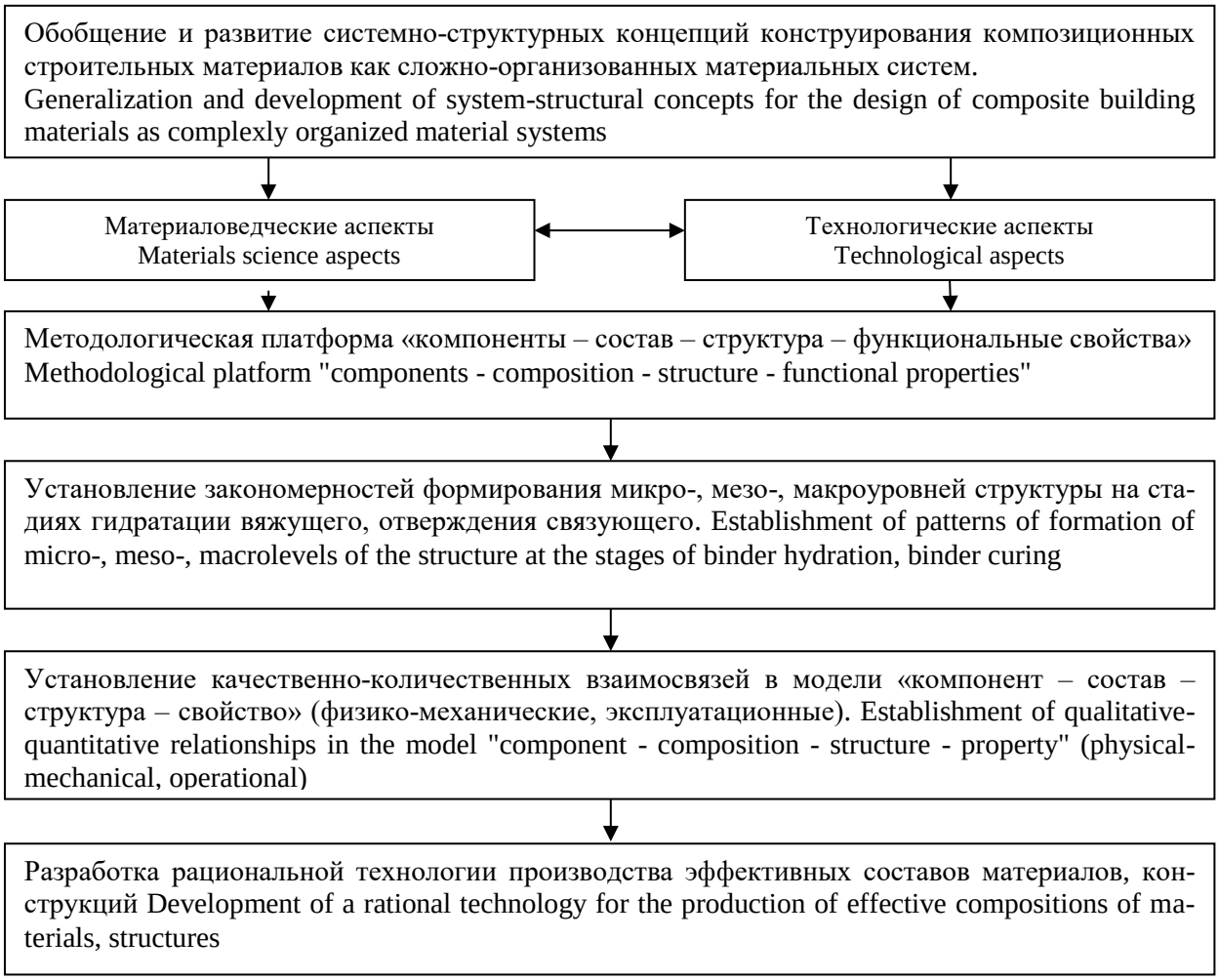


Рис. 1. Схема управляемого формирования структуры и свойств строительных композиционных материалов

Fig.1. Scheme of controlled formation of the structure and properties of building composite materials

Вывод. Проблема создания композиционных строительных материалов с комплексом заданных свойств является одной из важнейших задач современного материаловедения и имеет два основных аспекта – материаловедческий и технологический.

Систематизированы и обобщены системно-структурные подходы управляющими воздействиями на стадии структурообразования, технологических переделов, формирования оптимальной структуры и свойств цементных бетонов.

Развитие методологических основ бетоноведения должно развиваться на платформе «свойства компонентов – состав – структура – функциональные свойства» с обоснованием ресурсоэнергоэффективности технологических переделов.

Реализация теоретических и экспериментальных обоснований физико-химических явлений структурообразования, количественно-качественного состава, условий внутренних и внешних воздействий обеспечит целенаправленное конструирование структур современных строительных материалов.

Библиографический список:

1. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П. Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов Текст. – Уфа, ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
2. Сахипбгареев Р.Р. Потенциал структурообразования и самозалечивания цементных систем на поздних стадиях твердения / В В. Бабков, Р.Р. Сахипбгареев // Труды Международного конгресса «Наука и инновации в строительстве», SIB. - Воронеж, 2008. – Т. 1. – С.463-469.
3. Сахипбгареев Р.Р. Направления и механизмы управления процессами структурообразования цементных композитов / Р.Р. Сахибгареев // XV Академические чтения РААСН / Казан, гос. арх.-строит. ун-т. – Казань, 2010. – Т.1. – С.53-57.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны: Теория и практика. – М.:Технопроект, 1998. – 768 с.
5. Гаджилы Р.А. Регулирование свойств цементных систем с учетом природы ПАВ. Цемент и его применение. 2003. - №5. - С. 26-27.
6. Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов Текст. / С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 1995. № 4. - С. 16-20.
7. Комохов П.Г. Структура и свойства цементного камня с позиции компьютерного материаловедения Текст. /П.Г. Комохов, А.М. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. 2007. – №4 - С. 63-66.
8. Королев А.С. Управление водонепроницаемостью цементных композитов путем направленного уплотнения гидратной структуры цементного камня. Монография. Челябинск:Изд-во – ЮУрГУ, 2008. - 146 с.
9. Stuart Matthews, Lojze Bevc, Stuart Curtis, Ainars Paeglitis. Concrete structure management: Guide to ownership and good practice. Fib Bulletins. 2008; 44(February):210.
10. Shi X. et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview.*Construction and Building Materials*. 2012; 30:125-138.
11. Перцев В.Т., Леденев А.А., Рудаков О.Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. № 20 (3). С. 432-442.
12. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. Т.239. – №1 . – 2018. С. 99-110
13. Гаркави М. С, Цимерманис Л. Б. К вопросу об энтропийном анализе фазовых переходов в процессе твердения строительных материалов //Инженерно-физические исследования строительных материалов.Челябинск, 1974. – С. 40−47.
14. Гаркави М.С. Колебательные процессы при самоорганизации вяжущих систем // 1 международное совещание по химии й технологии цементов. М.1996. – С. 190-191
15. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Бобрышев А. Н. и др. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов – Ташкент : Фан, 1991. – 284 с.
16. Селяев В. П. , Иващенко Ю. Г. , Низина Т. А. Полимербетоны: монография. – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2016. – 281 с.
17. Чернышов Е.М. Формула «4С» («состав – структура –состояние – свойства») в концептуально-методологической парадигме современного системного материаловедения // Строительные материалы – 4С: состав – структура – состояние – свойства: Междунар. сб. науч. трудов. – Новосибирск, 2015 – С. 5–12.
18. Баженов Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6 – 14.
19. Иващенко Ю.Г., Павлова И.Л., Решетов В.А. Основы методологических принципов развития системно-структурных концепций конструирования композиционных строительных материалов // Сборник докладов международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. С. 81-85
20. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. – М.: Наука, 1966 – 400 с.
21. Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985. – 201 с.
22. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
23. Бобрышев А.Н. Синергетика композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Л.О. Бабин, В.И. Соломатов - Липецк : НПО ОРИУС, 1994. - 152 с.
24. Штакельберг Д.И. Самоорганизация в дисперсных системах. – Рига: Зинатне, 1990. - 175 с
25. Баженов Ю.М., Федосов С.В., Ерофеев В. Т., Матвиевский А.А., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Юдин П.В. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения. Саранск : Изд-во Мордовского университета, 2011. – 128 с.
26. Иващенко Ю.Г., Мухамбеткалиев К.К. Композиты на основе модифицированных глиносодержащих вяжущих систем // Разработка современных технологий и материалов для обеспечения энергосбережения, надежности и безопасности объектов архитектурно-строительного и дорожного комплекса: сб. статей Междунар. науч.-практ. симп. / Саратов, 2010. С.51-56.
27. Вагнер Г.Р. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий. Киев: Наук. думка, 1980. – 200 с.
28. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня. – М.: НИУ МГСУ, 284 с.
29. Миронов В.А., Белов В.В., Голубев А.И., Смирнов М.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей. СПб.: РИА «Квинтет», 2008. – 416 с.
30. Ушеров-Маршак А. В. Калориметрия цемента и бетона. – Х.: Колорит, 2002. – 184 с.
31. Максимова И. Н., Макридин Н. И., Ерофеев В. Т., Скачков Ю. П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов: монография. – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2015. – 358 с.
32. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. Москва: Стройиздат, 1989. – 188 с.
33. Сватовская Л.Б., Сычев М.М. Активированное твердение цементов Л.: Стройиздат, 1983. – 160 с.
34. Гранковский И.Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах Киев: Наукова думка, 1984. 300 с.

35. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Издательство АСВ, 2006. – 368с.
36. Куприяшкина Л.И. Наполненные цементные композиты. Саранск: И-во Мордовского университета. 2007.180 с.
37. Шейкин А.Е. Чеховский Ю.В. Брессер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – Москва : Стройиздат, 1979. – 344 с.
38. Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов. Москва : Стройиздат, 1971. – 224 с.
39. Шпынова Л.Г., Чих В.И., Саницкий М.А. и др. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня /. - Львов : Вища школа : Изд-во при Львов. ун-те, 1981. - 158 с. : ил.
40. Иващенко Ю.Г., Страхов А.В., Тимохин Д.К. О роли активности минеральных наполнителей в системно-структурных концепциях конструирования композиционных строительных материалов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Материалы всероссийской научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордовского университета. – 2018. – С 61-67.
41. Yahia A., Kabagire K. D. New approach to proportion pervious concrete.*Construction and Building Materials*. 2014; 62:38-46.
42. Wei S. et al. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and building materials*. 2013; 47: 1278-1291.
43. Cleland, D. & Matthews, S. & Stipanovic, Irina & Jacobs, J.. (2009). Concrete structure ownership and management: Part 1. Structural Concrete. 10. 87-97. 10.1680/stco.2009.10.2.87.
44. Radić, Jure & Kušter Marić, Marija. *Challenges in concrete structures management.* 2012.

References:

1. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. Structure formation and destruction of cement concretes. - Ufa, State Unitary Enterprise "Ufa Polygraph Plant", 2002: 376. (In Russ)
2. Sakhipbgareev P.P. The potential of structure formation and self-healing of cement systems at the late stages of hardening / VV Babkov, P.P. Sakhipbgareev. *Proceedings of the International Congress "Science and Innovation in Construction"*, SIB. Voronezh, 2008; 1: 463-469. (In Russ)
3. Sakhipbgareev P.P. Directions and mechanisms for controlling the processes of structure formation of cement composites. XV Academic readings of the RAASN. *Kazan, state. arch.-build. un-t.* Kazan, 2010; 1:53-57. (In Russ)
4. Batrakov V.G. Modified concretes: Theory and practice. M.: *Tekhnoproekt*, 1998: 768. (In Russ)
5. Gajily R.A. Regulation of the properties of cement systems, taking into account the nature of surfactants. *Cement and its application.* 2003; 5: 26-27. (In Russ)
6. Kaprielov S.S. General patterns of formation of the structure of cement stone and concrete with the addition of ultrafine materials. *Concrete and reinforced concrete.* 1995; 4:16-20. (In Russ)
7. Komokhov P.G., Kharitonov A.M. Structure and properties of cement stone from the standpoint of computer materials science. *Academia. Architecture and construction*. 2007; 4: 63-66. (In Russ)
8. Korolev A.S. Management of the water resistance of cement composites by directional compaction of the hydrated structure of the cement stone. Monograph. Chelyabinsk: Publishing House SUSU, 2008: 146. (In Russ)
9. Stuart Matthews, Lojze Bevc, Stuart Curtis, Ainars Paeglitis. Concrete structure management: *Guide to ownership and good practice. fib bulletins*. 2008; 44(February):210.
10. Shi X. et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview.*Construction and Building Materials.* 2012; 30:125-138.
11. Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. Physico-chemical approaches to the development of effective organo-mineral additives for concrete. *Condensed media and interfacial boundaries*. 2018; 20 (3): 432-442. (In Russ)
12. Lotov V.A. On the interaction of cement particles with water or a variant of the mechanism of the processes of hydration and hardening of cement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Resource engineering*. 2018; 239(1):99-110 (In Russ)
13. Garkavi M. S., Tsimermanis L. B. On the issue of entropy analysis of phase transitions in the process of hardening of building materials. *Engineering and physical research of building materials*.Chelyabinsk, 1974: 40−47. (In Russ)
14. Garkavi M.S. Oscillatory processes during self-organization of binder systems. *1st international meeting on chemistry and technology of cements.* M.1996: 190-191(In Russ)
15. Solomatov V. I., Vyrovoy V. N., Bobryshev A. N. et al. Polystructural theory of composite building materials Tashkent: Fan, 1991: 284. (In Russ)
16. Selyaev V. P., Ivashchenko Yu. G., Nizina T. A. Polymer concretes: monograph. Saransk: Publishing House of the Mordovian University, 2016: 281. (In Russ)
17. Chernyshov E.M. Formula "4C" ("composition - structure - state - properties") in the conceptual and methodological paradigm of modern systems materials science. Building materials - 4C: composition - structure - state - properties: Intern. Sat. scientific works. - Novosibirsk, 2015: 5–12. (In Russ)
18. Bazhenov Yu.M. Structural design of modern concrete: defining principles and technological platforms. [Stroitel'nye materialy]. *Construction Materials.* 2014; 3: 6 – 14. (In Russ)
19. Ivashchenko Yu.G., Pavlova I.L., Reshetov V.A. Fundamentals of methodological principles for the development of system-structural concepts for the design of composite building materials. Collection of reports of the international scientific-practical conference. Belgorod: Publishing house of BSTU im. V.G. Shukhov. 2007: 81-85 (In Russ)
20. Rebinder P.A. Physical and chemical mechanics of dispersed structures. M.: *Nauka*, 1966: 400. (In Russ)
21. Prigogine I. From existing to emerging. M.: *Nauka*, 1985: 201. (In Russ)
22. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in non-equilibrium systems. M.: *Mir*, 1979: 512. (In Russ)

23. Bobryshev A.N. Synergetics of composite materials / A.N. Bobryshev, V.N. Kozomazov, L.O. Babin, V.I. Solomatov - Lipetsk: NPO ORIUS, 1994: 152. (In Russ)
24. Stackelberg D.I. Self-organization in disperse systems. Riga: Zinatne, 1990: 175.
25. Bazhenov Yu.M., Fedosov S.V., Erofeev V.T., Matvievsky A.A., Mitina E.A., Emelyanov D.V., Yudin P.V. Cement composites based on magnetically and electrochemically activated mixing water. Saransk: Publishing House of the Mordovian University, 2011: 128. (In Russ)
26. Ivashchenko Yu.G., Mukhambetkaliev K.K. Composites based on modified clay-containing binder systems. Development of modern technologies and materials to ensure energy saving, reliability and safety of objects of the architectural, construction and road complex: Sat. articles of the International scientific-practical. symp. Saratov, 2010: 51-56. (In Russ)
27. Wagner G.R. Physico-chemistry of activation processes of cement dispersions. Kyiv: Nauk. Dumka, 1980: 200.
28. Samchenko S.V. Formation and genesis of the structure of cement stone. M.: NRU MGSU, 284 p. (In Russ)
29. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I., Smirnov M.A. Optimization of compositions for the manufacture of building mixtures. St. Petersburg: RIA Quintet, 2008: 416. (In Russ)
30. Usherov-Marshak A.V. Calorimetry of cement and concrete. Kh.: *Kolorit*, 2002: 184. (In Russ)
31. Maksimova I. N., Makridin N. I., Erofeev V. T., Skachkov Yu. P. Strength and fracture parameters of cement composites: monograph. Saransk: *Publishing House of Mordovian University*, 2015: 358. (In Russ)
32. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Additives in concrete. Moscow: *Stroyizdat*, 1989: 188. (In Russ)
33. Svatovskaya L.B., Sychev M.M. Activated hardening of cements L.: *Stroyizdat,* 1983: 160. (In Russ)
34. Grankovsky I.G. Structure formation in mineral binding systems Kyiv: *Naukova Dumka.* 1984: 300.
35. Bazhenov Yu.M., Demyanova B.C., Kalashnikov V.I. Modified high quality concretes. M.: *DIA Publishing House*, 2006: 368. (In Russ)
36. Kupriyashkina L.I. Filled cement composites. Saransk: *Publishing House of the Mordovian University.* 2007:180 (In Russ)
37. Sheikin A.E. Chekhovsky Yu.V. Bresser M.I. Structure and properties of cement concretes. Moscow: *Stroyizdat,* 1979: 344. (In Russ)
38. Mchedlov-Petrosyan O. P. Chemistry of inorganic building materials. Moscow: *Stroyizdat*, 1971: 224. (In Russ)
39. Shpynova L.G., Chikh V.I., Sanitsky M.A. et al. Physico-chemical foundations of the formation of the structure of cement stone Lviv: *Vishcha school: Publishing House at Lviv. un-te*, 1981:158.
40. Ivashchenko Yu.G., Strakhov A.V., Timokhin D.K. On the role of the activity of mineral fillers in the system-structural concepts of the design of composite building materials. Durability of building materials, products and structures. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Saransk: *Publishing House of the Mordovian University*. 2018:61-67. (In Russ)
41. Yahia A., Kabagire K. D. New approach to proportion pervious concrete.*Construction and Building Materials.* 2014; 62:38-46.
42. Wei S. et al. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and building materials.* 2013; 47:1278-1291.
43. Cleland, D. & Matthews, S. & Stipanovic, Irina & Jacobs, J.. (2009). Concrete structure ownership and management: Part 1. Structural Concrete. 10.87-97. 10.1680/stco.2009.10.2.87.
44. Radic, Jure & Kuster Maric, Marija. Challenges in concrete structures management. 2012.

Сведения об авторах:
Иващенко Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии»; psk@sstu.ru.
Мамешов Раман Тайрович, соискатель, кафедра «Строительные материалы и технологии»; mascara.t@list.ru
Information about the authors:
Yuriy G. Ivaschenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of «Building materials and technology»; psk@sstu.ru.
Raman T. Mameshov, Applicant, Department of «Building materials and technology»; mascara.t@list.ru
Конфликт интересов/ Conflict of interest.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/Received 04.06.2022.
Одобрена после/рецензирования Reviced 17.06.2022.
Принята в печать/ Accepted for publication 17.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.042
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-133-142 Оригинальная статья / Original Paper

Алгоритм численного расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем итерационным методом приращений параметров с учетом последействия давления воздуха

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 создание алгоритма статического расчета для определения максимальной несущей способности линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия больших пролетов при действии внешних силовых нагрузок. **Метод.** Численное исследование большепролетного мембранно-пневматического сооружения произведено шаговым методом приращения параметров с применением на шаге метода конечного элемента и численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. **Результат.** Авторами разработана методика статического расчета на ЭВМ геометрически и физически нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с поэтапным применением метода конечных элементов в форме метода перемещений, универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. **Вывод.** Игнорирование в расчетах последействия означает нарушение равновесия системы за счет неуравновешенных пневматических сил, вычисленных с погрешностью 11,2% и влияющих, как показали расчеты, в размере примерно 7% процентов на величину приращения избыточного давления воздуха в линзе.

Ключевые слова: двухпоясные мембранно-пневматические системы, воздухоопорный эффект, численная процедура Эйлера – Коши, большепролетная мембранно-стержневая система, несущая способность, учет последействия давления воздуха в системе

Для цитирования: А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Алгоритм численного расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем итерационным методом приращений параметров с учетом последействия давления воздуха. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):133-142. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-133-142

Algorithm for numerical calculation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by iterative method of parameter increments taking into account the aftereffect of air pressure

A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin
Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to create a static calculation algorithm to determine the maximum bearing capacity of a lenticular membrane-pneumatic system for covering large spans under the action of external force loads. **Method.** A numerical study of a large-span membrane-pneumatic structure was carried out by the step method of incrementing parameters using the finite element method and the Euler-Cauchy numerical procedure of the third order of accuracy at the step. **Result.** The authors have developed a technique for computer static calculation of geometrically and physically nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems of coatings for large span structures by the iterative method of parameter increments with the phased application of the finite element method in the form of the displacement method, the universal equation of gas state and the improved Euler-

Cauchy numerical procedure of the third order of accuracy. **Conclusion.** Ignoring the aftereffect in the calculations means the imbalance of the system due to unbalanced pneumatic forces calculated with an error of 11.2% and affecting, as the calculations showed, in the amount of approximately 7% percent on the increment of excess air pressure in the lens.

Keywords: two-belt membrane-pneumatic systems, air support effect, Euler-Cauchy numerical procedure, long-span membrane-rod system, load-bearing capacity, accounting for the aftereffect of air pressure in the system

For citation:A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Algorithm for numerical calculation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by iterative method of parameter increments taking into account the aftereffect of air pressure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):133-142. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-133-142

Введение. Авторами статьи разработана методика статического расчета на ЭВМ геометрически и физически нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с поэтапным применением метода конечных элементов в форме метода перемещений, универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. [1, 5, 16 - 19].

Актуальность данной темы достаточно высока, так как стоимость большепролетных сооружений спортивного назначения составляет от полмиллиарда рублей до полутора миллиарда рублей, что очень дорого для бюджета многих небольших городов в России. В то же время российские города имеют в своем распоряжении гораздо меньше спортивных комплексов и ледовых арен, чем в Западной Европе или США. Хотя в 2012 -2016 гг. в Российской Федерации было построено большое количество спортивных объектов, но и сейчас современной инфраструктуры не хватает, так как в предыдущие годы ее строили очень мало [8, 13].

Современные достижения математического и компьютерного моделирования нагрузок и воздействий на сооружения широко известны. Нагрузки на строительные конструкции устанавливаются строительными нормами по статистическим данным превышения средних значений; постоянные нагрузки берутся по проекту в соответствии с геометрическими размерами строительной конструкции; временные нагрузки рассчитываются в зависимости от оборудования, от количества людей, которые могут находиться в помещениях.

Поэтому авторы статьи применили программные комплексы для расчета сооружений такого вида на все виды нагрузки с учетом геометрической и физической нелинейности, а также на потерю устойчивости [8, 15, 20].

Одним из факторов надежной работы сооружения во время всего срока эксплуатации объекта является правильный расчет и проектирование объекта строительства. Чем мощнее фундамент у такого сооружения, тем более значительные нагрузки от сооружения можно на него возложить. Для спортивных сооружений такого вида, как правило, проектируются два вида фундаментов или монолитная плита или столбчатый заглубленный фундамент. Столбчатый фундамент более экономичный, подходит для многих видов металлоконструкций, которым не требуются более мощное основание. В зависимости от грунтов возможно применение буронабивных свай. Если сделать фундамент более мощный, чем требуется по расчету для данного сооружения, то объект будет функционировать достаточно долго и без аварийных ситуаций. [4].

Методы исследования. Авторы статьи произвели численное исследование большепролетного мембранно-пневматического сооружения шаговым методом приращения параметров с применением на шаге метода конечного элемента и численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Работа Давиденко Д.Ф. «О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений» и работа Петрова В.В. «Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек» положили начало интенсивному развитию различных частных вариантов метода приращений параметров. В конце двадцатого столетия данный метод занял лидирующие позиции при расчете сложных зданий и соору-

жений. [2, 3, 8, 9]. Объект исследования и расчетную схему сооружения представлены на рис. 1 и 2

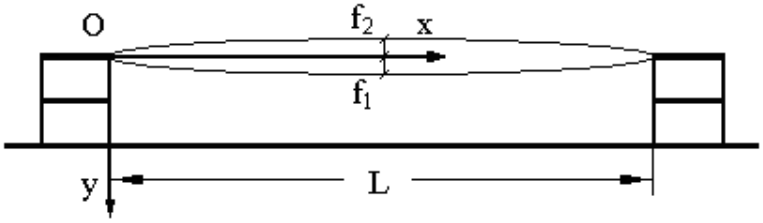


Рис. 1. Однопролетное линзообразное мембранно-пневматическое покрытие сооружения прямоугольного в плане (составлено авторами)
Fig. 1. Single-span lenticular membrane-pneumatic covering of a rectangular structure (compiled by the authors)

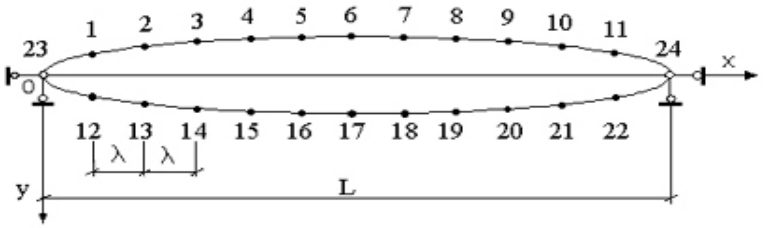


Рис. 2. Расчетная схема однопролетной линзообразной мембранно-пневматической системы (составлено авторами)
Fig. 2. Calculation scheme of a single-span lenticular membrane-pneumatic system (compiled by the authors)

Пусть напряженно-деформированное состояние системы описывается нелинейным функционалом A(x,y) = 0, который включает в себя непрерывно зависящие от множества параметров **x** системы функции накоплений $y \subset Z$, отражающие изменение жесткости системы в процессе её деформирования, и искомые функции Z, выражающие собой перемещения, деформации и напряжения в системе.

Охарактеризуем итерационный метод приращений параметров, разработанный профессором Кимом А.Ю. для расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий [6]. Введя производную Фреше

$$\frac{\partial Z_\nu}{\partial x_\mu} = A'_{\nu\mu}(x, y), \qquad (1)$$

запишем решение уравнения $A(x, y) = 0$ на основе численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности.

Численная процедура метода включает в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений параметров первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z^{(1)}_{n\nu} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{\nu\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в с-том приближении по формуле:

$$\Delta Z^{(C)}_{n\nu} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{\nu\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y^{(c-1)}_n}{2}\right), \text{ где } 2 \le c \le C_к \qquad (2)$$

где n – номер текущего шага; $\Delta x_{n\mu}$ – приращение параметра x_μ на шаге n; $x_{n-1,\mu}$ – зна-

чение **μ**-го параметра системы в конце предыдущего шага n-1; $У_{n-1}$ – значение некоторой функции накоплений **у** в конце шага n-1.

При **с** = 2 приращения функций накоплений Δy_n осредняются численной процедурой второго порядка точности. При **с** = 3 расчетная формула (2) итерационного метода приращений параметров дает на шаге результаты третьего порядка точности с погрешностью $O(h^4)$, где $h = \Delta x_{n\mu}$.

Осредненные на шаге приращения функций накоплений $У_n$, а, следовательно, и осредненные на шаге производные Фреше $A'(\Delta X_{n,\mu}^{(c)}, Y_n^{(c)})$, подбираются из условия, при котором решение эквивалентно линеаризованной задачи совпадает с решением нелинейной задачи третьего порядка точности. Принцип эквивалентной линеаризации нелинейной задачи позволяет применить на произвольном шаге принцип суперпозиции.

К функциям накоплений относятся температурные, кинематические и пневматические нагрузки. Но только пневматические нагрузки относятся к следящим нагрузкам.

После действия внешних нагрузок система обладает последействием, т.е. последующей релаксацией системы, напряженной дополнительным давлением воздуха. После релаксации мембранно-пневматическая система покрытия находится в равновесии.

Последействие – это физическая нелинейность пневматической линзы, которую лишь частично учитывает численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности при числе итераций $c \le 3$.

Авторы усовершенствовали известный итерационный метод приращений параметров с поэтапным применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Для учета последействия, то есть релаксации системы, связанной с изменением избыточного давления воздуха в замкнутой полости после действия нагрузок, авторами предложено увеличить число итераций вычислительного процесса, как это приходится делать при недостаточном избыточном давлении воздуха в линзе и при больших пролетах системы. Положительным свойством численной процедуры Эйлера-Коши является ее итерационный характер, что позволяет применить её и для описания последействия в пневматических системах [6, 11].

В ряду нагрузок пневматическая нагрузка Р занимает особое место. Она представляет собой подкачку воздуха в замкнутую полость линзы покрытия или утечку воздуха из линзы при нарушении режима эксплуатации сооружения. Последействие от прикладываемой пневматической нагрузки достаточно велико и может существенно изменять искомые результаты.

Рассчитывая линзообразную систему на пневматическую нагрузку с учетом последействия, необходимо корректировать пневматическую нагрузку на каждой итерации. Для точного учета «последействия» авторы на каждой итерации применяют формулу, корректирующую величину прикладываемой к системе внешней пневматической нагрузки по формуле:

$$P^{(c+1)} = P^{(c)} + \Delta P^{(c)}. \qquad (3)$$

Здесь под Р 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 Р, 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 последействия избыточное давление в линзе за счет податливости поясов системы уменьшается. Но поскольку величина задаваемой пневматической нагрузки Р на каждой итерации должна быть величиной постоянной и равной заданной проектировщиком величине, то знак в корректирующей формуле (3) должен быть «минус». Нагрузка Р возрастет на $\Delta P^{(c)}$, останется постоянной и равной $P^{(c+1)} = P + \Delta P^{(c)}$.

Таким образом, численная процедура рассматриваемого 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:

$$\Delta Z_{n\nu}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{\nu\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в с-том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{n\nu}^{(C)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{\nu\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right), \text{ где } 2 \le c \le C_к \quad (4)$$

$P^{(c+1)} = P - \Delta P^{(c)}$.

Здесь $C_к$ – конечная итерация, на которой процесс сходимости решения по достижении заданной высокой точности завершается.

Итерационный процесс продолжается до достижения заранее заданного избыточного давления воздуха в линзе в конце процесса нагружения. Сходимость повторяющихся итераций численной процедуры Эйлера-Коши доказана Коши. 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 даже в линзе большого пролета сходится довольно устойчиво, что можно видеть по результатам, выведенным на печать в конце каждой итерации.

Обсуждение результатов. Полученные в работе результаты проще всего показать на примерах счета и привести в табличной форме. Приведем пример расчета линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия пролетом 120 на действие пневматической нагрузки P с учетом последействия: Первоначальное избыточное давление в линзе 4000 Па; Подкачка линзы до заданного давления P = 4500 Па.

Мембранно-пневматическая система показана на рис. 1. Расчетная схема системы показана на рис. 2.

Исходные данные:

Число шагов NK = 1. Число итераций на шаге CK = 25

Признак пневматического воздействия P = 1

Признак наличия подкачки-утечки воздуха PP = 1

Длина пролета системы L = 120 м.

Избыточное давление в линзе на монтаже DP1(SL) = 4000

Приращение давления воздуха подкачкой DP(SL) = 500

Температура поясов линзы на стадии монтажа TH1 (SL), TH2(SL) = 273, 273

Приращения температур поясов линз на стадии эксплуатации нулевые.

Сосредоточенные силы Q(I), действующие на систему Q(I) = 0 (H)

Погонная нагрузка на пояса от собственного веса Q1, Q2 = 640, 480 (H)

Массив площадей сечений элементов FS(1) = .008 (m^2), FS(2) = .006 (m^2)

Массив модулей упругости ES(1) = 2.06E+11 ES(2) = 2.06E+11

Вычисляемые данные: T1(SL) = 273, TN(SL) = 0, P1(SL) = 105937, DPN(SL) = 500

Объем полости линз на стадии монтажа V1 = 936.7245000000000

Результаты счета

Счет на шаге N = 1 CI = 1

Объем полости линзы на стадии эксплуатации V2 = 936.7245000000000

Давление в линзе P (SL%) = 106437

Приращение давления в деформированной линзе PC (SL%) = 0
Пневматическая нагрузка DPN (SL%) = 500

Счет на шаге N = 1 CI = 2

Объем полости линзы на стадии эксплуатации V2 = 938.5192916929745
Приращение объема полости линзы DV = 1.794791692974627
Давление в линзе P (SL%) = 106234.2
Приращение давления в деформированной линзе PC (SL%) = -202.7841
Пневматическая нагрузка DPN (SL%) = 702.7841

Счет на шаге N = 1 CI = 3

Объем полости линзы на стадии эксплуатации V2 = 938.5133730175871
Приращение объема полости линзы DV = 1.788873017587207
Давление в линзе P (SL%) = 106437.7
Температура в линзе по Кельвину T (SL%) = 273 град.
Приращение давления в деформированной линзе PC (SL%) = -202.1161
Пневматическая нагрузка DPN (SL%) = 702.1161

Счет на шаге N = 1 CI = 25

Результаты в конце шага N

Объем полости линзы на стадии эксплуатации V2 = 940.3025568779001
Приращение объема полости линзы DV = 1.789009033508819
Приращение давления в линзе от последействия PN (SL%) = -202.1314
Избыточное давление в линзе PL (SL%) = 4500
Пневматическая нагрузка DPN (SL%) = 702.1314

На рис. 3 показано движение хорды в итерационном процессе с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности.

Кривая решения – это истинное решение. Итерация c=1 дает решение с применением численной процедуры метода Эйлера.

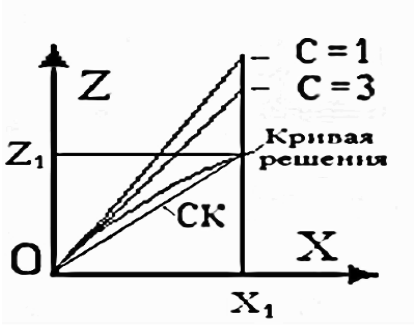


Рис. 3. График сходимости итераций при нагружении системы пневматической нагрузкой (составлено авторами)
Fig. 3. Graph of convergence of iterations when loading the system with a pneumatic load (compiled by the authors)

К примеру, на третьей итерации приращение избыточного давления в линзе составило ΔP = PC (SL%) = -202.1161 Па. Пневматическая нагрузка для третьей итерации c+1 = 3 доведена до $P^{(c+1)}$ = 500 + 202.1161 = 702.1161Па.

Далее все результаты на итерациях повторяются в неизменном виде. Следует иметь в виду, что увеличение величины пневматической нагрузки на величину PC (SL%) производится на каждой итерации.

Приращение избыточного давления в линзе, полученное в решенной задаче при разовой накачке воздуха в линзу на 500 Па, в результате влияния последействия составило PL(SL%) = 355.931 Па. Многократная же накачка воздухом линзы с учетом последействия позволила накачать линзу до приращения избыточного давления, равным 500 Па. Вычислим, на сколько про-

центов изменяет приращение давления воздуха в линзе явление «последействия» при разовой и при многократной накачке воздуха в линзу.

Отличие в величинах приращения избыточного давления воздуха в линзе при разовой накачке воздуха в линзу на 500 Па составило (500 – 356) / 500) * 100% = (144 / 500) * 100% = 28,8 %. Отличие в величинах приращения избыточного давления воздуха в линзе при многократной накачке воздуха в линзу (на 720 Па) составило (202) / 500) * 100% = 40,4 %. Прогиб в линзе, полученный при разовой накачке воздуха в линзу на 500 Па, в результате последействия составил V(6)= - 0,0142656 м. При нагрузке 720 Па с учетом последействия многократность нагружения позволила накачать линзу до состояния, в котором приращение избыточного давления стало равным 500 Па, а прогиб напрягающего пояса равен V(6)= - 0,0200221 м.

Следовательно, отличие в величинах прогибов системы составило тридцать процентов, или подробнее: (- 0,0200221 + 0,0142656) /(- 0,0200221) * 100% = 30,0 %.

Обсуждение результатов. Разработанный итерационный метод приращений параметров с усовершенствованной численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности положен авторами в основу новой методики расчета систем. По новой методике более точно вычисляется приращение избыточного давления воздуха в линзе, так как применяется столько итераций в расчете, сколько требуется их для достижения полной сходимости процесса в отношении вычисляемого избыточного давления воздуха в системе. При этом решена проблема учета последействия при нагружении пневмосистемы, как следящими пневматическими нагрузками, так и традиционными нагрузками. Результаты исследований сведем в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета системы пролетом 120 метров на распределенную нагрузку q_l
Table 1. Calculation results for a system with a span of 120 meters for a distributed load q_l

№ п/п	Методика расчета Method of calculation	Приращение избыточного давления воздуха в линзе Increment of excess air pressure in the lens	Различие в приращениях избыточного давления воздуха, в процентах Difference in excess air pressure increments, %
1	Расчет 1 порядка точности при Ск =1 Calculation of the 1st order of accuracy at S_k =1	РС (SL%) = 519,2071 Па	-38,8%
2	Расчет 3 порядка точности при Ск =3 Calculation 3 orders of accuracy at S_k =3	РС (SL%) = 392,4455 Па	31,2%
3	Расчет 3 порядка точности при Ск =25 Calculation 3 orders of accuracy at S_k =25	РС (SL%) = 346.2485 Па	-

Как следует из табл.1 геометрическая и физическая нелинейность системы ла - 38,8 %. Известная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности с достаточной точностью учитывает геометрическую нелинейность системы (геометрическая нелинейность составляет не более 15%). Усовершенствованная численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности позволила учесть 38,8% физической нелинейности пневматической системы. Влияние же последействия на вычисляемую величину приращения избыточного давления воздуха в линзе по абсолютной величине составило 7,6%.

Рассмотрим результаты табл. 1. Расчет приращения избыточного давления воздуха при нагружении системы силовой нагрузкой показывает, что геометрическая и физическая нелинейность системы составила 49,9 %. С другой стороны, учет последействия изменил приращение избыточного давления воздуха на 13,3%. Следовательно, геометрическая и физическая нелинейность системы была на 36,6% учтена за счет применения стандартной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности, то есть без учета той части нелинейности системы, которая названа авторами статьи «последействием».

Если же учесть, что геометрическая нелинейность системы не превышает для исследуемых мембранно-пневматических систем (2 - 13) %, то последействие представляет собой проявление физической нелинейности совместной упругой работы воздуха и мембран перекрытия. Обратим внимание и на то, что 32,3% физической нелинейности учтено еще на первом этапе расчета, когда для расчета применялась численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности при Ск =3.

Таблица 1. Результаты расчета системы пролетом 120 метров на распределенную нагрузку q_l
Table 1. Calculation results for a system with a span of 120 meters for a distributed load q_1

№ п/п	Методика расчета Method of calculation	Приращение избыточного давления воздуха в линзе Increment of excess air pressure in the lens	Различие в приращениях избыточного давления воздуха, в процентах Difference in excess air pressure increments, %
1	Расчет 1 порядка точности при Ск =1 Calculation of the 1st order of accuracy at S_k =1	PC(SL%) = 368.0593 Па	-21,8%
2	Расчет 3 порядка точности при Ск =3 Calculation 3 orders of accuracy at S_k =3	PC(SL%) = 323.8537 Па	-7,2%
3	Расчет с учетом последействия при Ск =25 Calculation taking into account the aftereffect at S_k = 25	PN(SL%) = 302.0787 Па	-

Результаты табл. 2 показывают, что, когда силовая нагрузка не столь большая как в задаче таблицы 1, физическая нелинейность составила 21,8%, и влияние последействия равно 7,2%. Напомним, что влияние последействия в задаче табл. 1 было 36,6%, что соответствовало влиянию физической нелинейности, равной по абсолютной величине 49,9%.

Вывод. Исследуемая система была запроектирована в соответствии с нормами строительства капитальных покрытий сооружений и рассчитана на нагрузки первого предельного состояния при подборе толщин мембран, и на нагрузки второго предельного состояния при проверке принятого избыточного давления в линзе. Статические расчеты проводились по разработанной авторами методике расчета пневмолинзовых систем больших пролетов итерационным методом приращений параметров с применением усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности.

Итерации производится столько, сколько их требуется для достижения необходимой точности расчета. Расчет прекращается, когда на последней и предыдущей итерациях расчета достигается совпадение величин избыточного давления воздуха в линзе. Повторяемость величины избыточного давления воздуха на смежных итерациях означает полное завершение последействия, нарушающего равновесие системы. По результатам проведенного исследования был сделан вывод, что игнорирование в расчетах последействия означает нарушение равновесия системы за счет неуравновешенных пневматических сил, вычисленных с погрешностью 11,2% и влияющих, как показали расчеты, в размере примерно 7% процентов на величину приращения избыточного давления воздуха в линзе.

Как показало проведенное численное исследование усиление несущей способности линзообразного покрытия за счет повышения избыточного давления воздуха в линзе эффективно, но это увеличивает стоимость мембран покрытия за счет создание герметичности швов. Усиливать покрытие избыточным давлением воздуха нужно лишь до той степени, когда устойчивость системы и устойчивость итерационного процесса решения задачи обеспечены. При расчете линзообразных мембранно-пневматических систем проектировщикам покрытия сооружений рекомендуется применять следующий способ определения минимальной величины избыточно-

го давления воздуха, достаточного для обеспечения устойчивости покрытия, устойчивости решения задачи и достижения достаточной точности расчета системы при больших пролетах.

Если результаты расчета сходятся при пяти - десяти итерациях, то система запроектирована при достаточно большом коэффициенте запаса по избыточному давлению воздуха, и устойчивость счета гарантирована. Если результаты счета сходятся при пятнадцати - двадцати итерациях, то система достаточно устойчива, а если при тридцати итерациях и более, то устойчивость счета на пределе, и в проектируемом покрытии следует увеличить избыточное давление воздуха в пневмолинзе.

При расчете линзообразных мембранно-пневматических систем проектировщикам покрытия сооружений рекомендуется применять разработанную авторами методику нелинейного статического расчета на ЭВМ линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений 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 с учетом последействия пневматических нагрузок, когда уточнение при вычислении избыточного давления в линзе может достигать 40 - 60 процентов.

При расчете линзообразных мембранно-пневматических систем проектировщикам покрытия сооружений рекомендуется применять разработанную авторами программу нелинейного статического расчета на ЭВМ линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений 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 с учетом последействия давления воздуха в линзе.

Авторы статьи надеются, что проведенное ими численное исследование и полученные выводы ускорят строительство новых современных достаточно эффективных систем для создания современной инфраструктуры городов и населенных пунктов России.

Библиографический список:

1. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. / А.С. Городецкий и др. – М.: Транспорт, 1981.– 143 с.
2. Давиденко Д. Ф. О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений. / Д.Ф. Давиденко // Укр. матем. журнал, 1955. т. 7. – Киев., с. 56–64.
3. Давиденко Д.Ф. О применении метода вариации параметра к построению итерационных формул повышенной точности для определения численных решений нелинейных интегральных уравнений. Докл. АН СССР, т. 162.– М., 1965, с. 78–85.
4. Иванова Т.В., Альберт И.У., Кауфман Б.Д., Шульман С.Г. Несущая способность висячих свай по критерию прочности материала сваи или грунта // Инженерно-строительный журнал, 2016 – No7 (67). – С. 3-12.
5. Игнатьев А.В. Основные формулировки метода конечных элементов в задачах строительной механики. Часть 3 // Вестник МГСУ 2015. № 1. С. 16—26.
6. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров для расчёта нелинейных мембранно-пневматических систем с учётом упругой работы воздуха / А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2005.- № 1. - С. 39-42.
7. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Монография. Континуальные расчетные схемы / А.Ю.Ким. Сарат. гос. аграр. ун-т.- Саратов, 2000. - 198 с.- Деп. в ВИНИТИ 24.04.00. - № 1148 - В2000.
8. Ким А.Ю. Многопролетные мембранно-стержневые покрытия сооружений/ А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2003.- № 2. - С. 72-74.
9. Петров, В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. / В.В. Петров – Саратов: Изд-во СГУ, 1975.– 118 с.
10. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – С. 480.
11. Полников, С.В. Расчет нелинейных линзообразных мембранно-пневматических покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с усовершенствованной численной процедурой / С.В. Полников, С.П. Харитонов // Научное обозрение. - 2017. - № 19. - С. 35-41
12. Рабинович И.М. Вопросы теории статического расчета с сооружений с односторонними связями. М.: Стройиздат.1975.-149 с.
13. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Изво лит. по стр-ву, 1972. 111 с.
14. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
15. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»
16. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. / Г. Стренг, Д.М. Фикс: Мир, 1977. – 349 с.

17. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 153. – P. 83–88.
18. Belostotsky, A.M. Contemporary Problems of Numerical Modelling of Unique Structures and Buildings / A.M. Belostotsky, P.A Akimov., I.N. Afanasyeva, T.B. Kaytukov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Volume 13. – Issue 2. – P. 9–34.
19. 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. – T 456.
20. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory // Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A. 2000. Vol. 456. No 8. Pp. 2223–2242.

References:

1. Gorodeczkij A.S. Finite element method in the design of transport facilities.M.: *Transport.* 1981:143. (In Russ)
2. Davidenko D. F. On the application of the parameter variation method to the theory of nonlinear functional equations. *Ukr. matem. Journal* 1955; 7: 56–64. Kiev.
3. Davidenko D.F. On the application of the parameter variation method to the construction of iterative formulas of increased accuracy for determining the numerical solutions of nonlinear integral equations. Dokl. AN SSSR, M., 1965; 162: 78–85. (In Russ)
4. Ivanova T.V., Al`bert I.U., Kaufman B.D., Shul`man S.G. Bearing capacity of hanging piles according to the criterion of the strength of the pile material or soil. [Inzhenerno-stroitel`ny`j zhurnal] *Civil Engineering Journal* 2016; 7 (67): 3-12. (In Russ)
5. Ignatiev A.V. Basic formulations of the finite element method in problems of structural mechanics. *Vestnik MGSU*. 2015;3(1):16—26. (In Russ)
6. Kim A.Yu. Iterative method of parameter increments for calculation of nonlinear membrane-pneumatic systems taking into account the elastic work of air.. *Vestnik SGAU*. 2005; 1: 39-42. (In Russ)
7. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Monograph. Continuum calculation schemes. *Sarat. state agrarian un-t.* Saratov 2000; (1148):198 Dep. v VINITI 24.04.00. (In Russ)
8. Kim A.Yu. Multi-span membrane-rod coatings of structures. *Vestnik SGAU* 2003; 2: 72-74. (In Russ)
9. Petrov V.V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells. Saratov: Izd-vo SGU, 1975: 118. (In Russ)
10. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. M. : Infra-*Engineering*. 2014: 480. (In Russ)
11. Polnikov S.V. Calculation of non-linear lenticular membrane-pneumatic coatings for large-span structures using the iterative method of parameter increments with an improved numerical procedure. S.V. Polnikov, S.P. Xaritonov. [Nauchnoe obozrenie] *Scientific Review*. 2017; 19: 35-41(In Russ)
12. Rabinovich I.M. Questions of the theory of static calculation from structures with one-way connections. M.: *Strojizdat.*1975:149. (In Russ)
13. Saviczkij G.A. Wind load on buildings. M.: *Izvo lit. according to the building* 1972: 111. (In Russ)
14. Simiu E`, Skanlan R. Influence of wind on buildings and structures. M.: *Strojizdat.* 1984:360. (In Russ)
15. SP 20.13330.2016 «Nagruzki i vozdejstviya» *Loads and impacts* (In Russ)
16. Streng G., Fiks D. Theory of finite element method. *Mir.* 1977: 349. (In Russ)
17. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov. *Procedia Engineering*. 2016; 153: 83–88.
18. Belostotsky, A.M. Contemporary Problems of Numerical Modelling of Unique Structures and Buildings / A.M. Belostotsky, P.A Akimov., I.N. Afanasyeva, T.B. Kaytukov. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(2): 9–34.
19. 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.
20. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory. *Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A.* 2000; 456(8): 2223–2242.

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 11.05.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 10.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.131.54
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149 Оригинальная статья / Original Paper

Накопление необратимой деформации грунтов как результат повторных нагрузок

К.Г. Кондрашин, Р.А. Петров, Н.А. Рактович
Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является установление закономерности накопления необратимых деформаций грунтов от повторных нагружений. **Метод.** При нагружении грунтов равновесие между внешними и внутренними силами устанавливается постепенно в течение более или менее продолжительного времени. Поэтому при однократном приложении циклической нагрузки такое равновесие может быть достигнуто лишь за относительно большое время. **Результат.** Предложен приближенный метод расчета величины деформации, развившейся в результате действия циклической нагрузки. Определены случаи, когда надо учитывать вязкую составляющую деформации и когда последней можно пренебречь. Установлено, что при определении деформации грунтов, развившейся за однократное приложение таких циклических нагрузок, которые характерны для процесса их уплотнения машинами, во всех случаях, кроме укатки их катками на пневматических шинах, вязкую составляющую деформации можно не учитывать. **Вывод.** В относительно небольшое время действия нагрузки состояние равновесия может быть достигнуто лишь в процессе деформирования грунтов повторными нагружениями. С увеличением числа повторностей нагружения грунт постепенно упрочняется, а деформация снижается. Это происходит как за счет необратимой, так и обратимой частей деформации. Следовательно, модуль деформации грунта от цикла к циклу увеличивается.

Ключевые слова: нагрузка, необратимая деформация, напряжение, грунты, строительство

Для цитирования: К.Г. Кондрашин, Р.А. Петров, Н.А. Рактович. Накопление необратимой деформации грунтов как результат повторных нагрузок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):143-149. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149

Accumulation of irreversible deformation of soils as a result of repeated loading

K.G. Kondrashin, S.R. Kosobokova, R.A. Petrov, **N.A**. **Raktovich**
Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to establish the patterns of accumulation of irreversible soil deformations from repeated loading. **Method.** When loading soils, the balance between external and internal forces is established gradually over a more or less long time. Therefore, with a single application of a cyclic load, such an equilibrium can be achieved only in a relatively long time. **Result.** An approximate method is proposed for calculating the magnitude of the deformation developed as a result of the action of a cyclic load. The cases are determined when it is necessary to take into account the viscous component of deformation and when the latter can be neglected. It has been established that when determining the deformation of soils that has developed during a single application of such cyclic loads that are characteristic of the process of their compaction by machines, in all cases, except for rolling them with rollers on pneumatic tires, the viscous component of deformation can be ignored. **Conclusion.** In a relatively short time of the load, the state of equilibrium can

be achieved only in the process of soil deformation by repeated loading. With an increase in the number of loading repetitions, the soil gradually hardens, and the deformation decreases. This occurs both due to the irreversible and reversible parts of the deformation. Consequently, the soil deformation modulus increases from cycle to cycle.

Keywords: load, irreversible deformation, stress, soils, construction

For citation: K.G. Kondrashin, S.R. Kosobokova, R.A. Petrov, N.A. Raktovich. Accumulation of irreversible deformation of soils as a result of repeated loading. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):143-149. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149

Введение. Характер изменения деформаций грунтов при повторных нагружениях отображает их пластично-вязкие свойства [1-2]. В тех случаях, когда материалы не обладают вязкими свойствами, вся соответствующая данной нагрузке необратимая деформация развивается сразу, т. е. за однократное приложение нагрузки. В процессе первого нагружения материал приобретает соответствующее нагрузке упрочнение. От повторных нагружении наблюдается только обратимая часть деформации. В идеально вязких телах необратимая деформация при повторных нагрузках не меняется. Грунты занимают промежуточное положение. При этом, чем большее количество глинистых частиц они содержат, тем выше их вязкость и тем, следовательно, в меньшей степени затухает от цикла к циклу необратимая деформация.

Постановка задачи. Представляют интерес закономерности накопления необратимых деформаций грунтов от повторных нагружении. Эти закономерности могут быть использованы как при расчете требуемого числа проходов уплотняющих машин, так и при определении той суммарной величины осадки земляного полотна, которая может произойти в результате движения транспорта. В процессе повторных нагружении происходит снижение как необратимой, так и обратимой части деформации. При этом необратимая деформация снижается более интенсивно.

Методы исследования. Если к грунтам посредством штампа прикладывать повторные нагрузки одной и той же величины и с одной и той же скоростью изменения этого напряжения, то в полулогарифмических координатах зависимость накопленной деформации от числа повторностей приложения нагрузки может быть отображена прямой линией. Поэтому можно сказать, что накопление деформаций при повторных нагружениях качественно сходно с их накоплением в процессе ползучести. Поэтому образовавшаяся через *n* циклов приложения нагрузки необратимая деформация ε_n может быть рассчитана как [3-6]:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1\left(Kl_g n + 1\right) \qquad (1)$$

где ε_1 – необратимая деформация, развившаяся за время первого нагружения; К – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Этой формулой можно пользоваться лишь при n > 1. Такая закономерность сохраняется до n, равного 20-30 циклам. При большем числе повторностей, подобно тому, как это было и при ползучести, закономерность может несколько изменяться. При уплотнении грунтов число повторностей приложения нагрузки обычно не превышает названного предела, поэтому при решении ряда задач, связанных с уплотнением, можно базироваться на логарифмической зависимости.

Многочисленные опыты позволили установить, что коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации зависит от вида и состояния грунта и не зависит от величины напряжения, если последнее не превосходит предела прочности, а также от скорости изменения напряженного состояния [7-8].

Независимость этого коэффициента от перечисленных выше факторов обнаруживает весьма интересное свойство грунтов, которое в сильной степени облегчает практические расчеты. Оно заключается в том, что при деформировании грунтов повторными циклическими нагрузками процессы накопления необратимой деформации по повторностям нагружения при различных напряжениях или скоростях изменения напряженного состояния подобны. Таким

образом, деформация, полученная от первого нагружения, определяет собой всю накопленную при повторных нагрузках деформацию. Это свойство может быть выражено в виде

$$\frac{\sum_1^n \varepsilon}{\sum_1^n E'} = \frac{\varepsilon_1}{E'_1}, \qquad (2)$$

где ε_1 и ε'_1– относящиеся к разным параметрам нагружения необратимые деформации первых циклов; $\sum_1^n \varepsilon$ и $\sum_1^n E'$ – соответствующие этим параметрам накопленные необратимые деформации за n повторностей приложения нагрузки.

Опыты показали, что в зависимости, от вида грунта коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации может изменяться в 3-4 раза, а в зависимости от влажности и плотности грунта — в 2-2,5 раза. Оказалось, что одни и те же грунты разной плотности, но имеющие один и тот же модуль деформации, характеризуются одинаковыми коэффициентами интенсивности накопления необратимой деформации. Наоборот, грунты одной и той же плотности, но имеющие разные значения модулей деформации, отличаются и коэффициентами. Поэтому поведение грунтов при повторных нагружениях определяется величинами их модулей деформации. Такая закономерность соблюдается лишь при грунтах одинаковой влажности.

Коэффициент интенсивности накопления пластической деформации для песка непрерывно возрастает по мере увеличения модуля, т. е. с его уплотнением. Для связного грунта зависимость этого коэффициента от модуля деформации характеризуется кривой, имеющей максимум. Возрастание этого коэффициента свидетельствует о повышении вязких свойств грунтов.

Вязкие свойства связного грунта, как это и следовало ожидать, оказались значительно выше, чем грунта несвязного. В среднем можно считать, что коэффициент интенсивности накопления пластической деформации тяжелого пылеватого суглинка в два раза больше, чем песка. По мере уплотнения происходит сближение грунтовых частиц и их агрегатов, число контактов между ними при этом увеличивается, что и повышает вязкие свойства грунтов и, следовательно, ведет к увеличению коэффициента интенсивности накопления пластической деформации. Этим и объясняется возрастание этого коэффициента по мере увеличения модуля деформации. Снижение его у связных грунтов при модулях деформации последних свыше 200 кг/см^2 может быть объяснено тем, что здесь, благодаря весьма большой плотности, грунт все более становится «монолитным» и по своим свойствам начинает приближаться к «твердым» телам, т. е. к таким материалам, где деформация развивается не только на гранях отдельных зерен и частиц, но и за счет изменения формы и размеров самих частиц. Состояние равновесия в таких материалах достигается скорее.

Следует заметить, что здесь под вязкими свойствами понимаются такие свойства тел, которые обусловливают снижение скорости развития деформации. Поэтому, когда говорится о снижении вязких свойств в связи, например, с повышением плотности связных грунтов, то из этого вовсе не следует, что понижается также и коэффициент вязкости. Последний, определяет сопротивление тела деформированию и потому в данном случае он будет не понижаться, а повышаться.

Частота приложения нагрузок отражается на величине накопленной необратимой деформации только в тех случаях, когда продолжительность пауз между нагружениями меньше времени, которое требуется для полного восстановления обратимой части деформации. При этом по мере увеличения частоты накопление деформации несколько снижается. Снижение протекает вследствие того, что при недостаточной продолжительности пауз процесс обратного упругого последействия еще не успевает заканчиваться и при повторных нагружениях, во-первых, возникают как бы «встречные движения» отдельных грунтовых агрегатов, а во-вторых, отдельные грунтовые частицы и агрегаты в меньшей степени находят новые «пути» для взаимоперемещений во время последующего нагружения. Вполне естественно, что частота приложения нагрузок может иметь значение при деформировании грунтов, обладающих тиксотропными свойствами. Здесь по мере роста частота может приближаться к собственной частоте колебаний грунта. При этом наступает явление своеобразного резонанса, при котором происходит обильное выделение свободной воды, сопровождающееся снижением связи между частицами

грунта и их агрегатами. В результате сопротивление грунта внешней нагрузке снижается и вследствие этого эффективность действия последней повышается.

Это явление в настоящее время исследовано еще недостаточно. Надо заметить, что те частоты, при которых происходит это явление, обычно весьма высоки (100—200 гц) и потому их трудно достигнуть. Гораздо чаще в практике уплотнения грунтов наблюдаются случаи, когда обладающий определенной массой поверхностный вибратор входит в резонанс не только с грунтом уплотняемого слоя, но и с основанием этого слоя. В результате такая система начинает колебаться с повышенными амплитудами, что повышает эффективность возмущающей силы.

При повторных приложениях циклической нагрузки происходит упрочнение грунта. Однако упрочнение полностью сохраняется лишь при тех или же меньших напряжениях и скоростях изменения напряженного состояния, при которых совершались повторные нагружения. Если повысить напряжение или же понизить скорость изменения напряженного состояния, то необратимая деформация снова возрастет, т. е. упрочнение частично будет утрачено.

В процессе проведенных опытов было установлено, что если на предварительно упрочненный грунт действовать повторной циклической нагрузкой, меняя через определенное количество циклов величины напряжений, но так, чтобы они все время были ниже того напряжения, при котором производили предварительное упрочнение, то соответствующие этим измененным напряжениям деформации будут всегда происходить с некоторым запаздыванием. Так, если напряжение понижается, то новая, соответственно пониженная величина деформации устанавливается лишь постепенно за несколько циклов, совершенных уже при новом, меньшем значении напряжения. То же происходит и от повышения напряжения. Грунт как бы «помнит» тот процесс, который совершался до этого изменения. В связи с тем, что накопление необратимой деформации от повторных нагружений качественно сходно с накоплением ее в процессе ползучести, то для расчета величины этой деформации в обоих случаях может служить один и тот же метод. Экспериментальным путем установлено, что при одном и том нее времени действия нагрузки необратимая деформация от повторных нагружений, общее число которых равно или менее 20, в среднем в 1,4 раза больше, чем при ползучести.

Это можно объяснить тем, что при повторных нагружениях в периоды разгрузок происходят обратные движения грунтовых частиц и их агрегатов, что уменьшает их «взаимозаклинивание» и тем самым в период нового нагружения создаются условия для образования дополнительной деформации. От увеличения числа циклов разница между деформациями при ползучести и повторных нагружениях снижается.

Для расчета величины накопленной относительной необратимой деформации от повторных циклических нагружений, которые совершаются при одном и том же напряжении, может служить выражение:

$$\varepsilon_n = 1{,}4\sigma\left[\frac{1}{\Pi} + \frac{1}{\eta_0 x}\ln(1 + x t_{\text{ЭО}})\right] \qquad (3)$$

которое отличается от выведенной выше для расчета величины накопленной при ползучести деформации тем, что в нее введен определенный опытным путем поправочный коэффициент 1,4. За время tЭО следует принимать общее эквивалентное время действия нагрузки за n циклов.

В практике часто наблюдаются случаи, когда в процессе повторных нагружений грунтов напряжения не остаются постоянными, а непрерывно от цикла к циклу повышаются. При проезде автомобилей и уплотнении грунтов катками такое положение имеет место ввиду все уменьшающейся глубины колеи. Эта же картина наблюдается и при уплотнении грунтов трамбованием. Причиной такого повышения является непрерывное упрочнение грунтов, благодаря которому время удара снижается, а напряжение соответственно увеличивается. Общую относительную необратимую деформацию, накопленную за n приложений нагрузки, совершающихся с переменным, все увеличивающимся напряжением, можно рассматривать как сумму двух составляющих:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \qquad (4)$$

где ε_1– относительная необратимая деформация, накопленная за n циклов нагружения в предположении, что повторности совершаются при среднем напряжении 0,5 (s1+s);

ε_2 – относительная необратимая деформация, развившаяся за счет разницы между максимальным s и этим средним напряжением. Величину ε_2 можно рассчитать, используя выражение (III):

$$\varepsilon_1 = 0{,}7(\sigma_1 + \sigma_n)\left[\frac{1}{П} + \frac{1}{\eta_0 x}\ln(1 + x t_{ЭО})\right] \quad (5)$$

Значение ε_2 определяется так:

$$\varepsilon_2 = \left(\sigma - \frac{\sigma_1+\sigma_n}{2}\right)\frac{1}{П} = \frac{\sigma_n-\sigma_1}{2П} \quad (6)$$

Тогда общая деформация находится по формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n-\sigma_1}{2П} + 0{,}7(\sigma_1 + \sigma_n)\left[\frac{1}{П} + \frac{1}{\eta_0 x}\ln(1 + x t_{ЭО})\right] \quad (7)$$

Если внизу деформируемого слоя грунта расположено более жесткое основание, что, например, наблюдается при уплотнении грунта, где таким основанием служит ранее уплотненный слой, то выбирать значения модуля необратимой деформации «П» должны с учетом этого обстоятельства. Величина «П» будет тем больше приближаться к значению, соответствующему более жесткому основанию, чем тоньше будет слой деформируемого грунта.

Значения модулей деформаций $Е_э$, а также модулей необратимых деформаций $П_э$, найденные с учетом влияния более жесткого основания, можно назвать эквивалентными модулями. Эквивалентные модули по своей абсолютной величине занимают промежуточное положение между значениями модулей, соответствующих верхним более рыхлым слоям грунта и уплотненным, а потому и более жестким основаниям этих слоев.

Накопленную необратимую деформацию можно определить также на основе опытной зависимости (I), а общую накопленную деформацию можно рассматривать как сумму трех составляющих, из которых первая отображает ее величину, развившуюся от первого нагружения, вторая учитывает то ее значение, которое получается за счет разности напряжений последнего и первого циклов, а третья составляющая учитывает величину деформации, развившуюся за счет повторности приложения нагрузки.

В результате такого подхода для расчета накопленной относительной необратимой деформации может быть получена следующая формула [9]:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_1}{П_Э}[\beta + 0{,}5К(1 + \beta)\lg n] \quad (8)$$

где σ_1 – напряжение при первом цикле нагружения; $П_Э$ – эквивалентный модуль необратимой деформации; β – коэффициент увеличения напряжений; $\beta = \frac{\sigma_n}{\sigma_1}$; σ_n – напряжение при последнем цикле нагружения; n – число повторности приложения нагрузки; $К$ – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Формула может служить для расчетов, связанных с деформированием связных грунтов при напряжении σ_n, меньшем предела прочности.

Обсуждение результатов. В случае неупрочненных грунтов, т. е. подвергающихся деформированию в первый раз, накопление деформаций при ползучести происходит только за счет ее необратимой части. Обратимая часть деформации развивается в процессе приложения нагрузки и в дальнейшем понижается. Даже при больших скоростях изменения напряженного состояния, близких к тем, которые встречаются при ударных нагрузках, отставание в изменении величины обратимой части деформации по сравнению с изменениями напряжения практически отсутствует. В связи с этим при нагружении грунта циклическими нагрузками величина обратимой деформации не зависит от скорости изменения напряженного состояния [10-12]. В случае упрочненных грунтов, т. е. уже подвергавшихся ранее нагружению, обратимая часть деформации развивается с пониженными скоростями. В связи с этим накопление деформации при ползучести здесь может явиться следствием роста не только необратимой, но и об-

ратимой части деформации. По мере упрочнения грунта скорость течения обратимой деформации снижается.

Сильно упрочненные грунты при деформировании нагрузками, напряжения от которых не превосходят определенных пределов, не обнаруживают деформаций и по своим свойствам приближаются к абсолютно твердым телам.

Выведенные формулы могут служить для расчета величин деформаций в процессе ползучести связных грунтов, и опытным путем определены значения расчетных параметров. Относительное снижение напряжений в процессе релаксации не зависит от их начальных величин. Интенсивность снижения напряжений повышается по мере роста влажности грунтов и содержания в них глинистых частиц и понижается с повышением плотности грунтов. Поведение грунтов в процессе релаксации напряжений в сильной степени отличается от поведения идеального максвелловского тела. Поэтому для оценки процесса релаксации напряжений предложена иная, отличная от времени релаксации константа. В результате сопоставления процессов ползучести и релаксации с достаточными на то основаниями можно полагать, что релаксация напряжений есть следствие перехода обратимой деформации в пластические сдвиги.

Классический вид диаграмм циклической нагрузки в координатах «напряжение – деформация», а также величина необратимой части деформации находятся в зависимости от скорости изменения напряженного состояния. С увеличением скорости возрастает происходящая вначале нагружения задержка в развитии деформации, в большей степени проявляется явление последействия и снижается необратимая часть деформации. Влияние скорости снижается по мере ее роста и в том диапазоне скоростей, которые обычно бывают при работе машин для уплотнения грунтов и проезде автомобилей. Этим явлением практически можно пренебречь. Найдено, что развивающиеся в результате циклических нагрузок деформации (при тех их параметрах, которые обычно встречаются в процессе уплотнения) у связных грунтов находятся в линейной зависимости от напряжений.

Вывод. Предложен приближенный метод расчета величины деформации, развившейся в результате действия циклической нагрузки. Определены случаи, когда надо учитывать вязкую составляющую деформации и когда последней можно пренебречь. В частности, найдено, что при определении деформации грунтов, развившейся за однократное приложение таких циклических нагрузок, которые характерны для процесса их уплотнения машинами, во всех случаях, кроме укатки их катками на пневматических шинах, вязкую составляющую деформации можно не учитывать.

Накопление необратимой деформации при повторных циклических нагрузках качественно сходно с накоплением ее в процессе ползучести. В связи с этим для определения накопленной в процессе повторных нагрузок необратимой деформации можно пользоваться теми же методами, что и при расчете деформации, развившейся в процессе ползучести. Интенсивность накопления необратимой деформации при повторных приложениях нагрузки не зависит ни от напряжения, ни от скорости изменения напряженного состояния. Поэтому накопленная деформация определяется в основном той величиной необратимой деформации, которая развивается в результате первого нагружения грунта.

Выведены формулы, по которым можно рассчитать величины накопленной необратимой деформации при повторных нагружениях, совершающихся, как при постоянном, так и переменном напряжениях.

Библиографический список:

1. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Саинов М.П. Анализ состояния грунтовой плотины колымской ГЭС // Вестник МГСУ. 2009. №2. С. 111-118.
2. Солодов В.В., Матуа В.П. Исследование влияния степени уплотнения грунта земляного полотна на накопление остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций // Автомобильные дороги. 2014. - № 8. - С. 70-77.
3. Болдырев Г.Г., Барвашов В.А., Кошкина Н.В. Происхождение и состав грунтов. Физическиеи механические свойства грунтов // Справочник геотехника. Основания, фундаментыи подземные сооружения / под ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева). М.: АСВ, 2014. С. 31-68

4. Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластическихмоделей // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 367. С. 190-194.
5. Васильчук Ю.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Королев В.А., Трофимов В. Т. Грунтоведение. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.
6. Хафизов Р.М. Анализ методов определения деформационных характеристик связных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2015. — № 6. — С. 37—40.
7. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
8. Алексеев А. В., Иовлев Г.А. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 75-87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification. - Rotterdam, 1999.
10. Саенков А.С., Елизаров С.А., Малышев М.В. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа/ Основания, фундаменты и механика грунтов. -1991. -№ 2. -С. 15-17.
11. Миронов В.А, Софьин О.Е. Модель предельного течения дилатирующих грунтов при сложном напряженном состоянии/ Будаунщтва. Строительство. Construction. -Мн.: БНТУ, -2003. -№ 1 - 2. -С. 71-75.
12. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева Экспериментальные исследования динамических деформационных свойств грунтов и др., 1989. Т. 216. С. 242-254.

References:

1. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Sainov M.P. Analysis of the state of the soil dam of the Kolyma hydroelectric power station. *Vestnik MGSU*. 2009; 2: 111-118. (In Russ)
2. Solodov V.V., Matua V.P. Study of the influence of the degree of soil compaction of the subgrade on the accumulation of residual deformations in the elements of road structures. *Highways*. 2014; 8: 70-77. (In Russ)
3. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., Koshkina N.V. Origin and composition of soils. Physical and mechanical properties of soils. Handbook of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures ed. V.A. Ilyichev, R.A. Mangushev). M.: ASV, 2014; 31-68 (In Russ)
4. Strokova L.A. Determination of soil deformability parameters for elastic-plastic models. *Bulletin of the Tomsk State University*. 2013; 367: 190-194. (In Russ)
5. Vasilchuk Yu.A., Voznesensky E.A., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Korolev V.A., Trofimov V.T. - M .: Publishing house of Moscow State University, 2005: 1024. (In Russ)
6. Khafizov R.M. Analysis of methods for determining the deformation characteristics of cohesive soils. *Foundations, foundations and soil mechanics.* 2015; 6: 37-40. (In Russ)
7. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis limit or design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952; 10(2): 157-165.
8. Alekseev A.V., Iovlev G.A. Adaptation of the model of hardening soil (hardening soil) for the engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019; 4: 75-87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87. (In Russ)
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification. Rotterdam, 1999.
10. Saenkov A.S., Elizarov S.A., Malyshev M.V. Development of soil limit state areas at the base of a square stamp. *Foundations, foundations and soil mechanics.* 1991; 2:15-17. (In Russ)
11. Mironov V.A., Sof'in O.E. Model of the limiting flow of dilating soils in a complex stress state. *Budaunshtva. Construction. Construction.* Minsk: BNTU, 2003;1(2): 71-75.
12. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva Experimental studies of dynamic deformation properties of soils et al., 1989; 216.: 242-254. (In Russ)

Сведения об авторах:

Кирилл Геннадьевич Кондрашин, ассистент кафедры «Геодезия, кадастровый учёт»; младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; аспирант; astrakhan_kirill@mail.ru ORCID 0000-0001-7708-0043

Роман Андреевич Петров, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; аспирант; tottenhem@bk.ru

Надежда Алексеевна Рактович, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; доцент кафедры «Дизайна и реставрации»; Член союза дизайнеров РФ; аспирант; n.raktovich92@yandex.ru

Information about authors:

Kirill G. Kondrashin, Assistant of the department "Geodesy, cadastral registration"; junior researcher at the Research Laboratory for Priority Research in the Region; graduate student; astrakhan_kirill@mail.ru

Roman A.Petrov, Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Studies of the Region; graduate student; tottenhem@bk.ru

Nadezhda A. Raktovich, Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Research in the Region; Assoc. Prof. of the Department of Design and Restoration; Member of the Union of Designers of the Russian Federation; graduate student; n.raktovich92@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest

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

Поступила в редакцию/ Received 07.04.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 11.05.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 11.05.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК66.021.3
DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-150-157 Оригинальная статья / Original Paper

Исследование различных видов биологической коррозии бетона

С.А. Логинова, А.А. Петренко
Ярославский государственный технический университет,
150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение степени развития различных видов микроорганизмов и воздействия их на физико-механические свойства бетона. **Метод.** Оценка возможности бетона служить субстратом для различных видов биодеструкторов проводилась с помощью определения влагопоглощения и pH водной вытяжки бетонных образцов. **Результат.** Экспериментально установлен механизм воздействия различных микроорганизмов на бетон. Определен таксономический состав наиболее агрессивных к бетону микроорганизмов. Проведена оценкавлияния биообрастания на физико-механические свойства бетона. **Вывод.** Результаты исследования служат основой для грамотного подбора наиболее эффективных методов антикоррозионной защиты бетонных конструкций, эксплуатирующихся в биологически агрессивных средах.

Ключевые слова: биологическая коррозия, биостойкость, бетон, водоросли, бактерии, грибы

Для цитирования: С.А. Логинова, А.А. Петренко. Исследование различных видов биологической коррозии бетона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):150-157. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-150-157

Investigation of various types of biological corrosion of concrete

S.A. Loginova, A.A. Petrenko
Yaroslavl State Technical University,
88 Moscow Ave., Yaroslavl 150023, Russia

Abstract. **Objective.** Determination of the degree of development of various types of microorganisms and their effect on the physical and mechanical properties of concrete. **Method.** Assessment of the possibility of concrete to serve as a substrate for various types of biodestructors was carried out using the determination of moisture absorption and pH of water drawing of concrete samples. **Result.** Experimental mechanism of action of various microorganisms on concrete is established. Taxonomic composition of microorganisms most aggressive to concrete is determined. The impact of biofouling on the physical and mechanical properties of concrete was assessed. **Conclusion.** The results of the investigation serve as the basis for competent selection of the most effective methods of corrosion protection of concrete structures operating in biologically aggressive environments.

Keywords: biological corrosion, bioavailability, concrete, algae, bacteria, mushrooms

For citation: S.A. Loginova, A.A. Petrenko. Investigation of various types of biological corrosion of concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):150-157. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-150-157

Введение. В настоящее время бетон является самым широкоприменяемым материалом в строительстве. Несмотря на то, что впервые бетон применили в эпоху расцвета Римской империи, этот материал, благодаря своим уникальным свойствам, был и остается одним из самых часто используемых [1-3]. В коррозионно-агрессивных средах бетоны подвержены разрушению и преждевременному старению. Одним из самых малоизученных видов коррозии бетона по-

прежнему остается биологическая коррозия [4]. Поэтому, изучение коррозионных процессов, развивающихся в бетоне под воздействием различных микроорганизмов, не теряет своей актуальности и по сей день.

К настоящему времени выделяют три вида биологической коррозии бетона: бактериальную, водорослевую и грибковую.

Исследования коррозионного разрушения бетона вызваны необходимостью повышения долговечности и надежности бетонных и железобетонных конструкций; потребностью разработки мер по предупреждению аварийных ситуаций; существенными материальными потерями от коррозионной деградации бетона; проблемой загрязнения окружающей среды продуктами коррозии и метаболитами микроорганизмов-деструкторов [5, 6].

Постановка задачи. Биокоррозия бетона – многофакторный процесс, кинетика которого зависит от видового разнообразия биодеструкторов, ряда абиотических факторов и свойств самого бетона. Успешное исследование биологической коррозии бетона возможно только на основе основательного изучения физико-химических процессов, развивающихся в бетоне в результате их повреждения микроорганизмами.

Методы исследования. Изучение биологического разрушения бетона проводилось в соответствии с ГОСТ 27677 «Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний».

Суть метода заключается в сравнении параметров, характеризующих коррозионную стойкость бетонных образцов, подверженных биообрастанию, со значениями показателей, характерными для контрольных бетонных образцов [7].

В соответствии с ГОСТ 28206-89 «Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов» экспериментальные образцы предварительно обрабатывались питательным раствором, способствующим развитию водорослей, бактерий и грибков.

Механизмы всех видов биологической коррозии бетонов сводятся к физико-химическим процессам, которые протекают в результате выделения кислых продуктов метаболизма микроорганизмами.

Поэтому для исследования механизмов различных видов биокоррозии бетона были выбраны следующие методы: определение влагопоглощения бетона по массе и по объему, регистрация изменения pH водной вытяжки бетона потенциометрическим методом с помощью pH-метр/иономер Анион-4100.

Для определения таксономического состава биоповреждений брались соскобы с поверхности бетонных образцов. Электронная микроскопияпроводилась с помощью микроскопа Meiji Techno (Япония) [8, 9].

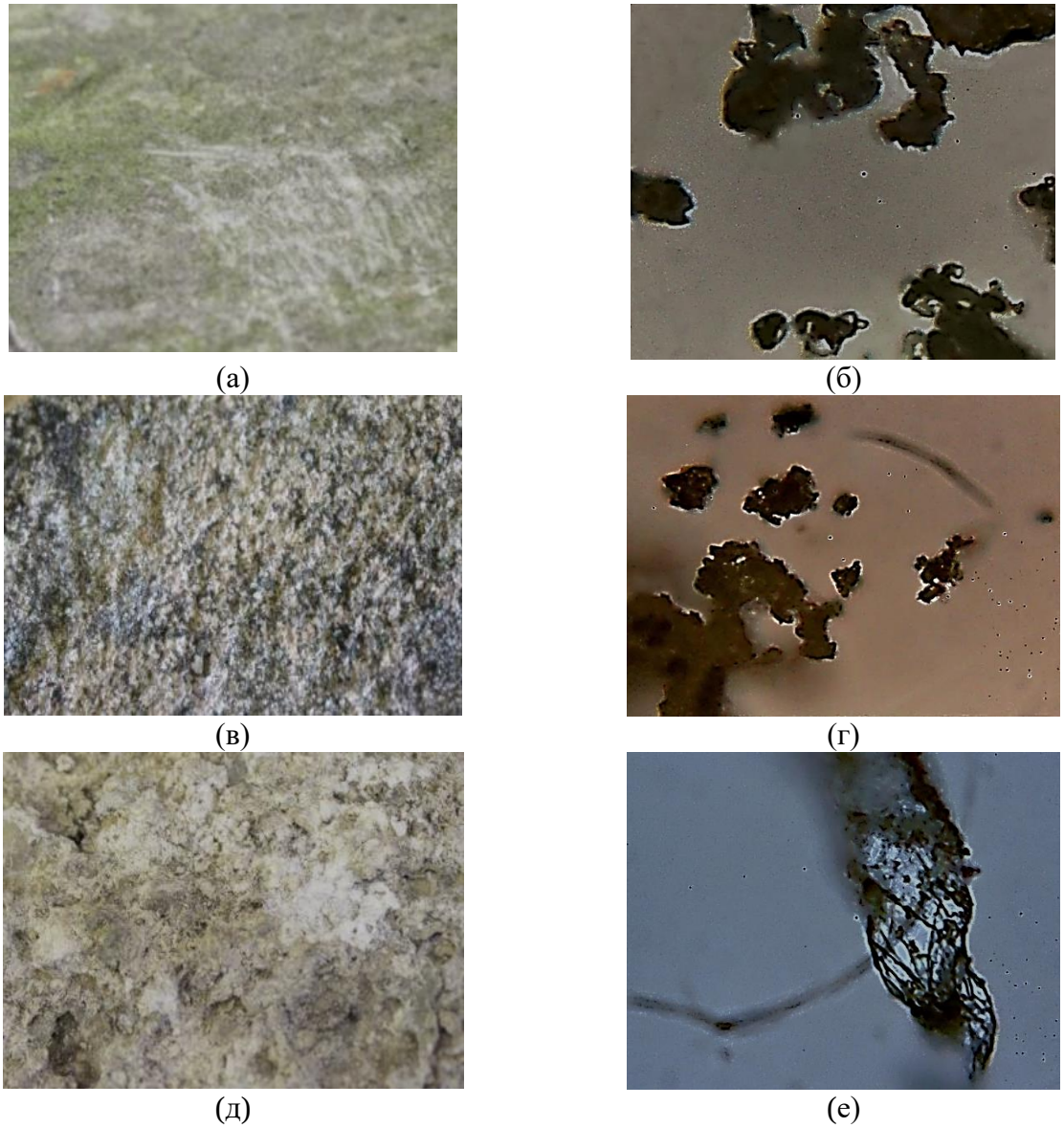
Обсуждение результатов. На биостойкость исследовались бетонные образцы, часть из которых не имели визуально определяемого биологического загрязнения. Методом электронной микроскопии на всех образцах было обнаружено биоповреждение (рис.1).

На образцах, подверженных водорослевой коррозии, был обнаружен налет зеленого цвета с сероватыми включениями, которые хорошо видны невооруженным глазом. Методом электронной микроскопии на поверхности бетона были зафиксированы большие скопления водорослей (рис. 1, а, б).

С помощью определителей [10-12] был установлен таксономический состав биоты, а именно, водоросли родов Gloeocapsa, Chlorococcum, Chlorella (рис. 2).

Водоросли производят кислород в качестве побочного продукта фотосинтеза. Их сине-зеленый цвет обусловлен наличием хлорофилла и фикоцианина, поэтому иногда их называют сине-зелеными водорослями. Поверхность бетонных образцов, подверженных бактериальной коррозии, была сильно повреждена. Методом световой микроскопии и с помощью определителей [10-12] удалось идентифицировать палочковидные бактерии.

В ходе эксперимента было зафиксировано, что основными возбудителями бактериальной коррозии при длительной эксплуатации бетона являются представители рода Bacillus. При грибковой коррозии поверхность бетонных образцов была сильно разрушена и покрыта беловато-серым налетом с черными включениями в углублениях (рис. 1, д, е).



(а) (б)

(в) (г)

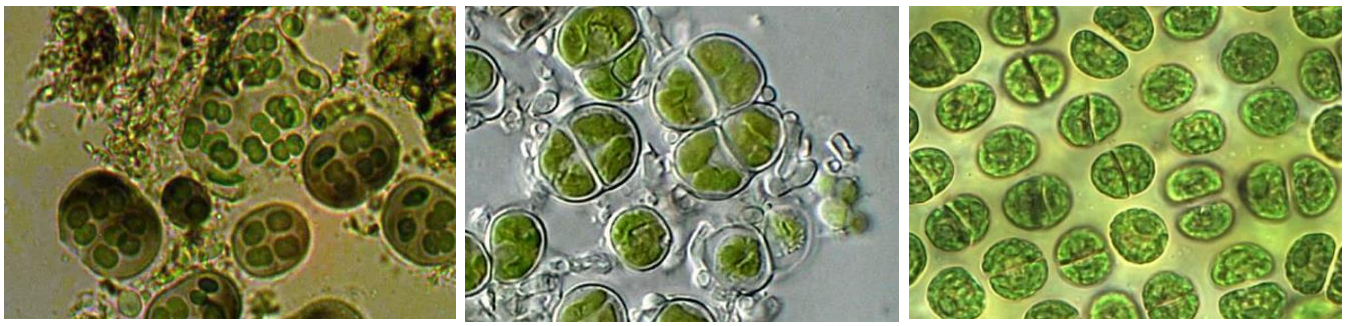
(д) (е)

Рис.1. Поверхность бетонного образца:

(а) – при водорослевой коррозии, (б) – при бактериальной коррозии; (д) – при грибковой коррозии; (в), (г), (е) – при увеличении 300 крат

Fig. 1. Surface of concrete sample:

(a) – in case of algal corrosion, (b) – in case of bacterial corrosion; (e) – in case of mushrooms corrosion; (c), (d), (e) – at increase of 300 crats

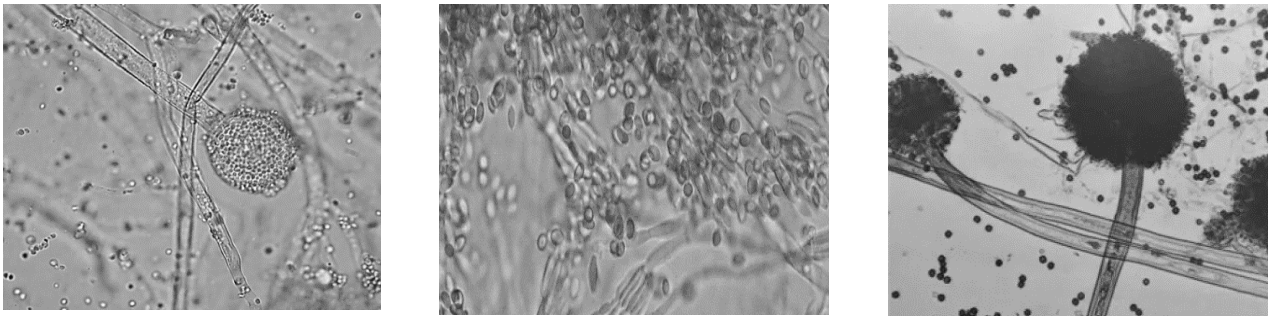


(а) (б) (в)

Рис. 2. Водоросли: а – род Gloeocapsa; б – род Chlorococcum; в – род Chlorella

Fig. 2. Algae: a – genus Gloeocapsa; b – genus Chlorococcum; c – genus Chlorella

Таксономический состав микромицетов показал наличие в пробах грибов родов: Mucor, Penicillium, Aspergillus (рис. 3). Грибы гетеротрофны и не имеют хлорофилла, поэтому зависят от доступных органических веществ. Они прикрепляются к поверхности субстрата и обычно выглядят как пушистые пятна серого, зеленого, черного или коричневого цвета [13].



(а) (б) (в)

Рис. 3. Грибы: а – родMucor; б – род Penicillium; в – род Aspergillus
Fig. 3. Mushrooms: a – genus Mucor; b – genus Penicillium; c – genus Aspergillus

Исходя из экспериментальных данных, можно сделать вывод, что в качестве наиболее агрессивных биодеструкторов к бетону выступают именно грибки и бактерии. В тоже время, на некоторых образцах были обнаружены скопления, как бактерий, так и грибков.

Этот факт косвенно подтверждает утверждение о том, что микроорганизмы чаще всего образуют биоценозы. Как правило, первыми в этих сообществах появляются хемолитотрофные бактерии, которые способны получать аденозинтрифосфорную кислоту в результате использования энергии, выделяющейся при реакциях окисления-восстановления неорганического субстрата - бетона. Образующиеся в результате жизнедеятельности хемолитотрофных бактерий скопления органических веществ, служат субстратом для жизнедеятельности грибков [14-16].

Процесс обрастания поверхности бетона можно разделить на 5 стадий [17]:

1. Формирование биопленки на поверхности бетона в короткие сроки;
2. Отложение одноклеточных микроорганизмов;
3. Колонизация;
4. Вторичное отложение более высокого уровня микроорганизмов;
5. Непрерывное увеличение биомассы на поверхности бетона с элементами отмирания некоторых микроорганизмов.

Скорость образования биполенки может быть различной. Согласно литературным источникам биопленка может образовываться за считанные минуты при контакте субстрата с водой, содержащей различные метаболиты [18-21].

С целью изучения степени воздействия на бетон различных видов микроорганизмов был проведен ряд исследований по определению водопоглощения бетонных образцов по массе. Результаты приведены на рис. 4.

Водопоглощение бетона отдельного образца по массе определяли по формуле:

$$W_{\text{м}} = \frac{m_c - m_{\text{в}}}{m_c} \times 100, \% \qquad (1)$$

где: $W_{\text{м}}$ – водопоглощение образца по массе,%; $m_{\text{с}}$ – масса высушенного образца, г; $m_{\text{в}}$ – масса водонасыщенного образца, г.

Водопоглощение образцов бетона по массе для контрольных образцов составило – 11,41%, для образцов, подверженных водорослевой коррозии, - 13,66%, для образцов, поврежденных бактериальной и грибковой коррозией, - 16,71% и 19,84% соответственно. Из графика видно, что бактериальная и грибковая коррозия приводят к значительному увеличению водопоглощения по массе.

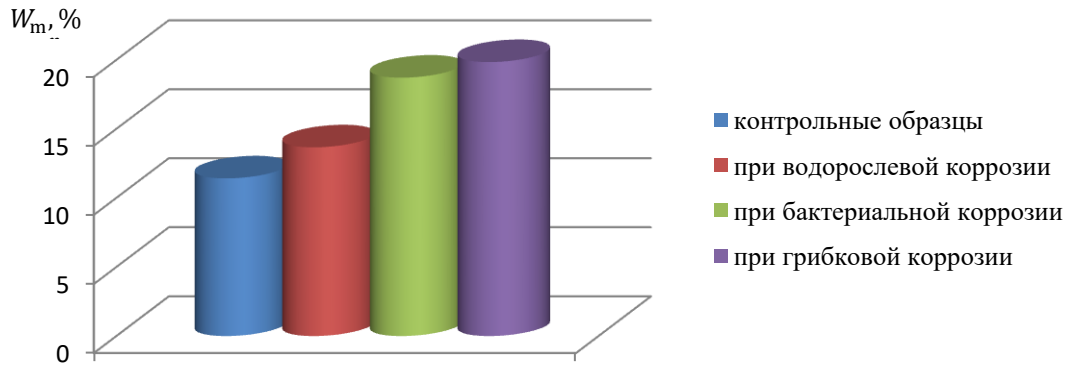


Рис. 4. Водопоглощение бетона по массе $W_м$, %
Fig. 4. Water absorption of concrete by weight Wm,%

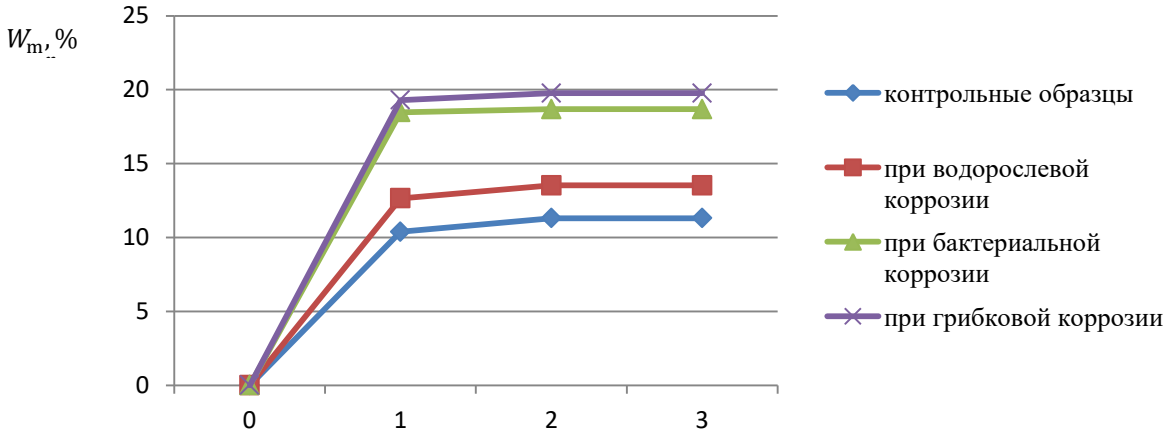


Рис. 5. Изменение скорости водопоглощения по массе
Fig. 5. Change in water absorption rate by weight

На рис. 5 видно, что образцы, подверженные грибковой и бактериальной коррозии, насыщались водой уже на первые сутки выдержки, в то время как контрольные образцы и образцы, подвергавшиеся водорослевой коррозии, достигали постоянной массы лишь на вторые - третьи сутки выдерживания в воде.

Характер кривой изменения скорости водопоглощения по массе образцов, подвергавшихся водорослевой коррозии, практически повторял кривую, описывающую данный процесс для контрольной серии образцов. Описанные на рис. 5 процессы могут быть следствием различной пористости и плотности образцов. Больший объем и размер пор образцов, подвергавшихся грибковому и бактериальномувоздействию, служит прямым доказательством большей агрессивности к бетону грибов и бактерий, нежели водорослей.

Наряду с этим, был проведен ряд экспериментов по определению водопоглощения образцов по объему. Водопоглощение образцов бетона по объему определяли по формуле:

$$W_o = \frac{W_м \times \rho_o}{\rho_в}, \qquad (2)$$

где: W_o – водопоглощение образца по объему,%; $W_м$ – водопоглощение образца по массе, %; ρ_o – плотность сухого бетона, кг/м^3; $\rho_в$ – плотность воды, принимаемая равной 1 г/см^3.

В образцах, подвергавшихся водорослевой коррозии, не выявлено достоверных изменений водопоглощения по объему, по сравнению с контрольной серией образцов. Бактериальная и грибковая коррозии сопровождались значительным увеличением водопоглощения по объему образцов бетона (рис.6).

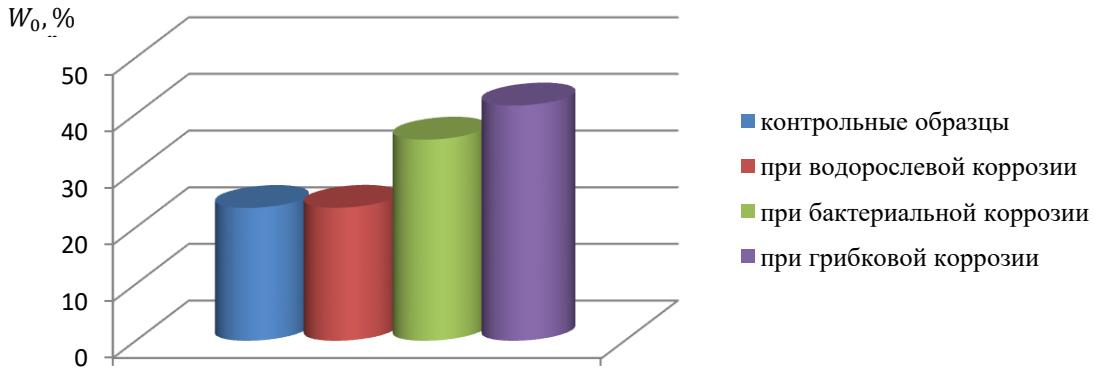


Рис. 6. Изменение водопоглощения бетона по объему
Fig. 6. Change in water absorption of concrete by volume

Увеличение водопоглощения бетона по объему у образцов, подвергавшихся воздействию бактерий и грибов, подтверждает высокую степень агрессивности данных биологических агентов. Как следствие, повышение пористости и уменьшение плотности бетона, приводит к потере прочности, что отчетливо видно на рис. 7.

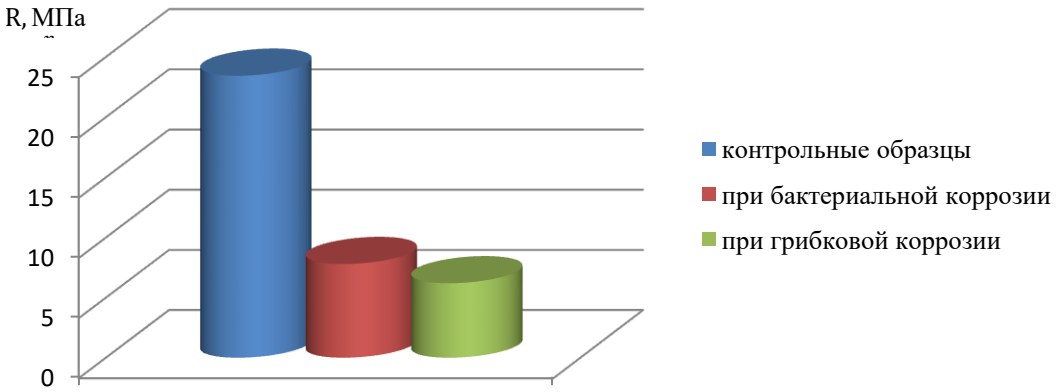


Рис. 7. Изменение прочности на сжатие бетонных образцов
Fig. 7. Change in compression strength of concrete samples

Экспериментально полученные значения pH водной вытяжки образцов позволилиопределить степень коррозионных активности различных биодеструкторов (бактерий, грибов, водорослей). Результаты представлены на рис. 8.

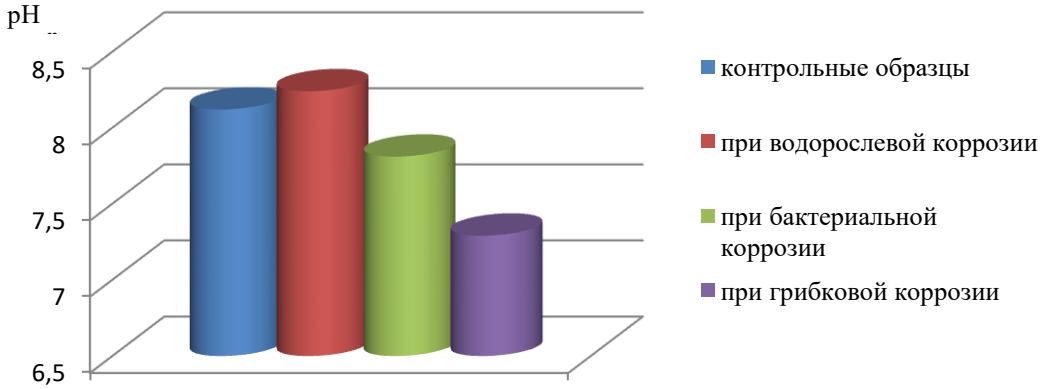


Рис. 8. Значения pH водной вытяжки бетонных образцов
Fig. 8. Values of concrete samples water drawing pH

Уменьшение pH водной вытяжки бетонных образцов свидетельствует о том, что бактерии и грибы, по сравнению с водорослями, более агрессивны к бетону, за счет своих метаболитов, которые, в основном, представлены органическими кислотами (щавелевой, лимонной, янтарной и т.д.). Органические кислоты выступают в качестве катализаторов коррозионного разрушения бетона.

Из рис. 8 видно, что pH водной вытяжки при бактериальной и грибковой коррозии ниже контрольных значений.

Вывод. Наиболее коррозионно-активными биодеструкторами по отношению к бетону являются грибы и бактерии.

1. Основной причиной разрушения бетона при биоповреждении является действие на него метаболитов микроорганизмов, представляющих собой смесь органических кислот.
2. Воздействие на бетон водорослей, бактерий и грибов сопровождается увеличением его пористости и снижением плотности, что приводит к значительному ухудшению физико-механических характеристик бетона.
3. Защита бетона от биоповреждений возможна путем своевременной обработки поверхности материала различными противомикробными составами и путем получения бетонов пониженной пористости.

Библиографический список:

1. Семенов С.А. Биоповреждения материалов и изделий техники // Вестник МИХТ. – 2007. – Т.2. - №6. – С.3-26.
2. Ерофеев, В.Т. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, А.Д. Богатов, В.А. Федорцов // Фундаментальные исследования, 2014, №12. С.708-716.
3. Иванов, С.Н. Биоповреждения в строительстве. Стройиздат, 1984. - 320 с.
4. Соломатов, В.И. Микроорганизмы разрушители материалов и изделий / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, Е.А. Морозов // Изв. вузов. Строительство.- 2001. - №8. - С. 4 – 12
5. Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 1 (385). С. 206-212.
6. Дергунова А.В., Светлов Д.А., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Микробиологическая стойкость строительных материалов // Приволжский научный журнал – Н.Новгород: ННГАСУ, №2(10), 2009. - С. 108-113
7. Чеснокова Т.В., Киселев В.А. Оценка влияния различных видов биологической коррозии на бетон // Сб. материалов III Всеросс. научно-практич.конф. с междунар.уч. «Актуальные вопросы естествознания» Иваново, ФГБОУ ВО Ивановская пожарноспасательная Академия ГПС МЧС России, 2018, С.68.
8. Fedosov S., Loginova S. Mathematical model of concrete biological corrosion // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 7 (99). С. 9906. DOI: 10.18720/MCE.99.6
9. Строганов В.Ф. Метод испытания минеральных строительных материалов на биостойкость в модельных агрессивных средах / В.Ф.Строганов, Д.А.Куколева, Л.Р. Бараева // Вестник Казанского государственного архитектурно-строительного университета.- 2011. - №3. - С. 153 – 161.
10. Стейниер, Р. Э. Эдельберг, Дж. Ингрэм Мир микробов. в 3 т. М.: Мир, 1979, Т.1, 320 с., Т.2, 334 с., Т.3, 486 с.
11. Определитель бактерий Берджи: в 2 т. / [Р. Беркли и др.]; под ред. Дж. Хоулта и др.; пер. с англ. под ред. Г. А. Заварзина. М.: Мир, 1997. - 432 с.
12. Красильников, Н.А. Определитель бактерий и актиномицетов // Акад. наук СССР. Ин-т микробиологии. - Москва, Ленинград: Изд-во и 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1949. - 832 с.
13. Чеснокова Т.В., Логинова С.А., Киселев В.А. Анализ воздействия биологической коррозии различной длительности на бктон // Сб материалов Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение» Иваново, ФГБОУ Ивановский осударственный политехнический университет, 2018, №2, С.98.
14. Adnan M., Alshammari E., Patel M., Amir Ashraf S., Khan S., Hadi S. Significance and potential of marine microbial natural bioactive compounds against biofilms/biofouling: necessity for green chemistry. – 2018. PeerJ6:e5049 https://doi.org/10.7717/peerj.5049
15. Chai W., Li W. and Ba H. Experimental study on predicting service life of concrete in the marine environment // Open Civil Eng. J. – V. 5, 2011. P. 93…99. DOI:10.2174/1874149501105010093
16. De Muynck W., De Belie N., and Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review // Ecological Engineering. – 2010, 36(2). P. 118...136
17. Mardhiah Ismail, Norhazilan Md Noor, Nordin Yahaya, Akrima Abu Bakar, Muhammad Khairool Fahmy Mohd Ali and Arman Abdullah. Statistical Investigation on Anaerobic Sulphate-Reducing Bacteria Growth by Turbidity Method // International Journal of Biological Chemistry. – 9 (4), 2015. P. 178...187. DOI: 10.3923/ijbc.2015.178.187
18. Рахимбаев Ш.М. Кинетика процессов кольматации при химической коррозии цементных систем // Бетон и железобетон. – 2012, № 6. С. 16...17
19. Логинова С.А., Гоглев И.Н. Моделирование кинетики и динамики протекания массопереноса при различных видах коррозии цементных бетонов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2020. № 6 (99). С. 22-35.DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-2

20. Giannantonio, D.J., J.C. Kurth, K.E. Kurtis, and P.A. Sobecky, Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009. 63(3): p. 252-259.
21. Pepe, O., Sannino, L., Palomba, S., Anastasio, M., Blaiotta, G., Villani, F., Moschetti, G. Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. MicrobiologicalResearch. 2010. 165(1). Pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.micres.2008.03.005
22. Mullard, J.A., Stewart, M.G. Corrosion-induced cover cracking: New test data and predictive models. ACI Structural Journal. 2011. 108(1). Pp. 71–79. DOI: 10.14359/51664204

References:

1. Semenov S.A. Biodamage of materials and equipment. *VestnikMIREA*. 2007; 2(6):.3-26. (In Russ)
2. Erofeev, V.T. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, assessment and forecasting/V.T. Erofeev, A.P. Fedortsov, A.D. Bogatov, V.A. Fedortsov. *Basic research*, 2014;12:708-716. (In Russ)
3. Ivanov, S.N. Bio-damage in construction. *Stroyizdat*, 1984: 320. (In Russ)
4. Solomatov, V.I. Microorganisms destroyers of materials and products/V.I. Solomatov, V.T. Erofeev, E.A. Morozov//Izv. universities. *Construction*. 2001; 8: 4 – 12 (In Russ)
5. Chesnokova T.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. Modeling the process of concrete biodegradation at textile enterprises. *News of higher educational institutions. TextileTechnology*. 2020; 1(385): 206-212. (In Russ)
6. Dergunova A.V., Svetlov D.A., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Microbiological stability of building materials. *Volga Scientific Journal*. N. Novgorod: NNGASU, 2009; 2(10):108-113 (In Russ)
7. Chesnokova T.V., Kiselev V.A. Assessment of the Impact of Various Types of Biological Corrosion on Concrete. Collection of Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation "Topical Issues of Natural Science" Ivanovo, FSBEI HPO Ivanovo Fire Rescue Academy Service MMMES of Russia, 20186:68. (In Russ)
8. Fedosov S., Loginova S. Mathematical model of concrete biological corrosion. *Magazine of Civil Engineering.* 2020; 7 (99):. 9906. DOI: 10.18720/MCE.99.6
9. Stroganov V.F. Method of Testing Mineral Building Materials for Bio-Resistance in Model Aggressive Environments/V.F. Troganov, D.A.Kukoleva, L.R. Baraeva. *Bulletin of Kazan State University of Architecture and Construction*. 2011; 3: 153 – 161. (In Russ)
10. Steinier R. World of microbes / R. Steinier, E. Edelberg, J. Ingram / in 3 v. M.: *Mir*, 1979; 1:320., 2: 334., 3: 486. (In Russ)
11. Bergie's bacterial determinant: in 2 v./[R. Berkeley et al.]; ed. J. Hoult et al.; translation from English ed. G. A. Zavarzin. M.: World, 1997: 432.
12. Krasilnikov N.A. Determinant of bacteria and actinomycetes.Academician of Sciences of the USSR. Institute of Microbiology. Moscow, Leningrad: Publishing house and type 2 Publishing house of the USSR Academy of Sciences. 1949: 832. (In Russ)
13. Chesnokova T.V., Loginova S.A., Kiselev V.A. Analysis of the effects of biological corrosion of various durations on concrete//Collection of materials Engineering and technical sciences - mechanical engineering and technologies "Modern knowledge-intensive technologies. Regional application "Ivanovo, FSBEI HPO Ivanovo State Polytechnic University, 2018; 2:98. (In Russ)
14. Adnan M., Alshammari E., Patel M., Amir Ashraf S., Khan S., Hadi S. Significance and potential of marine microbial natural bioactive compounds against biofilms/biofouling: necessity for green chemistry. 2018. PeerJ6:e5049 https://doi.org/10.7717/peerj.5049
15. Chai W., Li W. and Ba H. Experimental study on predicting service life of concrete in the marine environment. *Open Civil Eng. J.* 2011; 5: 93-99. DOI:10.2174/1874149501105010093
16. De Muynck W., De Belie N., and Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering*. 2010, 36(2):118...136
17. Mardhiah Ismail, Norhazilan Md Noor, Nordin Yahaya, Akrima Abu Bakar, Muhammad Khairool Fahmy Mohd Ali and Arman Abdullah. Statistical Investigation on Anaerobic Sulphate-Reducing Bacteria Growth by Turbidity Method. *International Journal of Biological Chemistry.* 2015; 9 (4):178-187. DOI: 10.3923/ijbc.2015.178.187
18. Rakhimbayev Sh.M. Kinetics of colmatation processes during chemical corrosion of cement systems. *Concrete and reinforced concrete.* 2012; 6: 16-17 (In Russ)
19. Loginova S.A., Goglev I.N. Modeling of kinetics and dynamics of mass transfer under various types of corrosion of cement concrete. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2020; (99): 22-35. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-2 (In Russ)
20. Giannantonio, D.J., J.C. Kurth, K.E. Kurtis, and P.A. Sobecky, Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009. 63(3): p. 252-259.
21. Pepe, O., Sannino, L., Palomba, S., Anastasio, M., Blaiotta, G., Villani, F., Moschetti, G. Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiological Research.* 2010; 165(1): 21–32. DOI: 10.1016/j.micres.2008.03.005
22. Mullard, J.A., Stewart, M.G. Corrosion-induced cover cracking: New test data and predictive models. ACI StructuralJournal. 2011; 108 (1): 71–79. DOI: 10.14359/51664204

Сведения об авторах:

Светлана Андреевна Логинова, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций; sl79066171227@yandex.ru

Анна Андреевна Петренко, студентка; greatann-2002@yandex.ru

Information about authors:

Svetlana A. Loginova, Cand. Sci. (Eng)), Assoc. Prof., Department of Building Structures; sl79066171227@yandex.ru

Anna Andreevna Petrenko, Student; greatann-2002@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.03.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 25.04.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 25.04.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 666.97:691.3
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-158-164 Оригинальная статья/Original Paper

Аддитивная технология изготовления изделий и сооружений из армобетона

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. Целью исследования является анализ известных технологических приемов формования торкрет-бетона и строительного 3D принтера и разработка на этой основе расширенной аддитивной технологии — метода электростатического формования изделий и сооружений из армобетона. **Метод**. Принцип получения электростатического бетона заключается в электростатическом осаждении полусухой смеси вяжущего, тонкомолотого песка и волокон на формообразующую основу из стальной или углеродной сетки. Полученные слои дозировано увлажняют тонкораспыленной водой с различными добавками, циклы осаждения смеси и увлажнения повторяют до получения нужной толщины армобетона. **Результат**. Электростатическое наращивание слоев бетона происходит без механического воздействия на формообразующую основу. Доказано, что основу изделия можно делать из небольшого количества материала за малое время и любым доступным способом. Первые же слои фибробетона после выдержки времени придают формообразующей основе прочность. По мере наращивания толщины бетона рост прочности изделия растёт, опережая рост массы. **Вывод.** Электростатический метод формования позволяет изготавливать тонкостенные корпусные детали сложной формы, пространственные оболочки, архитектурно-строительные детали, и сооружения мембран, полых колонн и стоек, опор линий электропередач, мелиоративных желобов, водоотводных труб большого диаметра, резервуаров и др.

Ключевые слова: аддитивная технология, строительное изделие, формообразующий основа, электростатическое осаждение, сухая смесь

Для цитирования: М.Р. Нахаев. Аддитивная технология изготовления изделий и сооружений из армобетона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 158-164. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-158-164

Additive technology for manufacturing products and structures from reinforced 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. An analysis of already known technological methods for molding shotcrete and a construction 3D printer confirmed the effectiveness of building additive technologies. The proposed extended additive technology, the method of electrostatic molding of products and structures made of reinforced concrete, will find its practical application in construction. **Method.** The principle of obtaining electrostatic concrete is the electrostatic deposition of a semi-dry mixture of binder, finely ground sand and fibers on a shaping base made of steel or carbon mesh. The resulting layers are dosed with finely sprayed water with various additives, the mixture sedimentation and moisturizing cycles

are repeated until the desired thickness of reinforced concrete is obtained. **Result.** Electrostatic build-up of concrete layers occurs without mechanical impact on the shaping base. This means that the basis of the product can be made from a small amount of material in a short time and in any available way. The first layers of fiber-reinforced concrete, after holding time, give strength to the shaping base. As the thickness of concrete increases, the strength of the product increases, outstripping the increase in mass. **Conclusion**. The electrostatic molding method makes it possible to manufacture thin-walled body parts of complex shape, spatial shells, architectural and construction parts, and structures of membranes, hollow columns and racks, power line supports, reclamation gutters, large-diameter drainage pipes, tanks, etc.

Keywords: additive technology, building product, shaping base, electrostatic deposition, dry mix

For citation: M.R. Nakhaev. Additive technology for manufacturing products and structures from reinforced concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):158-164. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-158-164

Введение. Большое количество изделий раньше производилось путем отделения лишнего материала. На этом было основано производство, например, в машиностроении, за исключением литья и некоторых других технологий. В последней четверти 20 века стали развиваться аддитивные технологии, основанные на присоединении материалов (пластмасс или металлических порошков), послойного наращивания и синтеза трехмерных объектов с помощью компьютерных 3D технологий.

Одной из первых механизированной аддитивной технологией у строителей можно считать технологию торкрет-бетона, которая появилась в самом начале прошлого столетия. Эта производительная технология позволяет наносить бетон на плоскую или криволинейную основу. Но не позволяет получить относительно ровную поверхность бетона. Для нанесения торкрет-бетона требуется прочная стена, формообразующая поверхность или опалубка. Потому что скорость струи бетона, вылетающей из торкрет-пушки, достигает 70-90 м/с. Несмотря, что, струя сильно диспергирована, при ударе струя бетона оказывает сильное давление на преграду.

Заметным событием для строителей и архитекторов стало создание строительного 3D принтера. Строительный 3D принтер работает не с пластмассами и не с металлическими порошками, а с бетоном и другими вяжущими материалами.

В строительном 3D принтере формующая головка может перемещаться по трем осям с большой амплитудой [1]. Известны строительные принтеры, формующая головка которых перемещается в полярных координатах. Полые стены и перегородки дома строительные принтеры формируют лентой шириной в несколько сантиметров из быстротвердеющего бетона. Как правило, бетон содержит упрочняющие волокна и различные добавки [2]. Волокна повышают пластичность и связность бетона. Они улучшают равномерность подачи смеси через формующую головку. Это позволяет увеличить толщину и ширину укладываемого слоя бетона.

Постановка задачи. Строительный принтер обходится без опалубки и при отлаженной программе и бесперебойной подаче бетона в экструзионную головку может часами работать без участия человека. Очевидные недостатки строительного принтера - он может строить только вертикальные или слабонаклонные стенки. Кроме того, поверхность строения требует отделочных работ из-за линейчатого и неровного рельефа стен. Упрочнение стен арматурой, особенно вертикальной, тоже вызывает проблемы. Пока это осуществляется вручную.

К преимуществам использования 3D принтера в малоэтажном строительстве можно отнести его производительность и возможность достижения полной автоматизации. Бесспорно, что развитие этого направления приведет к снижению себестоимости строительства и даст новые плодотворные идеи архитекторам.

Более 20 лет назад появилась еще одна разновидность аддитивной технологии в строительстве. Это, так называемое, электростатическое формование изделий и сооружений из бетона. По этому методу было опубликовано несколько работ [3-5]. Однако за много лет, прошедших с тех пор, о какой-либо экспериментальной проверке метода и исследовании образцов

электростатического бетона ничего не известно. Поэтому предстоит выполнить большой цикл работ по исследованию электростатического метода формования изделий и сооружений из армобетона различного состава. Кроме того, необходимо выполнить исследования по определению границ применимости метода в различных областях строительства.

Методы исследования. В чем суть новой аддитивной технологии? Техникам, связанным с обслуживанием электрофильтров цементных заводов, известно такое явление. Иногда на проволочных электродах фильтров образуется не рыхлый осадок из уловленной цементной пыли, а прочные бетонные стержни цилиндрической формы с сердечником в виде проволочного электрода. Прочные бетонные керны образуются на электродах тогда, когда влажность проходящих через электрофильтр газов выше нормы. Такой же эффект имеет место в электрофильтрах угольных электростанций. Здесь довольно прочные стержни образуются из золы-уноса. Кроме того, давно известны технологии покрытия металлических деталей порошковой краской с помощью электростатического поля.

За рубежом известна технология эмалирования, когда тонкий порошок силикатной эмали с помощью электростатического поля наносят на металлические изделия перед обжигом [6]. Эти примеры подтвердили, что электростатическая техника может послужить физической основой для разработки нового метода аддитивной технологии в производстве строительных изделий и сооружений из армобетона и вообще в строительстве.

Объяснить суть метода лучше на примере. Предположим, нужно изготовить элемент малой архитектуры в виде пустотелого замкнутого шара диаметром один метр из армобетона. Сначала делают формообразующую основу шара из металлической сетки или другого электропроводного материала. Можно сделать сетчатый шар вручную, а можно изготовить его на большом 3D принтере. Тем более, для этой технологии сетка основы может быть предельно тонкой, а значит, основу можно сделать быстро.

Во время осаждения сухой смеси на сетку, она не испытывает заметного механического воздействия, в отличие от процесса торкретирования. Сеточный шар со сложным ажурным орнаментом можно изготовить на 3D принтере из электропроводного АВС-пластика. Обычно это пластик с присадками графита. Используют программу для принтера, чтобы сетка получилась не простая, а орнаментальная, например, в ближневосточном стиле. Готовую формообразующую основу в виде сетчатого шара подвешивают и заземляют. Далее, используя электростатический пистолет, наносят на шар сухую смесь, состоящую из цемента, тонкого песка и упрочняющих волокон.

Цемент используют размолотый без гидрофобных добавок. Поскольку срок хранения у такого цемента меньше, чем у обычного цемента, стараются использовать его свежим. Вместо тонкого песка, в зависимости от требований к изделию и его назначения, применяют минеральные порошки - тонкоизмельченные отходы камнеобработки или золошлаковые отходы, порошок перлита, вулканического пепла, цементную пыль из электрофильтров цементных заводов и другие тонкодисперсные материалы природного и техногенного происхождения [7-9].

Изделие, или сооружение, из электростатического фибробетона, кроме упрочнения волокнами, имеет формообразующую основу. Основа может быть выполнена в виде арматурно-сеточного каркаса, способного нести в изделии значительную нагрузку. В качестве дополнительного упрочнения армобетона, кроме сетки, используют волокна из щелочестойкого стекла, базальта, углеродные волокна. В некоторых случаях могут применяться синтетические и растительные волокна льна, джута и др. Обычная стальная фибра и грубая полипропиленовая фибра здесь не годится. Для дополнительного армирования электростатического бетона годится волокно толщиной не более 30-50 мкм и длиной от 3 до 30 мм, в зависимости от типа изделия. Обычно прочность минеральных волокон следует правилу - чем тоньше волокно, тем выше удельная прочность. Отдельный вопрос - физико-химические свойства волокон. Например, смачиваемость и химическая устойчивость различных волокон в водных растворах щелочей, адгезия волокон к цементному камню в зависимости от состава бетона и др.

При электростатическом осаждении сухой смеси на формообразующую основу из сетки задают режим нанесения порошка. На процесс осаждения влияют: скорость подачи смеси, скорость воздуха из распылителя, расстояние между распылителем и изделием, величина напря-

жения между электростатическим распылителем и заземленным изделием и др. Компоненты сухой смеси, проходя через канал электростатического распылителя, получают электрический заряд. Правильно подобранное расстояние между распылителем и изделием улучшает осаждение сухой смеси на тыльную сторону изделия. Лицевая сторона при этом покрывается хорошо в любом случае.

Как происходит физически покрытие тыльной стороны сетки частицами смеси? При оптимальном расстоянии, скорости воздушного потока и напряженности электрического поля значительное количество частиц пролетает через отверстия в сетке. Затем частица полем тормозится, ускоряется в обратном направлении и оседает на сетке с тыльной стороны. После стекания электрического заряда через сетку, осажденный слой удерживается силами Ван-дер-Ваальса, которые не так малы - межмолекулярное взаимодействие происходит с энергией 10-20 кДж/моль. А затем, при дозированном увлажнении сухой смеси тонкораспыленной водой с поверхностно-активными веществами (ПАВ), к этим силам добавляются силы смачивания и капиллярного эффекта.

На процесс покрытия формообразующей основы сухой смесью влияет удельное электрическое сопротивление частиц цемента и других компонентов смеси. Практикой установлено, что область оптимальной электропроводности частиц для их электростатического осаждения имеет широкий интервал - от 10^3 до 10^9 Ом·м.

Ниже показано, что у всех такого рода материалов это сопротивление (в Ом·м) достаточно велико, что для процесса электростатического осаждения благоприятно:

Цементная пыль	-	10^7
Окись магния	-	10^8
Портландцемент	-	10^8
Шлаковый портландцемент	-	10^9

Частицы при осаждении образуют плотный слой материала с высоким электрическим сопротивлением, который накапливает электрические заряды и, тем самым, снижает напряженность результирующего поля в рабочем пространстве между распылителем и поверхностью. Это замедляет процесс осаждения новых частиц.

Таким образом, осаждение сухой бетонной смеси происходит до тех пор, пока проводимость слоя еще достаточна для стекания заряда на заземленное изделие. Электропроводность частиц возрастает при увеличении относительной влажности воздуха. Эта особенность характерна для большинства минеральных частиц и может быть использована для регулирования процессов осаждения.

Далее увлажняют осажденный слой сухой смеси тонкораспыленной водой с ПАВ. Процесс увлажнения - один из важных процессов новой технологии. Дело в том, что для экономии цемента содержание воды в бетонной смеси рекомендуют уменьшать до 12-20 % от массы вяжущего, то есть до теоретического предела. Это требование на практике чаще всего не выполняется, так как бетонная смесь с малым содержанием воды малоподвижна. Для удобства укладки бетона, водоцементное отношение (В/Ц) увеличивают до 0,45-0,6, вместо рекомендуемых по теории около 0,2. Избыток воды снижает прочность бетона. Для обеспечения нормативной прочности бетона избыток воды пытаются компенсировать увеличением расхода цемента. Если все же применяют малое В/Ц, то жесткость бетонной смеси уменьшают с помощью различных пластификаторов. Укладку жестких бетонных смесей проводят с использованием вибрирования и других методов.

В новой аддитивной технологии, впервые появилась возможность регулировать В/Ц в широких пределах, независимо от сложности формы изделия. Увлажнение сухой смеси происходит дозировано тонкораспыленной водой с размером капель не более 50 мкм. В воду можно добавлять различные присадки для изменения свойств получаемого армобетона. Например, кроме ПАВ, некоторые водорастворимые полимеры.

При смачивании сухой смеси тонкораспыленной водой, частицы цемента, минеральных добавок и волокна за счет капиллярного эффекта консолидируются, осажденный слой уплотняется. За счет наличия в бетонной смеси жидкой фазы, появляется хорошая проводимость. Ис-

ходя из конкретных условий, которые зависят от состава смеси, степени увлажнения, относительной влажности и температуры воздуха, определяют оптимальную циклограмму, по которой проводят осаждение сухой смеси, ее увлажнение и интервал времени для повторения циклов.

Операции осаждения смеси и увлажнения повторяют до получения армобетона нужной толщины. Для сплошных изделий осаждение проводят до закрытия всех отверстий в сетке основы. Далее процесс продолжают до выравнивания рельефа на поверхности изделия. В зависимости от назначения и конструкции изделия, тыльную сторону оставляют рельефной или электростатическим способом выравнивают. Или, если есть доступ к тыльной стороне, набирают нужную толщину бетона аккуратным торкретированием, при условии, что армобетон изделия уже набрал достаточную прочность.

Возвращаясь к орнаментальному шару, как составному элементу малой архитектуры, сетчатая основа которого делается на 3D принтере, заметим следующее. При проектировании шара и размера ячеек в сетке нужно учитывать толщину бетона, который будет покрывать сетку, чтобы отверстия в шаре остались нужного размера и смотрелись как элементы единого орнамента. В конце изготовления шар можно покрыть тонким слоем белого бетона. Кроме того, что белый бетон эстетичен, он обладает повышенной прочностью и водо- и морозостойкостью.

Обсуждение результатов. Технология электростатического формования другого изделия или сооружения, от рассмотренного выше, не имеет принципиальных отличий. Различие может быть в конструкции арматурно-сеточного каркаса, то есть формообразующей основы. Каркас может быть свободный или предварительно напряженный, с развитым оребрением или гладкий с местным усилением по периметру. Сетка может быть металлическая или углеродная, одинарная или двойная, многослойная с разным размером ячеек и т.д. Для некоторых сооружений с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями формообразующая сетка может быть льняной или из джута. Такая сетка не экранирует естественные электрическое и магнитное поля Земли.

Таким образом, видим, еще одно преимущество новой аддитивной технологии - полное отсутствие опалубки. Вместо опалубки достаточно иметь формообразующую основу, в виде арматурно-сеточного каркаса, который выполняет функцию арматуры вместе с волокнами, которые вносятся в бетон во время формирования изделия или сооружения.

Непринципиальное отличие от вышеописанной технологии может быть продиктовано различием в оборудовании. Для электроосаждения сухой смеси может быть использован ручной электростатический пистолет для сухих порошковых красок или стационарный распылитель или даже рампа с несколькими распылителями, размещенная на подвижной платформе или в захвате робота. Для дозированного увлажнения осажденной на основу смеси может быть применены распылители для воды среднего или низкого давления. Например, распылитель типа генератор «холодного или горячего тумана», камеры для термовлажностной обработки изделий.

При строительстве сооружения по новой аддитивной технологии сначала делают большую в плане заготовку из прочной сетки с местным усилением по периметру. Для чего используют мелкоструктурную стальную или углеродную сетку. Форма прочной напряженной и закрепленной сетки, определяет трехмерную геометрию сооружения. Например, в стиле немецкого архитектора Отто Фрая (Frei Otto) - одного из создателей так называемой «текстильной архитектуры» [10]. Это направление получило большое практическое развитие за рубежом в последнии 30 лет. Формообразующая силовая сеточная основа сооружения, покрытая фибробетоном, может содержать световые фонари соответствующей формы. Световые фонари из современного светопрозрачного материала - политетрафторэтилена, усиленного прочной сеткой из стекловолокна (PTFE Coated Glass Lattice) [11, 13]. Политетрафторэтилен (тефлон) обладает очень высокой светостойкостью и низкой адгезией к большинству материалов, поэтому он долго не загрязняется пылью.

Интересно электростатический метод формования испытать для изготовления тонкостенных корпусных деталей сложной формы из бетона, армированного различными способами.

Например, пространственных оболочек, архитектурно-строительных деталей, и сооружений, мембран, полых колонн и стоек, опор линий электропередач, мелиоративных желобов, водоотводных труб большого диаметра, резервуаров и др. [12, 14–20].

Вывод. Кроме двух уже известных, предложен третий вид аддитивной технологии для строителей: электростатический метод формования изделий и сооружений из армобетона. На формообразующую основу изделия, сделанного, например, из стальной или углеродной сетки, в электростатическом поле осаждают сухую смесь из цемента, тонкого песка и упрочняющих волокон. Затем этот слой дозировано увлажняют тонкораспыленной водой с различными добавками. Циклы осаждения смеси и увлажнения повторяют до получения нужной толщины армобетона. Электростатическое наращивание слоев бетона происходит без механического воздействия на формообразующую основу. Значит, основу изделия можно делать из небольшого количества материала за малое время и любым доступным способом.

Это одно из важных достоинств новой технологии. Первые же слои фибробетона после выдержки времени придают формообразующей основе прочность. По мере наращивания толщины бетона рост прочности изделия растёт, опережая рост массы.

В новой аддитивной технологии, впервые реализована возможность просто регулировать В/Ц в широких пределах, независимо от сложности формы изделия. Такая возможность существует независимо от наличия узких ребер жесткости на изделии из армобетона. Другое преимущество новой аддитивной технологии - полное отсутствие опалубки. Вместо нее достаточно иметь формообразующую основу, которая в большинстве случаев одновременно выполняет функцию арматуры вместе с волокнами. Волокна вносятся в бетон в процессе формирования изделия или сооружения. При отлаженном режиме и серийном изготовлении формообразующей основы, существует возможность полной автоматизации производства изделий методом электростатического формования.

Библиографический список:

1. Dominguez I., Romero L., Espinosa M., Dominguez M. 3D printing of models and prototypes in architecture and construction. Revista de la construccion. 2013. – Vol. 12. – pp. 41-55.
2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures / Matériaux et Constructions. 2016. – Vol. 49. – PP. 1213-1220.
3. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Электростатическое формование изделий из армированного бетона // Бетон и железобетон. – 1997. № 6. – С. 17-19.
4. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. 3D-принтер и электростатический фибробетон в архитектуре и строительстве // Вестник отделения строительных наук РААСН, Том 2. – 2019. – С. 548-554.
5. Кокоев М. Федоров В. Электростатический армированный бетон//Строительные материалы. 2004. – № 6. – С. 29-31.
6. 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. – № 3. – С. 48-52.
7. Salamanova M.Sh.**,** Murtazayev S-A. Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019;1:500-503. URL https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/ 125914231.
8. Salamanova M.Sh., Mintsaev M. Sh., Murtazaev S.-A. Yu., Saidumov M.S. Ecological Aspect of the Usage of Ahy and Slag Waste in the Chechen Republic // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” 177: 38-41. https://www.atlantis-press.com/ proceedings/isees-18/articles
9. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве. М.: Стройиздат. 1980. 415 с.
10. Леденев В.В., Худяков А.В. Оболочечные конструкции в строительстве. Теория, проектирование, конструкции, примеры расчета. Тамбов. Изд. «ТГТУ». 2016. 272 с.
11. ГОСТ 21509-76 от 1977-01-01 Лотки железобетонные оросительных систем. Технические условия.
12. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат. 1984. – 672 с.
13. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат. 1986. – 464 с.
14. Патент RU 2528332, МПК (2006.01) C04 B7, опуб. 10.09.2014. Интенсификаторы помола цементного клинкера.
15. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ// Успехи химии. 2006. – Т. 75. – № 3. – С. 203-216.
16. Гергель В.И., Цариченко С.Г., Поляков Д.В. Пожаротушение тонкораспыленной водой установками высокого давления оперативного применения // Пожарная безопасность. – 2006. – № 2. – С.125-131.
17. Адамсон А.В. Физическая химия поверхностей. М.: Мир. 1979. – 568 с.

18. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М.: Химия, 1983. – 263 с.
19. Moore F. G. Integration or segregation: How do molecules behave at oil/water interfaces / F. G. Moore, G. L. Richmondruen // Accounts of Chemical Researchruen. 2008. – Vol. 41, – № 6. – P. 739-748.
20. 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. Dominguez I., Romero L., Espinosa M., Dominguez M. 3D printing of models and prototypes in architecture and construction. *Revista de la construccion*. 2013; 12: 41-55.
2. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures* .Matériaux et Constructions. 2016; 49:1213-1220.
3. Kokoev M.N., Fedorov V.T. Electrostatic molding of products from reinforced concrete. *Concrete and reinforced concrete.* 1997; 6:17-19. (In Russ)
4. Fedorov V.T., Kokoev M.N. 3D printer and electrostatic fiber-reinforced concrete in architecture and construction. Bulletin of the Department of Building Sciences RAASN. 2019; 2: 548-554. (In Russ)
5. Kokoev M. Fedorov V. Electrostatic reinforced concrete. *Building materials*. 2004; 6: 29-31. (In Russ)
6. Nakhaev M.R. OTDV compositions for injection fixing of soils with 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)
7. Salamanova M.Sh., Murtazayev S-A. Yu., Alaskhanov A.Kh., Ismailova Z.Kh. Development of Multicomponent Binders Using Fine Powders. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019; 1:500-503. URL https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/ 125914231. (In Russ)
8. Salamanova M.Sh., Mintsaev M. Sh., Murtazaev S.-A. Yu., Saidumov M.S. Ecological Aspect of the Usage of Ahy and Slag Waste in the Chechen Republic. Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” 177: 38-41. https://www.atlantis-press.com/ proceedings/isees-18/articles (In Russ)
9. Venyua M. Cements and concretes in construction. Moscow: *Stroyizdat.* 1980: 415.(In Russ)
10. Ledenev V.V., Khudyakov A.V. Shell structures in construction. *Theory, design, constructions, calculation examples. Tambov.* Ed. "TGTU". 2016: 272. (In Russ)
11. GOST 21509-76 of 1977-01-01 Reinforced concrete trays for irrigation systems. Specifications. (In Russ)
12. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. Technology of concrete and reinforced concrete products. Moscow: *Stroyizdat.* 1984: 672. (In Russ)
13. Volzhensky A.V. Mineral binders. Moscow: Stroyizdat. 1986. – 464 p. (In Russ)
14. Patent RU 2528332, IPC (2006.01) C04 B7, publ. 09/10/2014. Cement clinker grinding intensifiers. (In Russ)
15. Boldyrev V.V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. *Uspekhi khimii.* 2006; 75(3): 203-216. (In Russ)
16. Gergel V.I., Tsarichenko S.G., Polyakov D.V. Fire extinguishing with finely sprayed water by high-pressure installations of operational use. *Fire safety*. 2006; 2:125-131. (In Russ)
17. Adamson A.V. Physical chemistry of surfaces. M.: *Mir.* 1979: 568. (In Russ)
18. Akselrud G.A., Altshuler M.A. Introduction to capillary-chemical technology. Moscow: *Chemistry.* 1983: 263. (In Russ)
19. Moore F. G. Integration or segregation: How do molecules behave at oil/water interfaces / F. G. Moore, G. L. Richmondruen. *Accounts of Chemical Researchruen*. 2008; 41(6): 739-748.
20. Deryagin B. V. On the definition of the concept and magnitude of the disjoining 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 30.05.2021.
Одобрена после рецензирования / Reviced 19.06.2022.
Принята в печать/ Accepted for publication 19.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.32
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176 Оригинальная статья / Original Paper

Свойства огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций

Т.А. Хежев[1], Г.Н. Хаджишалапов[2], Ф.М. Шогенова[1], А.Х. Артабаев[1], М.Х. Машукова[1]
[1] Кабардино-Балкарский государственный университет,
[1]360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского,173, Россия,
[2]Дагестанский государственный технический университет,
[2]367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка составов огнезащитных вермикулитобетонных композитов для армоцементных конструкций, а также исследование свойств огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций. **Метод.** Рассмотрены методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Исследования направлены на разработку огнезащитных композитов с использованием вспученного вермикулита и вулканического пепла. Для улучшения физико-механических свойств огнезащитного композита разработана смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, смолы древесной омыленной, вулканического пепла и вспученного вермикулита. Для исследования вермикулитобетонов, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатабельный план второго порядка типа правильного шестиугольника. **Результат.** Предложены фибровермикулитобетоны, обладающие повышенными огнезащитными свойствами по сравнению с известными составами. Это происходит из-за лучшей сохранности фибровермикулитобетонного слоя при нагреве в результате фибрового армирования. Благодаря добавке СДО (смола древесная омыленная), повышаются огнезащитные свойства композита из-за дополнительной поризации фибровермикулитобетона. Получены параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона. **Вывод.** Наилучшими огнезащитными свойствами обладают вермикулитобетоны со средней плотностью 480-560 кг/м^3. Разработанные двухслойные армоцементные конструкции имеют высокую огнестойкость.

Ключевые слова: портландцемент, вспученный вермикулит, пепел, гипс, известь, смола древесная омыленная, базальтовое волокно, мелкозернистый бетон, армоцемент, средняя плотность, предел прочности на сжатие и изгиб, стандартный пожар, огнестойкость

Для цитирования: Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, Ф.М. Шогенова, А.Х. Артабаев, М.Х. Машукова. Свойства огнезащитного вермикулитобетонного композита и мелкозернистого бетона для двухслойных армоцементных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 165-176. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176

Properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures

T.A. Khezhev[1], G.N. Khadzhishalapov[2], F.M. Shogenova[1], A.Kh. Artabaev[1], M.Kh. Mashukova[1]
[1]H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
[1]173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,
[2]Daghestan State Technical University,
[2]70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Development of compositions of fire-retardant vermiculite-concrete composites for reinforced cement structures. Investigation of the properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures. **Method.** Methods for increasing the fire resistance of reinforced concrete structures are considered. Research is focused on the development of fire-retardant composites using expanded vermiculite and volcanic ash. To improve the physical and mechanical properties of the fire-retardant composite, a mixture of Portland cement, gypsum, lime, basalt fiber, saponified wood resin, volcanic ash and expanded vermiculite has been developed. For the study of vermiculite concretes reinforced with basalt fiber, a second-order rotatable plan of the regular hexagon type was used. **Result.** Fiber-vermiculite concretes are proposed, which have improved fire-retardant properties compared to known compositions. This is due to the better preservation of the fiber-vermiculite-concrete layer when heated as a result of fiber reinforcement. Also, thanks to the addition of SDO, the fire-retardant properties of the composite increase due to the additional porosity of the fiber-vermiculite-concrete. The parameters of the "stress-strain" diagram of a vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete have been obtained. **Conclusion.** Vermiculite concretes with an average density of 480-560 kg/m3 have the best fire-retardant properties. The developed two-layer reinforced cement structures have high fire resistance.

Keywords: portland cement, expanded vermiculite, ash, gypsum, lime, saponified wood resin, basalt fiber, fine concrete, reinforced cement, medium density, compressive and flexural strength, standard fire, fire resistance.

For citation: T.A. Khezhev, G.N. Khadzhishalapov, F.M. Shogenova, A.Kh. Artabaev, M.Kh. Mashukova. Properties of fire-retardant vermiculite-concrete composite and fine-grained concrete for two-layer reinforced cement structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):165-176. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-165-176

Введение. Рост количества пожаров в нашей стране и за рубежом отмечается с каждым годом. Обрушение строительных конструкций является главной причиной гибели людей и ущерба от пожаров [1]. Это связано с тем, что в современном строительстве при возведении зданий и сооружений все шире используются тонкостенные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона.

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу возможности последующего использования элементов железобетонных конструкций, подвергшихся действию высоких температур в условиях пожара [2, 3]. Предпочтительными, в таких случаях, являются железобетонные конструкции, обладающие возможностью повторного использования, без существенного их усиления после ремонта.

Бетоны, в которых используется дисперсное армирование, широко применяются при производстве пространственных тонкостенных конструкций, в частности, армоцементных [4-6]. Использование в строительстве армоцементных пространственных конструкций позволяет уменьшить расход материалов на 25–45 %, затраты труда на их производство и монтаж – до 15 % и снизить стоимость при механизации работ до 20 %.

В сравнении с железобетонными конструкциями, армоцементные конструкции обладают такими достоинствами как: меньший расход бетона до 50 % и стали – до 20 %; повышенные трещиностойкость, плотность и, как следствие, водонепроницаемостью.

При очевидных преимуществах тонкостенных пространственных конструкций, применение их в строительстве недостаточно. Низкий предел огнестойкости является причиной, препятствующей широкому применению пространственных конструкций. В связи с тенденцией к снижению толщины сечения и повышению прочности материала конструкций при увеличении пролета зданий, их огнестойкость снижается.

Постановка задачи. Создание железобетонных конструкций повышенной огнестойкости может выполняться следующими способами (рис. 1) [4]. Исследования [7] показали, что существенно повысить огнестойкость армоцементных конструкций путем увеличения размеров

поперечного сечения конструкций и толщины защитного слоя бетона арматуры невозможно. При этом теряются преимущества тонкостенных армоцементных конструкций из-за значительного утяжеления.

Рис. 1. Пути повышения пределов огнестойкости тонкостенных железобетонных конструкций

Fig. 1. Ways to increase the fire resistance limits of thin-walled reinforced concrete structures

Повышение огнестойкости увеличением статической неопределимости конструкций является экономичным, но малоэффективным способом [8].

Защита бетона от взрывообразного разрушения является эффективным способом повышения огнестойкости железобетонных конструкций [9]. Это позволяет более полно использовать огнестойкость конструкций, а при нанесении теплоизолирующих покрытий существенно повысить их огнестойкость.

Для повышения огнестойкости покрытий и перекрытий рекомендуют устройство подвесных потолков [10]. Подвесные потолки одновременно могут выполнять декоративные и акустические функции, могут служить для размещения встроенных светильников и воздухораспределителей. Вместе с тем, устройство подвесных потолков связано с большими трудозатратами, увеличением стоимости строительства, а также снижает архитектурную выразительность интерьера здания. Для максимального уменьшения массы огнезащитного слоя целесообразно применение вспучивающегося покрытия [11]. Во время пожара покрытие вспучивается с образованием пористых слоев, имеющих низкую теплопроводность.

Недостатками вспучивающихся огнезащитных покрытий являются: высокая стоимость, низкая долговечность и надежность, низкая щелочестойкость, что важно при использовании для железобетонных конструкций. Поэтому их применение для огнезащиты железобетонных конструкций не представляется целесообразным. При этом получить тонкостенные железобетонные конструкции высокой огнестойкости не представляется возможным. Огнезащитные плиты и штукатурки на основе вспученного вермикулита и минеральных вяжущих относятся к наиболее эффективным средствам повышения предела огнестойкости строительных конструкций [10].

Таким образом, анализ возможных способов повышения огнестойкости тонкостенных железобетонных конструкций показал, что наиболее эффективным и экономичным является защита конструкций теплоизоляционными материалами на основе вспученного вермикулита, обеспечивающие высокую огнестойкость конструкции при незначительном утяжелении [4, 12]. Благодаря таким свойствам вермикулита, как высокий коэффициент звукопоглощения [13],

приятный цвет (золотистый или серебристый) огнезащитное покрытие наряду с основной функцией – огнезащиты – может значительно улучшить акустические, теплоизоляционные и декоративные характеристики армоцементных конструкций [14].

Ранее проведенные исследования показали, что для огнезащиты строительных конструкций эффективны вермикулитобетоны со средней плотностью 500 – 800 кг/м^3 составов (вяжущее: вермикулит) 1 : 2, 1 : 3 и 1 : 4 по объему [4, 15 - 17]. Дальнейшее уменьшение средней плотности не приводит к повышению огнезащитных свойств и не достигается требуемая прочность вермикулитобетона [4].

Многочисленными исследованиями выявлено, что вермикулитобетоны на цементных вяжущих обладают высокими огнезащитными и эксплуатационными свойствами, что позволяет использовать их в различных областях строительства [4, 15, 16, 18]. Недостатками этих составов являются высокий расход портландцемента, относительно высокий коэффициент теплопроводности при высоких температурах во время пожара.

Одним из материалов, являющихся эффективной заменой части портландцемента и заполнителя для огнезащитных составов, могут быть вулканические горные породы. Используемый заполнитель – вулканический пепел является гидравлически активной тонкомолотой добавкой, то есть вступает в реакцию гидратации с составляющими цемента. Поэтому сульфатные и щелочные активизаторы можно применять для усиления гидравлической активности вулканического пепла.

Методы исследования. Исследования были направлены на разработку огнезащитных композитов с использованием вспученного вермикулита и вулканического пепла.

В экспериментах использовались: пепел фракции 0-0,16 мм Заюковского месторождения; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,16-5 мм; Белгородский портландцемент ПЦ500-ДО; негашеная известь; гипс марки Г–4–II–А; воздухововлекающая добавка смола древесная омыленная (СДО), базальтовая фибра изготовления ОАО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с. Армоцемент армировали тканой сеткой № 8–07 (ГОСТ 3826–82) с размером ячейки 8×8 мм, диаметром проволоки 0,7 мм. При изготовлении конструкционного слоя применялся кварцевый песок с модулем крупности $2,2$, максимальной фракции $5,0$ мм. Состав мелкозернистой бетонной смеси – Ц : П = 1:2,5 с В/Ц = 0,4 ($R_{сж}$ =45 МПа, $R_{изг}$ = 5,3 МПа).

Приготовление смеси производили в бетономешалке принудительного действия, в которой в воду с СДО последовательно загружали сухую смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, вулканического пепла, затем – вспученного вермикулита, или предварительно перемешанную всухую смесь портландцемента, гипса, извести, базальтового волокна, вулканического пепла и вспученного вермикулита. Перемешивание всех компонентов продолжали до получения однородной огнезащитной фибровермикулитобетонной сырьевой смеси. Продолжительность перемешивания смеси составляла 1,5 – 2 мин.

Образцы размерами 4х4х16 см из вермикулитобетона уплотняли на стандартной виброплощадке. Подвижность смеси составляла 3-5 см по погружению конуса СтройЦНИЛ. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях. Перед испытанием балочки высушивались при t = 105 ^{o}С до постоянной массы в сушильном шкафу.

Использование вулканических горных пород может являться эффективной заменой части дорогостоящего вяжущего и вермикулита для огнезащитных бетонов. Вулканический пепел, являясь гидравлически активной тонкомолотой добавкой, способен вступать в реакцию гидратации с компонентами цемента.

Для повышения гидравлической активности вулканического пепла целесообразно использование активизаторов реакции (щелочных и сульфатных). В исследовании [19] показано, что в пенобетонах, с применением вулканических горных пород, можно заменить известью (50 %) и гипсом (2 %) цементное вяжущее. В связи с этим, в наших исследованиях для снижения

расхода цементного вяжущего в разрабатываемых огнезащитных бетонах активатором скрытой гидравлической активности вулканического пепла использовалась воздушная негашеная известь и строительный гипс. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость строительно-технических свойств вермикулитобетонов от соотношения компонентов в смеси

Table 1. The dependence of the construction and technical properties of vermiculite concrete on the ratio of components in the mixture

№ составов	Соотношение компонентов в смеси, % по массе					Количество СДО в % от массы вяжущего	Средняя плотность, кг/м³	Предел прочности, МПа	
	цемент	вермикулит	пепел	известь	гипс			на сжатие	на изгиб
1	71,9	29,1	–	–	–	–	750	6,2	2,7
2	50,3	29,1	21,4	–	–	–	762	5,9	2,5
3	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	–	750	6	2,4
4	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,1	720	6,2	2,6
5	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,2	710	6,15	2,5
6	22,5	28,3	25,8	22,5	0,9	0,3	710	6	2,4
7	62,1	37,9	–	–	–	–	595	2,9	1,6
8	43,5	37,9	18,4	–	–	–	600	2,7	1,5
9	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	–	590	2,8	1,4
10	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,1	570	2,9	1,35
11	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,2	560	2,8	1,3
12	19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,3	540	2,7	1,2
13	56,2	43,8	–	–	–	–	500	1,8	0,65
14	39,3	43,8	16,7	–	–	–	510	1,7	0,6
15	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	–	500	1,7	0,65
16	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,1	480	1,8	0,7
17	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,2	470	1,7	0,6
18	17,9	44,3	19,2	17,9	0,7	0,3	460	1,6	0,5

К недостаткам разработанных (табл. 1) вермикулитобетонов можно отнести хрупкость, относительно небольшие пределы прочности при сжатии и изгибе. Дисперсное фибровое армирование вермикулитобетонной матрицы может способствовать устранению указанных выше недостатков [20].

При исследовании вермикулитобетонов, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатабельный план второго порядка типа правильного шестиугольника [21, 22]. Состав и строительно-технические свойства исходной вермикулитобетонной матрицы показаны в табл. 2.

Таблица 2. Состав и строительно-технические свойства исходной вермикулитобетонной матрицы

Table 2. Composition and construction and technical properties of the original vermiculite concrete matrix

Соотношение компонетов в смеси The ratio of components in the mixture					Количестов СДО в % от массы вяжущего Number SDO % by weight of binder	Средняя плотность Average density	Предел прочности Tensile strength	
цемент cement	вермикулит vermiculite	пепел ash	известь lime	гипс gypsum			На сжатие For compres.	На изгиб For bending
19,6	38,1	21,9	19,6	0,8	0,1	570	2,8	1,4

В качестве варьируемых факторов выступали основные характеристики фибрового армирования:

X_1 – процент армирования по объему μ_v, %;

X_2 – отношение длины волокон к их диаметру l/d .

Параметрами оптимизации являлись прочностные характеристики композита, определяемые после 28 суток естественного твердения:

Y_1 – предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа;

Y_2 – предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа.

Матрица эксперимента с принятыми основными уровнями варьирования приведена в табл. 3.

Таблица 3. Матрица эксперимента
Table 3. Experiment Matrix

N/N	Натуральные переменные		Матрица эксперимента				
	x_1	x_2	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1*X_2
1	0,3	1444	-1	0	1	0	0
2	0,9	1444	+1	0	-1	0	0
3	0,75	2221	+0,5	+0,87	+0,25	+0,75	+0,43
4	0,75	667	+0,5	-0,87	+0,25	+0,75	-0,43
5	0,45	2221	-0,5	+0,87	+0,25	+0,75	-0,43
6	0,45	667	-0,5	-0,87	+0,25	+0,75	+0,43
7	0,6	1444	0	0	0	0	0

В табл. 4 и 5 представлены результаты испытаний образцов на сжатие и изгиб и их статистической обработки.

Таблица 4. Экспериментальные данные результатов испытаний образцов на сжатие
Table 4. Experimental data of the results of tests of specimens for compression

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1, МПа						Среднее значение Y_1, МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6			
1	3,6	3,55	3,48	3,65	3,7	3,62	3,6	0,01	0,02
2	3,15	3,25	3,2	3,1	3,3	3,4	3,23	0,01	0,03
3	2,9	2,7	2,7	2,8	2,55	2,85	2,75	0,02	0,05
4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,55	2,75	2,62	0,02	0,06
5	3,15	3,05	2,9	2,95	3,2	2,8	3,01	0,02	0,05
6	3,2	3,2	3,1	3,15	3,17	2,95	3,13	0,01	0,03
7	3,55	3,7	3,75	3,6	3,57	3,6	3,63	0,01	0,02

Таблица 5. Экспериментальные данные результатов испытаний образцов на изгиб
Table 5. Experimental data of the results of testing specimens for bending

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1, МПа						Среднее значение Y_2, МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6			
1	1,6	1,7	1,45	1,4	1,5	1,48	1,52	0,01	0,07
2	2,6	2,7	2,5	2,45	2,4	2,55	2,53	0,01	0,04
3	1,8	1,95	1,99	1,65	1,75	1,9	1,84	0,02	0,07
4	1,92	1,8	1,75	1,7	1,8	1,82	1,8	0,01	0,04
5	2	2,05	1,9	2,15	2,2	2,25	2,09	0,02	0,06
6	1,97	2,2	2,3	2,3	2	1,95	2,12	0,03	0,08
7	2,6	2,58	2,75	2,85	2,5	2,4	2,61	0,03	0,06

Уравнения регрессии композита в кодированном виде получены по результатам экспериментальных исследований вермикулитобетона, армированных базальтовыми фибрами:

$$Y_1 = 3{,}6 - 0{,}2X_1 - 0{,}3X_1^2 - 0{,}9X_2^2 + 0{,}12X_1X_2;$$

$$Y_2 = 2{,}6 + 0{,}2X_1 - 0{,}65X_1^2 - 0{,}65X_2^2.$$

Поверхности отклика построены по уравнениям регрессии (рис. 2).

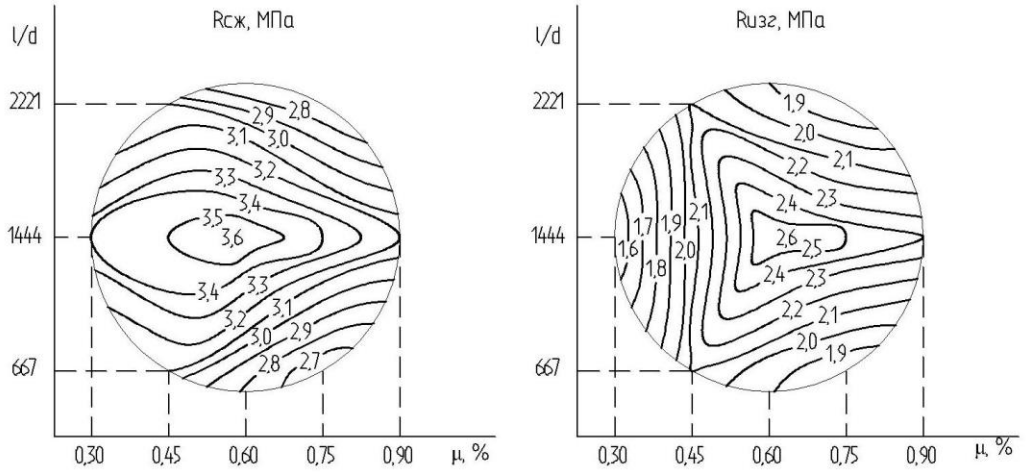


Рис. 2. Поверхности отклика: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа; $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; l/d – отношение длины волокон к их диаметру; μ − процент армирования по объему

Fig. 2. Response surfaces: R_b – compressive strength, MPa; R_f – ultimate strength in bending, MPa; is the ratio of fiber length to their diameter; l/d − percentage of reinforcement by volume; μ − percentage of reinforcement by volume

В ходе исследования выявлено, что при проценте армирования по объему $\mu_v \approx 0{,}35 - 0{,}65\,\%$ и отношении длины волокон к их диаметру $l/d = 1444$ фибровермикулитобетон имеет максимальную прочность на сжатие, а на изгиб – при значениях $\mu_v \approx 0{,}6 - 0.85\,\%$ и $l/d = 1444$.

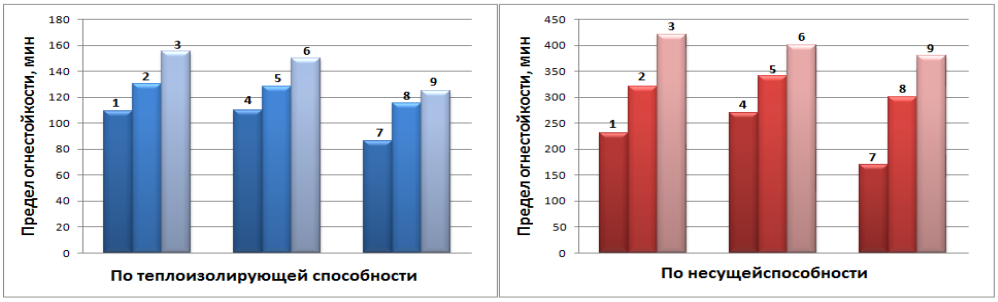
Дальнейшее повышение процента фибрового армирования бетонной матрицы ведет к снижению прочности фибровермикулитобетона на сжатие и изгиб, что объясняется ухудшением их структуры. Таким образом, фибровое армирование вермикулитобетонной матрицы увеличивает предел прочности композита на изгиб от 55 до 75 % (рис. 2).

Проведены исследования огнезащитных свай, разработанных огнезащитных композитов. Испытания профессора Хежева Т.А. [4] на огнестойкость двухслойных армоцементных плит размером 62,5х50 см в огневой печи и образцов размером 19х19 см в электрической печи в горизонтальном положении по «стандартному» температурному режиму пожара показали расхождение результатов менее 5 %.

Поэтому испытания по определению огнестойкости двухслойных армоцементных элементов проводились нами на образцах 19х19 см в горизонтальном положении на электрической муфельной печи по температурному режиму «стандартного» пожара, в соответствии с ГОСТ 30247.1–94. За наступление предела огнестойкости по несущей способности (*R*) образцов условно принимали момент достижения тканой сеткой, расположенной в армоцементном слое, температуры 300 °С. В соответствии с ГОСТ 30247.1–94, за наступление предела огнестойкости по теплоизолирующей способности (*I*) образцов принимали момент повышения температуры на необогреваемой поверхности образца в среднем более чем на 140 °С в сравнении с температурой образца до испытания.

В момент испытания влажность мелкозернистого бетона была 3–4 %, а для вермикулитобетона – 8–10 %. Нарушение целостности двухслойных армоцементных образцов при прове-

дении испытаний на огнестойкость не наблюдалось. Результаты натурных испытаний двухслойных армоцементных образцов (толщина слоя мелкозернистого бетона – 20 мм, вермикулитобетона – 25 мм) на огнестойкость приведены на рис. 3.



а) б)

Рис. 3. Влияние состава огнезащитного слоя на предел огнестойкости двухслойных армоцементных образцов по признаку потери теплоизолирующей способности (а) и несущей способности (б): 1, 4, 7 – цементный вермикулитобетон (500, 595, 740); 2, 5, 8 – вермикулитобетонный композит (480, 570, 730); 3, 6, 9 – фибровермикулитобетонный композит (470, 560, 720)

Fig. 3. The influence of the composition of the fire-retardant layer on the fire resistance limit of two-layer reinforced cement samples on the basis of the loss of heat-insulating ability (a) and bearing capacity (b): 1, 4, 7 – cement vermiculite concrete (500, 595, 740); 2, 5, 8 – vermiculite concrete composite (480, 570, 730); 3, 6, 9 – fiber vermiculite concrete composite (470, 560, 720)

Исходя из результатов экспериментов, предложенные фибровермикулитобетоны обладают лучшими огнезащитные свойства по сравнению с другими составами. Это происходит из-за лучшей сохранности фибровермикулитобетонного слоя при нагреве в результате фибрового армирования. Также благодаря добавке СДО, происходит повышение огнезащитных свойств из-за дополнительной поризации фибровермикулитобетона.

Наилучшие огнезащитные свойства выявлены у вермикулитобетонов со средней плотностью 480-560 кг/м^3. Для расчета огнестойкости двухслойных армоцементных конструкций необходимо знать деформационные характеристики вермикулитобетона и мелкозернистого бетона при высоких температурах.

На рис.4 представлена диаграмма «напряжения-деформации» вермикулитобетона для огнезащитного слоя после твердения в нормальных условиях и после кратковременного нагрева до 800 °С.

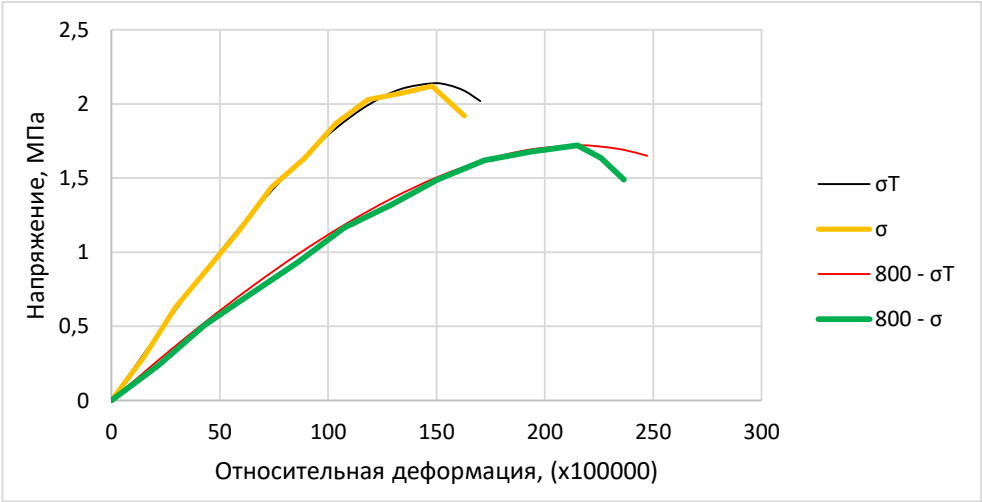


Рис. 4. Диаграмма «напряжения-деформации» вермикулитобетона σТ – по формуле Сарджина; 800 – после кратковременного нагрева до 800°С

Fig. 4. Diagram of "stress-strain" of vermiculite concrete σТ - according to Sargin's formula; 800 - after short-term heating up to 800°С

В табл.6 приведены параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетона.

Таблица 6. Параметры диаграммы «напряжения-деформации» вермикулитобетона
Table 6. Parameters of the "stress-strain" diagram of vermiculite concrete

Напряжение, Stress МПа	Относительная деформация, Relative deformation x100000	E_0, МПа	ε_R, x100000	λ_R	k
Условия твердения - нормальные Hardening conditions - normal					
0	0	2120	149	0,676	1,48
0,29	14,8				
0,63	29,6				
0,89	44,4				
1,15	59,2				
1,44	74				
1,63	88,8				
1,87	103,6				
2,03	118,4				
2,07	133,2				
2,12	148				
2,02	155,4				
1,92	162,8				
После кратковременного нагрева до 800°C After short heating up to 300°C					
0	0	1185	215	0,622	1,608
0,235	21,5				
0,51	43				
0,721	64,5				
0,932	86				
1,166	107,5				
1,32	129				
1,49	150,5				
1,62	172				
1,677	193,5				
1,72	215				
1,636	225,75				
1,49	236,5				
	247,25				

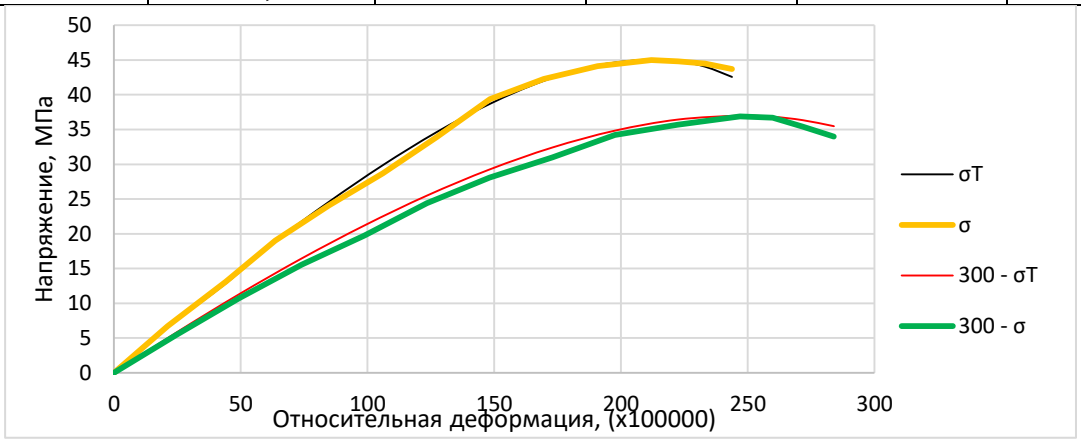


Рис. 5. Диаграмма «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона σT – по формуле Сарджина; 300 – после кратковременного нагрева до 300°C
Fig. 5. Diagram of "stress-strain" of fine-grained concrete σT - according to Sargin's formula; 300 - after short-term heating up to 300°C

На рис.5 представлена диаграмма «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона для несущего слоя после твердения в нормальных условиях и после кратковременного нагрева до 300°С.

В табл. 7 приведены параметры диаграммы «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона.

Таблица 7. Параметры диаграммы «напряжения-деформации» мелкозернистого бетона
Table 7. Parameters of the "stress-strain" diagram of fine-grained concrete

Напряжение, МПа Stress	Относительная деформация, Relative deformation x100000	E_0, МПа	ε_R, x100000	λ_R	k
Условия твердения - нормальные Hardening conditions - normal					
0	0	29450	212	0,725	1,38
6,7	21,2				
13,1	44,2				
19	63,6				
24,1	84,8				
28,7	106				
33,9	127,2				
39,4	148,4				
42,3	169,6				
44,1	190,8				
45	212				
44,8	222,6				
44,5	233,2				
После кратковременного нагрева до 300°С After short heating up to 300°С					
0	0	21710	223	0,764	1,308
5,49	24,7				
10,74	49,4				
15,58	74,1				
19,76	98,8				
24,4	123,5				
28,1	148,2				
31	172,9				
34,2	197,6				
35,7	222,3				
36,9	247				
36,7	259,8				
35,4	271,7				
34	284				

Вывод. Разработаны эффективные фиброармированные огнезащитные композиты с применением вспученного вермикулита и вулканического пепла.

Фибровермикулитобетонные композиты со средней плотностью 480-560 к/м^3 имеют более высокие огнезащитные свойства.

Диаграммы «напряжения-деформации» характеризуются параметрами: огнезащитного вермикулитобетона до нагрева: R_{bn} = 2,1, E_o = 2120, ε_R = 0,00149, λ_R = 0,676, k = 1,48, после кратковременного нагрева до 800 °С: R_{bn} = 1,7, E_o = 1185, ε_R = 0,00215, λ_R = 0,622, k = 1,608; мелкозернистого бетона до нагрева: R_{bn} = 45,1, E_o = 29450, ε_R = 0,00212, λ_R = 0,725, k = 1,38, по-

сле кратковременного нагрева до 300 °С: R_{bn} = 36,9, E_o = 21710, ε_R = 0,00223, λ_R = 0,764, k = 1,308, и удовлетворительно описываются формулой Сарджина.

Библиографический список:

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М.: Стройиздат. 1986. 225 с.
2. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат. 1979. 128 с.
3. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара. М.: 2005. 122 с.
4. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс. … д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2007. 304 с.
5. Лысенко Е.Ф. Армоцементные конструкции. Киев: Вища школа. 1981. 191 с.
6. Митрофанов Е.Н. Армоцемент. Л.: 1973. 208 с.
7. Панарин С.Н., Хежев Т.А., Сомов В.И. Огнестойкость армоцемента с огнезащитным слоем на основе вспученного вермикулита // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций: материалы семинара МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского. М.: 1982. С. 98–101.
8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат. 1888. 142 с.
9. Некрасов К.Д. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. М.: Стройиздат. 1981. 21 с.
10. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин А.М. Огнезащита строительных конструкций. М.: ТИМР. 2000. 433 с.
11. Ахтямов Р.Я. «Вермивол» – новое огнезащитное покрытие на основе вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2002. № 6. С. 6–7.
12. Панарин С.Н. Армоцементные конструкции повышенной огнестойкости: наглядное пособие. Л.: ЛДНТП. 1982. 23 с.
13. Дубенецкий К. Н., Пожнин А.П. Вермикулит. Л. : Стройиздат. 1971. 175 с.
14. Гедеонов П.П., Спирина В.С. Цементно-вермикулитовые штукатурные растворы для жилых и общественных зданий // Строительные материалы на основе вермикулита, шлаков и зол: сб. трудов УралНИИСтромпроект. Челябинск. 1975. С. 24 – 30.
15. Руководство по выполнению огнезащитных и теплоизоляционных штукатурок механизированным способом. М.: Стройиздат. 1977. 46 с.
16. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. М.: Стройиздат. 1975. 15 с.
17. Тихонов Ю.М. Аэрированные легкие и тепло-огнезащитные бетоны и растворы с применением вспученного вермикулита и перлита и изделия на их основе: автореф. дисс. … д-ра техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. 2005. 40 с.
18. Дубенецкий К.Н., Тихонов Ю.М. Новый изоляционный материал // Пожарное дело. 1967. № 6. С. 30–31.
19. Хашукаев М.Н. Технология и свойства ячеистых фибробетонов на основе вулканических горных пород: дисс… к.т.н. СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. 2002. 127 с.
20. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / 3-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ. 2004. 560 с.
21. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука. 1965. 340 с.
22. Крыжановский И.И., Свидерская О.И. Методика планирования эксперимента при решении типовой задачи о выборе химических добавок к бетону // Математические методы в исследованиях технологии бетона: тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Вып. 5. Харьков. 1971. С. 102–114.

References:

1. Milovanov A.F. Fire resistance of reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat. 1986. 225 p. (In Russ).
2. Ilyin N.A. Consequences of fire impact on reinforced concrete structures. Moscow: *Stroyizdat.* 1979:128. (In Russ).
3. Milovanov A.F. Fire safety of reinforced concrete structures after a fire. M.: 2005: 122. (In Russ).
4. Khezev T.A. Technology of reinforced cement structures of high fire resistance with a heat-shielding layer of efficient lightweight concrete: diss. … Dr. tech. Sciences. Rostov-on-Don. 2007: 304. (In Russ).
5. Lysenko E.F. Armored structures. Kyiv: *Vishcha school*. 1981: 191.
6. Mitrofanov E.N. Armocement. L.: 1973: 208. (In Russ).
7. Panarin S.N., Khezhev T.A., Somov V.I. Fire resistance of reinforced cement with a fire-retardant layer based on expanded vermiculite. F. E. Dzerzhinsky. M.: 1982; 98–101. (In Russ).
8. Yakovlev A.I. Calculation of fire resistance of building structures. Moscow: *Stroyizdat*. 1888: 142. (In Russ).
9. Nekrasov K.D. Recommendations for the protection of concrete and reinforced concrete structures from brittle fracture in a fire. Moscow: *Stroyizdat.* 1981: 21. (In Russ).
10. Strakhov V.L., Krutov A.M., Davydkin A.M. Fire protection of building structures. M.: *TIMR*. 2000: 433 (In Russ).\
11. Akhtyamov R.Ya. "Vermivol" - a new fire-retardant coating based on expanded vermiculite. *Construction materials.* 2002; 6: 6–7. (In Russ).
12. Panarin S.N. Reinforced cement structures of increased fire resistance: a visual aid. L.: *LDNTP*. 1982:23 (In Russ).
13. Dubenetsky K.N., Pozhnin A.P. Vermiculite. L.: *Stroyizdat*. 1971: 175. (In Russ).

14. Gedeonov P.P., Spirina V.S. Cement-vermiculite plaster mortars for residential and public buildings. *Building materials based on vermiculite, slags and ashes: coll. Proceedings of UralNIIStromproekt.* Chelyabinsk. 1975: 24 - 30. (In Russ).
15. Guidelines for the implementation of fire-retardant and heat-insulating plasters in a mechanized way. Moscow: *Stroyizdat.* 1977: 46. (In Russ).
16. Guidelines for the composition and use of heat-insulating and fire-resistant perlite plasters. Moscow: *Stroyizdat*. 1975:. 15. (In Russ).
17. Tikhonov Yu.M. Aerated lightweight and heat-fire-retardant concretes and mortars using expanded vermiculite and perlite and products based on them: author. diss. … Dr. tech. Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect.-builds. un-t. 2005. 40 p. (In Russ).
18. Dubenetsky K.N., Tikhonov Yu.M. New insulating material *Fire business.* 1967; 6: 30–31. (In Russ).
19. Khashukaev M.N. Technology and properties of cellular fiber-reinforced concrete based on volcanic rocks: diss. Ph.D. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect.-builds. un-t. 2002. 127 p. (In Russ).
20. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction: monograph / 3rd ed., revised. and additional M.: ASV. 2004; 560. (In Russ).
21. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods for planning extreme experiments. M.: *Science*. 1965: 340 (In Russ).
22. Kryzhanovsky I.I., Sviderskaya O.I. Experiment planning technique for solving a typical problem on the choice of chemical additives to concrete. Mathematical methods in research of concrete technology: tr. All-Union. scientific research in-ta water supply, sewerage, hydraulic engineering. facilities and engineer. hydrogeology. Issue. 5. Kharkov. 1971: 102–114.

Сведения об авторах:

Хежев Толя Амирович, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и дизайна, заведующий кафедрой строительного производства; hejev_tolya@mail.ru

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; yarus-x@mail.ru

Шогенова Фатима Мухамедовна, аспирант кафедры строительного производства; shogenova-1982@mail.ru

Артабаев Адам Хатуевич, аспирант кафедры строительного производства; adam.artabaev@gmail.com

Машукова Марита Хамидовна, аспирант кафедры строительного производства; mashukovamarita@yandex.ru

Information about the authors:

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

Fatima M. Shogenova, Postgraduate Studen, Department of Building production; shogenova-1982@mail.ru

Adam Kh. Artabaev, Postgraduate Student, Department of Building production; adam.artabaev@gmail.com

Marita Kh. Mashukova, Postgraduate Student, Department of Building production; mashukovamarita@yandex.ru

Конфликт интересов. Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 24.05.2021.

Одобрена после рецензирования / Reviced 10.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.06.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011
DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-177-184 Оригинальная статья/Original Paper

Влияние пролета на работу большепролетных конструкций

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров
Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение влияния пролета на работу большепролетных конструкций; рассматриваются и анализируются особенности работы большепролетных покрытий, которые широко применяются при проектировании и возведении современных зданий и сооружений. **Метод.** Приводятся конструкции и конструктивные приемы, которые позволяют проектировать здания и сооружения большого пролета. Рассматриваются примеры расчета большепролетной рамы, выполняются соответствующие чертежи, приводятся узлы и другие подробности, которые могут служить наглядным пособием при проектировании соответствующих зданий и сооружений. Рассматриваются большепролетные балочные фермы и рамные системы. **Результат.** Предложены и апробированы основные способы уменьшения большепролетных изгибающих моментов, а также конструктивные приемы, которые позволяют уменьшить пролетные перемещения. **Вывод.** Разработанные конструктивные схемы рам и ферм обеспечивают минимальные затраты металла, а также позволяют определить влияние параметров и геометрии рам и ферм на расход металла.

Ключевые слова: большепролётные конструкции, прогибы, изгибающий момент, конструктивные приёмы, компоновка, рамы, фермы

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров. Влияние пролета на работу большепролетных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (2):177-184. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-177-184

Influence of the span on the operation of large-span structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, H.M. Gapparov
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the effect of a span on the operation of large-span structures; the features of the work of large-span coatings, which are widely used in the design and construction of modern buildings and structures, are considered and analyzed. **Method.** Designs and design techniques are given that allow designing buildings and structures with a large span. Examples of the calculation of a large-span frame are considered, the corresponding drawings are made, nodes and other details are given that can serve as a visual aid in the design of the relevant buildings and structures. Large-span beam trusses and frame systems are considered. **Result.** The main methods for reducing long-span bending moments, as well as design techniques that reduce span displacements, are proposed and tested. **Conclusion.** The developed design schemes of frames and trusses provide minimal metal costs, and also allow determining the influence of the parameters and geometry of frames and trusses on metal consumption.

Keywords: large-span structures, deflections, bending moment, design techniques, layout, frames, trusses

For citation: A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, H.M. Gapparov. Influence of the span on the operation of large-span structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2): 177-184. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-177-184.

Введение. В связи с ростом численности населения земного шара появляется острая необходимость в строительстве большепролетных зданий и сооружений. Проектирование большепролетных покрытий связанно с решением многих сложных технических и технологических задач. Здесь возникают проблемы чисто конструктивные, технологические, экономические. Однако с появлением легких материалов и конструкций, и развитием теории зданий и сооружений, а также с накоплением опыта проектирования и возведения большепролетных конструкций, появились новые возможности, которые открыли совершенно эффективные, раньше не применяемые, конструкции и конструктивные формы.

Постановка задачи. В статье излагаются основные особенности работы большепролетных покрытий [1-4,8,12], проведен анализ влияния больших пролетов на развитие перемещений покрытия и возникновения чрезвычайно-больших изгибающих моментов в пролетных строениях несущих конструкций. Излагаются конструктивные приёмы, которые позволяют уменьшить пролетные моменты а также стабилизировать перемещения. На отдельных примерах поясняются основные идеи, которые закладываются в основу расчета и конструирования.

Методы исследования. На покрытие большепролетного здания действуют различные нагрузки: собственный вес, снеговые и ветровые нагрузки, технологические воздействия, неравномерные осадки фундаментов, сейсмические воздействия, температурные перепады и т.д.

Однако основной нагрузкой для большепролетных покрытий является собственный вес самого покрытия. В большинстве случаев собственный вес покрытия меняется по пролету практически равномерно. Поэтому в расчетах собственный вес часто принимается как постоянная нагрузка по пролёту. Рассмотрим балочную конструкцию, приведенную на рис.1

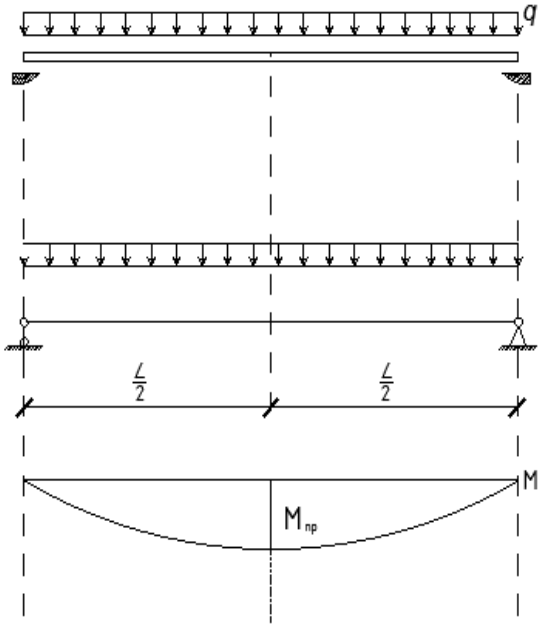


Рис. 1. Расчётная схема и изгибающие моменты балочной конструкции
Fig. 1. Calculation scheme and bending moments of the beam structure

Пролетные изгибающие моменты $\mathrm{M_{пр}}$ с увеличением пролета начинают расти по квадратной параболе. Как известно пролетные изгибающие моменты вычисляются по формуле:

$$\mathrm{M_{пр}} = \frac{q}{8} \cdot L^2, \qquad (1)$$

где, q – расчетная погонная нагрузка на балочную конструкцию.

Далее приведем в табл.1. значения квадратных и кубических парабол, на основании которых построена квадратная парабола, представленная на рис.2.

Таблица 1. Значения квадратных и кубических парабол
Table 1. Values of square and cubic parabolas

L (м)	L^2	L^3
18	324	5833
36	1296	46656
54	2916	157464
72	5184	373248
90	8100	729000
108	11664	1 259712

Из рис.2 и формулы (1) видно, как быстро возрастают пролетные изгибающие моменты $M_{пр}$ с увеличением пролета L.

Увеличение пролетного изгибающего момента $M_{пр}$ в зависимости от L по квадратной параболе представляет собой первую особенность работы большепролетных конструкций (покрытий).

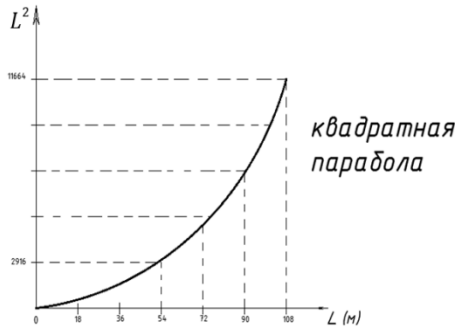


Рис. 2. Квадратная парабола
Fig. 2. Square parabola

По первой группе предельных состояний условие прочности изгибаемого элемента определяется по формуле

$$\sigma = \frac{M^{р}}{W} \leq \gamma R, \qquad (2)$$

или с учетом того, что можно принять приближенно $\gamma = 1$ и с учетом формулы (1) можно записать

$$\frac{q}{8WR} L^2 \leq 1\,. \qquad (3)$$

Из этого условия (формула 3) видно, что величина пролета покрытия L существенно влияет на условие прочности несущей конструкции покрытия.

Далее рассмотрим влияние пролёта на перемещения. На рис. 3 показаны пунктирной линией прогибы балочной конструкции под воздействием нормативной погонной нагрузки $q^{н}$ [9].

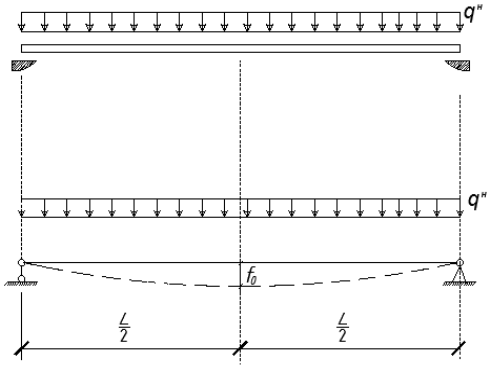


Рис. 3. Расчётная схема и перемещения балочной конструкции
Fig. 3. Calculation scheme and displacements of the beam structure

Как известно, прогиб в середине пролета балочной конструкции определяется по формуле:

$$f_0 = A \cdot \frac{q^{н} \cdot L^4}{E \cdot \mathfrak{I}}, \quad (4)$$

где $E, \mathfrak{I}$ – модуль упругости конструкционного материала и момент инерции сечения балочной конструкции соответственно,

А – коэффициент, зависящий от условия крепления концов балки на опорах.

Для случая шарнирного опирания (рис. 3) $A = \frac{5}{384}$.

По второй группе предельных состояний прогибы доложены отвечать условию

$$f_0 \leq \frac{L}{n_0}, \quad (5)$$

где n_0 – относительный прогиб, нормируемая по условиям эксплуатации величина [7,10,11]; $n_0 = 80, 100, 120, 150, 200, 250, 300, 400, 500$ – в зависимости от условий эксплуатации, по СП.

Формулу (5) с учетом выражения (4) можно представить следующим образом:

$$A \cdot \frac{n_0 . q^{н}}{E \cdot \mathfrak{I}} \cdot L^3 \leq 1. \quad (6)$$

Из последнего неравенства видно, что требования условий эксплуатации по второй группе предельных состояний существенно зависят от величины пролета покрытия.

Здесь парабола не квадратная как в случае формулы (3), а парабола – кубическая!

Ниже приводится график кубической параболы, построенный по данным табл.1.

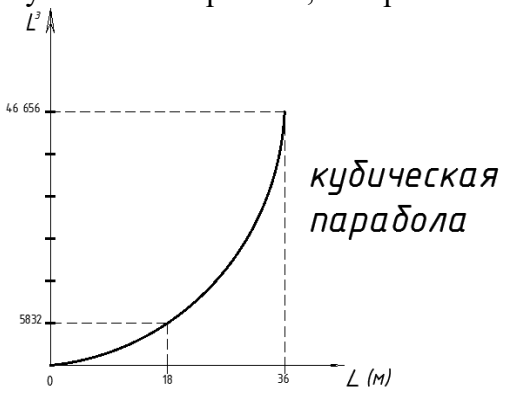


Рис. 4. Кубическая парабола
Fig. 4. Cubic parabola

Итак, мы рассмотрели две особенности работы большепролетной конструкции (покрытия):

1. Изгибающие моменты в несущей конструкции растут по квадратной параболе в зависимости от пролета L;
2. Перемещения (прогибы) растут по параболе 4-го порядка (формула 4).

В соответствии с этими двумя особенностями работы большепролетной конструкции необходимо удовлетворять двум условиям:

по первой группе предельных состояний

$$\frac{q}{8\,WR} L^2 \leq 1\,; \quad (7)$$

по второй группе предельных состояний

$$A \cdot \frac{n_0 . q^{н}}{E \cdot \mathfrak{I}} \cdot L^3 \leq 1. \quad (8)$$

При проектировании большепролетных покрытий, так, или иначе, приходиться обеспечивать выполнение приведенных выше двух условий (7, 8) .

Обсуждение результатов. Из опыта проектирования большепролетных конструкций следует [6, 7], что инженер-проектировщик располагает достаточно эффективными конструк-

тивными приемами, которые позволяют уменьшить пролетные изгибающие моменты и прогибы в несущих конструкциях.

Ниже мы приводим небольшой перечень часто применяемых конструктивных приемов:

1. Несущие конструкции пролетного строения покрытия должны соответствовать эпюрам изгибающих моментов, поперечных сил и нормальных усилий. Другими словами, несущие конструкции покрытия должны иметь переменные сечения по пролету;
2. С целью уменьшения пролетных прогибов, а также повешения несушей способности конструкции, при соблюдении условий уменьшения собственного веса покрытия, необходимо проектировать решётчатые (сквозные) несущие конструкции;
3. Для повышения прочности отдельных участков несущих конструкций, чтобы особо не увеличивать собственный вес, применяются бистальные конструкции (в более загруженных участках конструкции применяется сталь повышенной прочности);
4. С целью уменьшения собственного веса покрытия [5] рационально применять легкие и более прочные конструкционные материалы и изделия (алюминиевые сплавы, стали повышенной прочности, высокопрочная арматура, клееная древесина, керамзитобетон, ячеистые бетоны, пенобетон, многослойные плиты, эффективные минеральные утеплители и т.д.);
5. Для повышения несущей способности большепролетной конструкции применяется предварительное напряжение с использованием высокопрочных канатов, высокопрочной арматуры, высокопрочной полосовой стали;
6. Для уменьшения пролетных изгибающих моментов опоры рамных конструкций выполняются с некоторым эксцентриситетом, что вызывает обратные изгибающие моменты в середине пролета;
7. С этой же целью в трёх пролётных зданиях предусматриваются противовесы, которые также вызывают обратные изгибающие моменты в середине основного пролета;
8. Для уменьшения пролетных изгибающих моментов большепролетные конструкции выполняются выпуклыми, что вызывает появление распора в местах опирания рам. От этих распоров возникает также изгибающие моменты обратного знака в середине пролета;
9. При значительных пролетах покрытия несущие конструкции проектируют так, чтобы они работали на растяжение и сдвиг, тем самым исключалось сжатие. Это обеспечивает устойчивость покрытия и позволяет перекрывать очень большие пролеты.

На рис. 5 приводится схема предварительного напряжения большепролетной рамы. Такой конструктивный прием уменьшает пролетные прогибы и повышает несущую способность рамы.

На уровне пола располагается приямок, в котором находится домкрат преднапряжения, с динамометром, показывающим величину усилия предварительного напряжения. С помощью этого домкрата регулируется уровень предварительного перенапряжения кабеля.

Такой конструктивный прием создает обратный пролетный изгибающий момент, который складываясь с моментом от собственного веса покрытия, уменьшает пролетный изгибающий момент.

На рис. 6 дается конструктивная схема трёхпролетного здания, где использован конструктивный прием противовесов, которые вызывают обратный изгибающий момент в главном пролете. Пролетный изгибающий момент $\overline{M}$ уменьшается на величину М*.

На рис. 7 приведена конструктивная схема большепролетной рамы, в качестве ригеля которого используется шпренгельная предварительно напряженная ферма. Этот конструктивный прием повышает несущую способность ригеля, а также уменьшает пролетные прогибы.

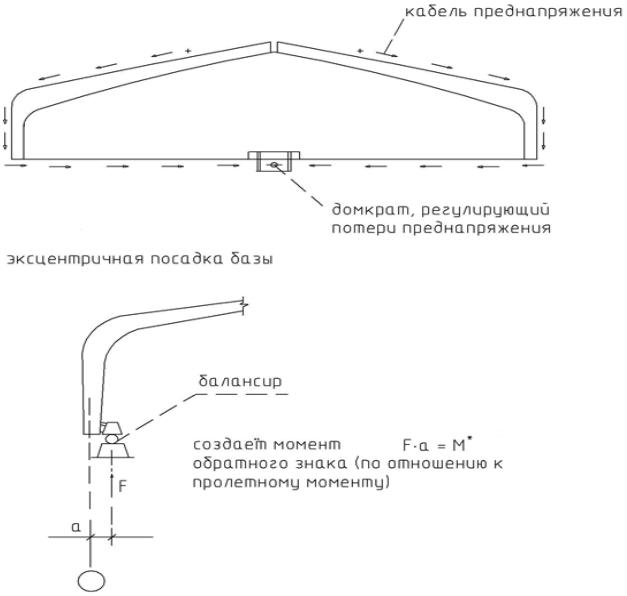


Рис. 5. Схема эксцентричной посадки колоны рамы на опору
Fig. 5. Scheme of eccentric landing of the frame column on the support

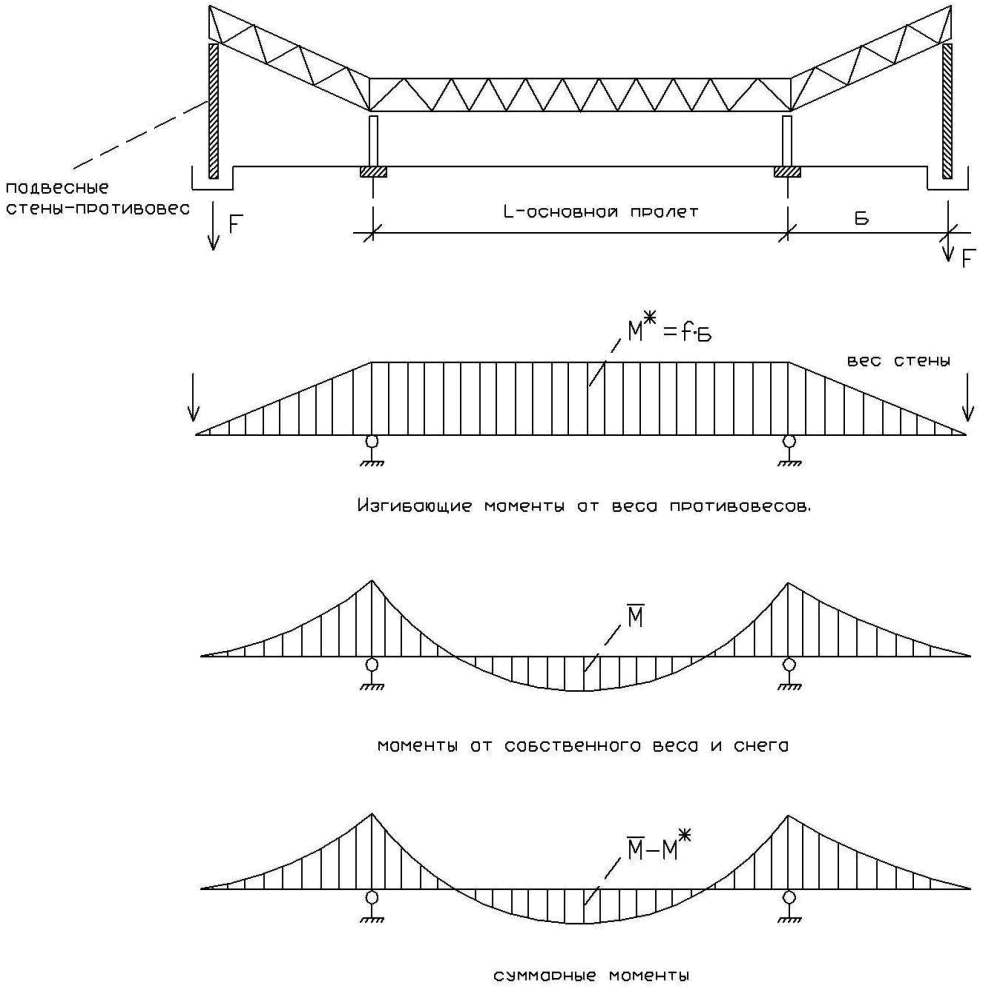


Рис. 6.Трёхпролётная рама с противовесами
Fig. 6. Three-span frame with counterweights

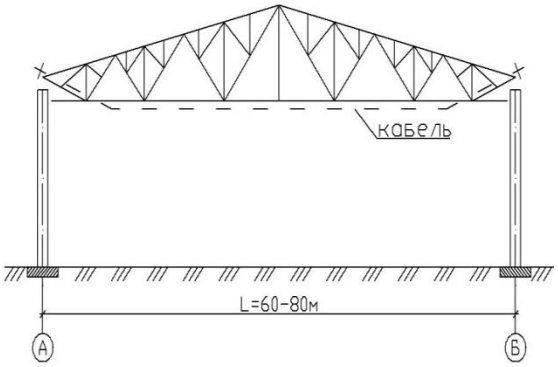


Рис. 7. Схема преднапряжения шпренгельной фермы
Fig. 7. Scheme of the prestressing of the truss truss

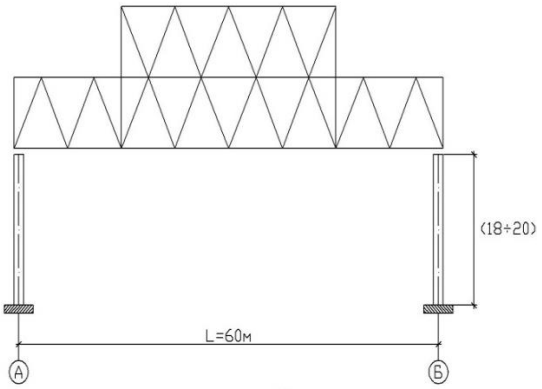


Рис. 8. Схема расположения фонаря в поперечном направлении здания
Fig. 8. The layout of the lantern in the transverse direction of the building

На рис. 8 показано большепролетное здание с поперечным расположением фонарей. Здесь обеспечивается совместная работа основной фермы с конструкциями фонаря. Средняя часть фермы имеет двойную высоту (рис.8).

Это обеспечивает уменьшение пролетного прогиба; повышение прочности пролетного строения; появляется возможность устройства дополнительное пространство для административных помещений в пределах средней части фермы (в пределах покрытия) – эксплуатируемое покрытие.

Вывод. Определены особенности работы большепролетных покрытий и проведен анализ влияния величины пролета на изгибающие моменты и прогибы.

Сформулированы конструктивные приёмы и примеры, которые позволяют уменьшить пролетные изгибающие моменты и перемещения.

Рассмотрены особенности работы плоских большепролетных конструкций: балочных и рамных.

Библиографический список:

1. Металлические конструкции, под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. Металлические конструкции, под ред. Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. –2-е изд. – Москва, Стройиздат, 1975. – 415 с.
4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П.− Москва, Стройиздат. 1980.− 776с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. Основы металлических конструкций – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Справочник конструктора «Стальные конструкции», под редакцией Шумакова 2004 г.
12. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» − Москва, Стройиздат, 1990.

References:

1. Metal structures. Ed.by Yu.I. Kudishina, Moscow, *Academy.* 2008 (In Russ)
2. Metal structures. Ed. by E.I. Belenya, Moscow, *Stroyizdat.* 1986 (In Russ)
3. Belenya E.N. Prestressed load-bearing metal structures. 2nd ed. Moscow, *Stroyizdat.* 1975: 415. (In Russ)
4. Metal structures (special course) - 2nd ed. under the editorship of Belenya E.N., Moscow, *Stroyizdat.* 1976: 600. (In Russ)
5. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, *Stroyizda,* 1974. (In Russ)
6. Metal structures: A designer's guide. 2nd ed. Under the editorship of Melnikov M.P. Moscow, *Stroyizdat*. 1980: 776. (In Russ)
7. Handbook of the designer "Steel structures" Ed. by Shumakov 2004 (In Russ)
8. V.V. Maslov. Fundamentals of metal structures. Volgograd (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 Code of Practice. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. (In Russ)

10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center "Construction" TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 2017: 92. (In Russ)
11. Handbook of the designer "Steel structures" Ed.by Shumakov 2004 (In Russ)
12. Trofimov V.I., Eremeev P.G. Membrane structures of buildings and structures. Moscow, *Stroyizdat*, 1990.

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Гаппаров Хизри Микдадович, аспирант кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, hairulla213@mail.ru

Hizri M. Gapparov, Postgraduate Student, Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 22.04.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.05.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 20.05.2022.

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 MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание 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 английйском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом **«Библиографический список».** Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +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 MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;
Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;
Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;
Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 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– №2 – 2022.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala,Volume 49, No.2 2022.

Верстка: Шагина С.Б.
Перевод: Шагина С.Б.
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.ruWebsite: http://vestnik.dgtu.ru

Layout: Svetlana B.Shagina
Translation: Svetlana B.Shagina
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 30.07.2022г. Сдано в печать 15.08.2022г.
Формат 60х84 $^{1}/_{8}$. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. *21,92*Уч. изд.л. *21,45*
Заказ № 1267

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.